

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE ESCOMBRERAS DE LA MINA DE ROCA FOSFATICA (CONCESION RIECITO), CERRO RIECITO, MUNICIPIO JACURA, ESTADO FALCON.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Carreño O., Juan C.
Para optar al título de Ingeniero de Minas.

Caracas, 2008.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE ESCOMBRERAS DE LA MINA DE ROCA FOSFATICA (CONCESION RIECITO), CERRO RIECITO, MUNICIPIO JACURA, ESTADO FALCON.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Miguel Castillejo.

TUTOR INDUSTRIAL: Lic. Luis Pírela.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Carreño O., Juan C.

Para optar al título de Ingeniero de Minas.

Caracas, 2008.

Caracas, Septiembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller Carreño Juan, titulado:

**“Diseño de las escombreras de la mina de roca fosfática (Concesión Riecito),
Cerro Riecito, Municipio Jacura, Estado Falcón”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Aurora Piña

Jurado

Prof. Pietro Di Marco

Jurado

Prof. Miguel Castillejo

TUTOR ACADÉMICO

DEDICATORIA

A mis padres

A mis hermanos, Antonio, Aura, Pedro, Douglas y Jesús

A mi esposa Ana Boada

A mi suegra Sor Angel Boada

AGRADECIMIENTOS

A mi dios por haberme dado la vida que tengo, y por brindarme la oportunidad, la sabiduría y la fortaleza que se necesita para lograr lo que he hecho hasta ahora en mi vida. Por haberme dado la familia y los amigos que tengo...Gracias...

Agradecimientos especiales a mis padres por haberme dado la educación y la formación que me inculcaron. Por su sacrificio y entrega incondicional, por haberme dado la fortaleza y la inspiración que necesitaba para lograr mis metas, y por sus consejos oportunos...Muchas gracias...

A mis hermanos por haberme brindado su apoyo, su comprensión y su amistad en los momentos en que los necesite, y por ser tan buenos ejemplos a seguir en mi vida...

A mi compañera, mejor amiga y esposa Anita por haberme brindado su cariño, amor, y compañía y por estar siempre a mi lado incondicionalmente y convertirse en una de las personas mas importantes de mi vida...Gracias mi amor...

A mis compañeros de estudio y amigos que fueron participes del desarrollo de mi carrera...

A mi suegra Sor Angel Boada por haberme brindado su apoyo y sus consejos que fueron bien recibidos...Muchas gracias

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por brindarme todo su apoyo y convertirse en mi segunda casa a lo largo de todos los años de estudio...

Al profesor Miguel Castillejo por su valiosa colaboración y apoyo para el desarrollo de esta investigación...Muchas gracias...

A la empresa PEQUIVEN por haberme dado la oportunidad de realizar el Trabajo Especial de Grado en esta prestigiosa empresa, y en especial al Licenciado Luis Pírela, Superintendente de la Mina Riecito...Gracias por su apoyo...

Carreño O., Juan C.

**DISEÑO DE ESCOMBRERAS DE LA MINA DE ROCA
FOSFATICA (CONCESION RIECITO), CERRO RIECITO,
MUNICIPIO JACURA, ESTADO FALCON.**

**Tutor Académico: Ing. Miguel Castillejo. Tutor Industrial: Lic. Luis Pírela.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Año 2008, 203 p.**

Palabras claves: diseño, escombrera, estéril, estabilidad.

Resumen. Debido al aumento de la producción de roca fosfática de 400.000 tn a 1.000.000 tn, y al aumento de la relación de remoción con el avance de la explotación, se prevé un incremento considerable del volumen de estéril a remover en la Mina Riecito.

En este sentido el objetivo general de este trabajo es diseñar las distintas escombreras en la mina, con la finalidad de depositar de forma ordenada los distintos tipos de estériles presentes en el yacimiento.

Para esto se procedió en primer lugar a clasificar y cuantificar cada uno de los estériles a depositar en las escombreras. Luego se realizó una descripción detallada de cada uno de los materiales, para lo cual se efectuaron algunos ensayos de laboratorio que permitieran realizar una caracterización geomecánica de los mismos. Además, se realizó una descripción y clasificación del macizo rocoso que servirá de base para las escombreras.

A partir de los resultados, se presentó el diseño de las escombreras de la Mina Riecito, considerando los volúmenes de estériles a remover. Según el análisis de estabilidad, el diseño presentado resultó ser favorable.

INDICE DE CONTENIDO

CONSTANCIA DE APROBACION	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	VI
INTRODUCCION.....	13
CAPITULO I.....	15
GENERALIDADES.....	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. OBJETIVOS	16
1.2.1. <i>OBJETIVO GENERAL.....</i>	<i>16</i>
1.2.2. <i>OBJETIVOS ESPECIFICOS</i>	<i>16</i>
1.3. JUSTIFICACION.....	17
CAPITULO II.....	19
ANTECEDENTES DE LA EMPRESA	19
2.1. LA EMPRESA	19
2.1.1. <i>Ubicación geográfica y acceso.....</i>	<i>19</i>
2.1.2. <i>Reseña histórica.....</i>	<i>20</i>
2.1.3. <i>Área afectada por la minería.....</i>	<i>21</i>
2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA	21
2.2.1. <i>Fisiografía</i>	<i>21</i>
2.2.2. <i>Suelos.....</i>	<i>22</i>
2.2.3. <i>Clima.....</i>	<i>23</i>
2.2.4. <i>Vegetación</i>	<i>23</i>
2.2.5. <i>Fauna.....</i>	<i>23</i>
2.3. GEOLOGÍA	24
2.3.1. <i>Geología regional de la Cuenca de Falcón.....</i>	<i>24</i>
2.3.2. <i>Geología Local</i>	<i>29</i>
2.3.3. <i>Geología económica</i>	<i>32</i>
2.4. DESARROLLO MINERO.....	37
2.4.1. <i>División del yacimiento.....</i>	<i>37</i>
2.4.2. <i>Sistema de explotación.....</i>	<i>38</i>
2.4.3. <i>Descripción de la explotación</i>	<i>38</i>
2.4.4. <i>Programa de perforación y voladuras.....</i>	<i>39</i>
2.5. PRODUCCIÓN DE ROCA FOSFÁTICA (MENSUAL Y ANUAL).....	41
2.6. PRODUCCIÓN DE ESTÉRIL (MENSUAL Y ANUAL).....	41
2.7. PLANTA DE TRITURACIÓN.....	41
2.7.1. <i>Descripción del proceso</i>	<i>42</i>
2.7.2. <i>Trituración primaria.....</i>	<i>42</i>
2.7.3. <i>Trituración secundaria</i>	<i>43</i>

2.7.4.	<i>Trituración terciaria</i>	43
2.7.5.	<i>Cribado final</i>	43
2.7.6.	<i>Trituración cuaternaria</i>	43
2.7.7.	<i>Sistema de cintas transportadas descendentes</i>	44
2.8.	SISTEMA DE DESPACHO A MORÓN	44
2.9.	EQUIPOS Y MAQUINARIAS PESADAS	45
•	<i>Tractores</i>	45
•	<i>Cargadores frontales</i>	45
•	<i>Camiones</i>	45
•	<i>Otros equipos</i>	45
CAPITULO III		47
MARCO TEORICO		47
3.1.	GENERALIDADES DE LAS ESCOMBRERAS	47
3.1.1.	<i>Escombrera</i>	47
3.1.2.	<i>Estudio y descripción de las escombreras</i>	48
3.2.	DESCRIPCION DE LOS ESTERILES MINEROS Y SUS PROPIEDADES	50
3.2.1.	<i>Clases de estériles mineros</i>	50
3.2.2.	<i>Propiedades de los estériles mineros</i>	53
3.3.	ELECCION Y PREPARACION DEL EMPLAZAMIENTO	63
3.3.1.	<i>Lugar del emplazamiento</i>	63
3.3.2.	<i>Clasificación de las escombreras según su ubicación con respecto a la explotación</i>	65
3.3.3.	<i>Geología y capacidad portante</i>	66
3.3.4.	<i>Metodología para la elección del emplazamiento</i>	67
3.3.5.	<i>Estudio del emplazamiento</i>	71
3.4.	CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS	86
3.4.1.	<i>Preparación del cimientto y sistemas de drenaje</i>	86
3.4.2.	<i>Control de la calidad de los materiales</i>	92
3.4.3.	<i>Operaciones de vertido</i>	94
3.4.4.	<i>Métodos y sistemas constructivos</i>	98
3.5.	ANALISIS DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS	104
3.5.1.	<i>Generalidades</i>	104
3.5.2.	<i>Factores que afectan la estabilidad</i>	105
3.5.3.	<i>Clasificación del grado de estabilidad de las escombreras. Índice INESTEC</i>	107
3.5.4.	<i>Evaluación de riesgos</i>	115
3.5.5.	<i>Tipos de roturas de escombreras</i>	116
3.5.6.	<i>Métodos de análisis de estabilidad</i>	120
3.6	ENSAYOS DE LABORATORIO	126
3.6.1.	<i>Ensayo de Carga Puntual</i>	127
3.6.2.	<i>Ensayo de corte en discontinuidades</i>	128
CAPITULO IV		132
EVALUACION DE SOFTWARES		132
4.1.	SOFTWARE AUTOCAD LAND DEVELOPMENT DESKTOP 2005 (LDD)	132
4.1.1.	<i>Autodesk Survey</i>	133

4.1.2.	<i>Autodesk Civil Design (CD)</i>	133
4.1.3.	<i>Características del LDD</i>	134
4.2.	PROGRAMA SLOPE/W	140
4.2.1.	<i>Características del programa</i>	141
CAPITULO V		145
RESULTADOS Y ANALISIS PARA EL DEPÓSITO DE ESCOMBRERAS.....		145
5.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	145
5.2.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	145
5.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA	145
5.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA INVESTIGACIÓN	146
5.5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	147
5.5.1	<i>Cuantificación de los materiales estériles</i>	148
5.5.2.	<i>Caracterización geomecánica de los estériles</i>	153
5.5.3	<i>Propiedades de los materiales estériles</i>	166
5.5.4.	<i>Elección del emplazamiento de la escombrera</i>	170
5.5.5.	<i>Estudio del emplazamiento de la escombrera</i>	172
5.5.6.	<i>Análisis de estabilidad de las escombreras</i>	175
5.5.7.	<i>Especificaciones técnicas para la construcción de las escombreras</i>	185
5.5.8.	<i>Plan de manejo de equipos mineros</i>	193
CONCLUSIONES.....		196
RECOMENDACIONES.....		199
BIBLIOGRAFIA		200
ANEXOS.....		203

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de recursos y reservas de Mc Kelvey	18
Figura 2.1 Ubicación geográfica y acceso de la Mina Riecito.....	19
Figura 2.2 Extracto del Mapa Geológico de Venezuela.	24
Figura 2.3 Leyenda del Mapa Geológico de Venezuela	25
Figura 2.3 Cuadro de correlación general de la Cuenca de Falcón.....	29
Figura 2.4 División del depósito de fosfato de la Mina Riecito.....	37
Figura 2.5 Diseño de bancos de explotación de la Mina Riecito.	38
Figura 2.6 Diagrama de planta de trituración de la Mina Riecito	42
Figura 3.1 Labores mineras que generan estériles y sistemas de deposición.....	47
Figura 3.2 Análisis empírico para la estimación de la resistencia al corte de juntas de roca, estériles y contacto entre ambas.....	57
Figura 3.3 Método para estimar la rugosidad equivalente (R) de un estéril de mina.....	58
Figura 3.4 Método para estimar la resistencia equivalente (S) de un estéril de mina.....	59
Figura 3.5 Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento.....	63
Figura 3.6. Implantación de escombreras en relación al hueco de explotación	65
Figura 3.7 Colocación de geotextil en una zanja de drenaje (Dren Francés).....	89
Figura 3.8 Drenaje del talud de la escombrera.....	90
Figura 3.9 Colocación del drenaje rocoso.....	90
Figura 3.10 Detalle de dren perimetral	91
Figura 3.11 Detalle de gradería.....	92
Figura 3.12 Calidad de los estériles	93
Figura 3.13 Configuración de la plataforma de vertido	96
Figura 3.14 Tipos de escombrera según la secuencia de construcción	99
Figura 3.15 Métodos de vertido en escombreras	101
Figura 3.16 Métodos de construcción de escombreras	102
Figura 3.17 Construcción ascendente y descendente de escombreras	104
Figura 3.18 Causas de inestabilidad de escombreras.....	117
Figura 3.19. Ábaco de corrección del índice I_s (50).....	128
Figura 4.1 Pantalla de inicio del programa Land Development Desktop 2005.	132
Figura 4.2 Método de la Cuadrícula.....	138
Figura 4.3 Pantalla principal del programa GEOSLOPE/W.....	141

Figura 5.1 Ripabilidad de distintas rocas para tractores D10R de Caterpillar	157
Figura 5.2 Clasificación de las rocas según su excavabilidad	157
Figura 5.3 Resultado de ensayo de corte directo sobre la muestra SN3 (9 – 11).....	158
Figura 5.4 Resultado de ensayo de corte directo sobre la muestra SN5 (15 – 18).....	159
Figura 5.5 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN3 (32 – 35).....	160
Figura 5.6 Clasificación de las rocas según su excavabilidad	164
Figura 5.7 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN1 (20 – 21).....	165
Figura 5.8 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN6 (7 – 11).....	165
Figura 5.9 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN8 (29 – 32).....	166
Figura 5.10 Configuración geométrica del talud de la escombrera de marga calcárea.....	181
Figura 5.11 Superficie de deslizamiento parcial de la escombrera de marga calcárea	182
Figura 5.12 Configuración global del talud de la escombrera de marga calcárea	183
Figura 5.13 Superficie de deslizamiento global de la escombrera de marga calcárea	184
Figura 5.14 Diagrama de dren rocoso en la base de la escombrera	186
Figura 5.15 Topografía actual de la Mina de Riecito y proyección de la escombrera de marga en el pit final	188
Figura 5.16 Proyección de las escombreras en el pit final de la mina	190
Figura 5.17 Perfil longitudinal de las escombreras al final de la construcción.....	191
Figura 5.18 Perfil del dren perimetral en la base de las terrazas.....	192
Figura 5.19 Canal en gradería para la recolección y disipación de las aguas.	193

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 COORDENADAS DE VÉRTICES DE LA CONCESIÓN RIECITO.	20
TABLA 2.2. ÁREA DE AFECCIÓN DE LA CONCESIÓN POR BLOQUES	21
TABLA 3.1 RESERVAS GEOLÓGICAS (ENADIMSA, 1982)	35
TABLA 3.2. RESERVAS ECONÓMICAMENTE EXPLOTABLES (ENADIMSA, 1982).	35
TABLA 3.3 RESERVAS ECONÓMICAMENTE EXPLOTABLES (JACOBBS, 1995).....	36
TABLA 3.4 RESERVAS ECONÓMICAMENTE EXPLOTABLES (SPALDING, 1997).	36
TABLA 3.1 PROPIEDADES DE LOS ESTÉRILES MINEROS Y ENSAYOS A REALIZAR.....	50
TABLA 3.2 FACTOR DE RESISTENCIA DE LA CIMENTACIÓN.....	68
TABLA 3.3 FACTOR TOPOGRÁFICO O DE PENDIENTE.....	69
TABLA 3.4 FACTOR RELATIVO AL ENTORNO HUMANO Y MATERIAL A SER AFECTADOS	69
TABLA 3.5 FACTOR DE ALTERACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	70

TABLA 3.6 CLASIFICACIÓN DE LOS EMPLAZAMIENTOS SEGÚN VALOR DE QE.....	71
TABLA 3.7 PROPIEDADES Y PRUEBAS IMPORTANTES PARA SUELOS DE CIMENTACIÓN	72
TABLA 3.8 PROPIEDADES DEL SUSTRATO ROCOSO DEL CIMIENTO Y ENSAYOS A REALIZAR.....	78
TABLA 3.9 PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR Y SUS VALORES.	82
TABLA 3.10 CALIDAD DEL MACIZO Y VALORES ESTIMADOS DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN	82
TABLA 3.11 PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO DEL CIMIENTO Y ENSAYOS A REALIZAR.....	83
TABLA 3.12 CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS	108
TABLA 3.13 CLASES DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS Y ACTUACIONES RECOMENDADAS .	112
TABLA 3.14 COEFICIENTES DE SEGURIDAD MÍNIMOS REQUERIDOS EN EL PROYECTO DE ESCOMBRERAS.....	122
TABLA 5.1 REPORTE DE VOLUMEN DE RECUBRIMIENTO (CALIZA)	151
TABLA 5.2 RESULTADOS DE ENSAYO DE CARGA PUNTUAL EN LAS MUESTRAS DE MARGA CALCÁREA.....	155
TABLA 5.3 CLASIFICACIÓN DE LA MARGA A PARTIR DE SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE	156
TABLA 5.4 RESULTADOS DE ENSAYO DE CARGA PUNTUAL EN LAS MUESTRAS DE CALIZA QUÍMICA.	162
TABLA 5.5 CLASIFICACIÓN DE LA MARGA CALCÁREA A PARTIR DE SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE	163
TABLA 5.6 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	174
TABLA 5.7 CLASIFICACIÓN DE LA ESCOMBRERA SEGÚN ÍNDICE INESTEC.....	175
TABLA 5.8 CLASE DE ESTABILIDAD DE LAS ESCOMBRERAS Y ACTUACIÓN RECOMENDADA....	177
TABLA 5.9 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LA ESCOMBRERA DE MARGA CALCÁREA.....	178
TABLA 5.10 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LA ESCOMBRERA DE CALIZA	179
TABLA 5.9 RESULTADO DE FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO CON PROGRAMA SLOPE/W.....	181
TABLA 5.11 RESULTADO DE FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO CON PROGRAMA SLOPE/W.....	183
TABLA 5.12 PRODUCTIVIDAD DE LOS EQUIPOS DE ACARREO DE LA MINA RIECITO	194

INTRODUCCION

Las actividades mineras para la extracción de roca fosfática en la mina de Riecito, localizada en el Distrito Acosta del Estado Falcón, producen una gran cantidad de residuos tales como estériles (mayormente caliza), capa vegetal y mena con concentración de bajo tenor, y plantean el problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integración en el entorno.

Los residuos deben ser manipulados y tratados en forma adecuada desde la generación hasta su destino final. Dada la diversidad de residuos, ellos deben ser clasificados y manipulados de manera separada dependiendo de las características de cada uno.

Los residuos procedentes de la cobertura de las operaciones de cielo abierto se depositan, generalmente, como fragmentos gruesos en pilas que constituyen las denominadas escombreras o botaderos. También se almacenan de la misma manera los rechazos de las plantas de tratamiento y concentración con una granulometría inferior a la de los materiales anteriores, pero sin llegar al rango de las arenas y lodos.

El objetivo principal de esta investigación es diseñar las escombreras para la mina de roca fosfática de la concesión Mina Riecito, que esta localizada en el Cerro Riecito del Municipio Jacura del Estado Falcón.

Debido a que la relación de remoción del yacimiento aumenta significativamente a medida que la explotación avanza, y a que se ha planteado un aumento de la producción para el año 2009 de 400.000 tn/año a 1.000.000 tn/año, es necesario que se realice un estudio detallado sobre el manejo de los residuos, motivo por el cual se realizara la siguiente investigación.

Por otro lado se debe considerar el hecho de que las rocas que conforman el recubrimiento del yacimiento, y que son estériles en la explotación de la roca fosfática, puedan ser explotadas en un futuro como materia prima para la elaboración de cemento o como agregado para la construcción. En la actualidad se esta

desarrollando un estudio de factibilidad acerca del posible aprovechamiento de estas calizas.

La metodología empleada para la realización de este trabajo se basó en una investigación de campo, en la obtención de parámetros de diseño mediante ensayos de laboratorio, en la aplicación de herramientas computarizadas, en fuentes bibliográficas, hemerográficas y orales que permitieron realizar los cálculos correspondientes para el diseño de las escombreras de la Mina Riecito.

Para la mejor comprensión de esta investigación la misma se presentó en cinco capítulos. En primer lugar se muestran las generalidades de la investigación, donde se describen los objetivos, el planteamiento del problema y la justificación de la investigación. En el capítulo II se presentan los antecedentes de la empresa, donde se describen las condiciones de la zona, la geología del yacimiento y el plan de desarrollo minero seguido para la extracción de la roca fosfática. Luego en el capítulo III se presentan los fundamentos teóricos utilizados en el desarrollo de esta investigación, al igual que en el capítulo IV donde se describen los softwares utilizados para la realización de los cálculos necesarios en el diseño. Mientras que en el capítulo V se exponen los resultados y análisis del trabajo. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la mina de roca fosfática ubicada en el Cerro Riecito tiene una producción de unas 400.000 tn/año. Pero, debido a la instalación de nuevas plantas de fertilizantes en el Complejo Petroquímico Morón, las cuales estarán en funcionamiento para el año 2009, se requerirá una producción de 1.000.000 tn/año de roca fosfática.

El yacimiento de roca fosfática de Riecito tiene forma alargada y una orientación este-oeste. La explotación del yacimiento se inició por el lado oeste del mismo, ya que en esta zona la roca fosfática afloraba en la superficie, pero la relación de remoción de estéril aumenta en el mismo sentido en que avanza la explotación. Es por esto que para la próxima década se prevé una remoción de estéril que totaliza aproximadamente 7.000.000 m³, volumen bastante considerable con respecto a los que se han removido históricamente en esta mina. Como consecuencia de esto, se presenta la necesidad de construir unas escombreras donde se puedan depositar estos estériles tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales.

En el diseño de las escombreras se debe considerar el hecho de que parte de la roca que suprayace e infrayace al yacimiento, son calizas, las cuales se pudieran aprovechar en un futuro. En la actualidad, está en fase de conceptualización la realización de un estudio de factibilidad de aprovechamiento de esta caliza, por lo que al momento de diseñar las escombreras se debe tomar en cuenta esta premisa.

El proyecto de diseño de escombreras se realizó en la mina de roca fosfática ubicada en el Cerro Riecito, Municipio Jacura del Estado Falcón, en la margen izquierda del

río Tocuyo, a una distancia de 29 km. de la población de Yaracal en la carretera Morón-Coro y a 2 km de la comunidad de Riecito.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar las distintas escombreras en la mina de roca fosfática Riecito, con la finalidad de depositar de forma ordenada los distintos tipos de estériles presentes en el yacimiento.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- (a) Cuantificar el volumen a depositar por año y especificar el tiempo de duración de la explotación.
- (b) Caracterización geomecánica de la roca presente en el yacimiento (mena y estériles).
- (c) Clasificar y distribuir adecuadamente los materiales a ser depositados en las escombreras.
- (d) Seleccionar las áreas óptimas para la ubicación de las escombreras, aprovechando al máximo los espacios disponibles dentro de la concesión.
- (e) Seleccionar los tipos de escombreras.
- (f) Definir los parámetros de diseño de las escombreras.
- (g) Dimensionar las escombreras.
- (h) Establecer el método de vertido.
- (i) Establecer una buena red de drenaje de fondo.
- (j) Garantizar condiciones de estabilidad satisfactorias.
- (k) Sugerir un plan de manejo racional de los equipos mineros.

1.3. JUSTIFICACION

El proyecto de diseño de las escombreras en la mina de Riecito permitirá manejar desde un punto de vista técnico, económico, social y ambiental el problema de la generación de estériles en la explotación de roca fosfática en la Concesión Riecito.

Los estériles que se generan en la explotación de roca fosfática, son la caliza, marga y roca fosfática de bajo tenor. Dichos estériles podrían tener en un futuro diversos usos, por ejemplo la caliza se podría emplear para la fabricación de cemento, la marga se podría utilizar como agregado para la construcción y la roca fosfática de bajo tenor se podría convertir en mena si las condiciones económicas lo permiten en un futuro. De hecho, en la actualidad se está realizando un estudio de prefactibilidad acerca del posible aprovechamiento de la caliza y de la marga que se encuentran sobre y debajo del yacimiento de roca fosfática.

Es por esto, que se plantea la necesidad de realizar un diseño adecuado de escombrera para cada tipo de estéril, ya que de esta forma se garantiza la selectividad de los mismos en caso de que resulte factible su explotación.

Además, cabe mencionar la siguiente frase: “Lo no explotable hoy mañana si puede serlo”, y ponemos como referencia el cuadro de clasificación de recursos y reservas de Mc Kelvey, donde se puede ver que si las condiciones de precio en el mercado y de tecnología de extracción mejoran un recurso se puede convertir en reserva (Figura 1.1).

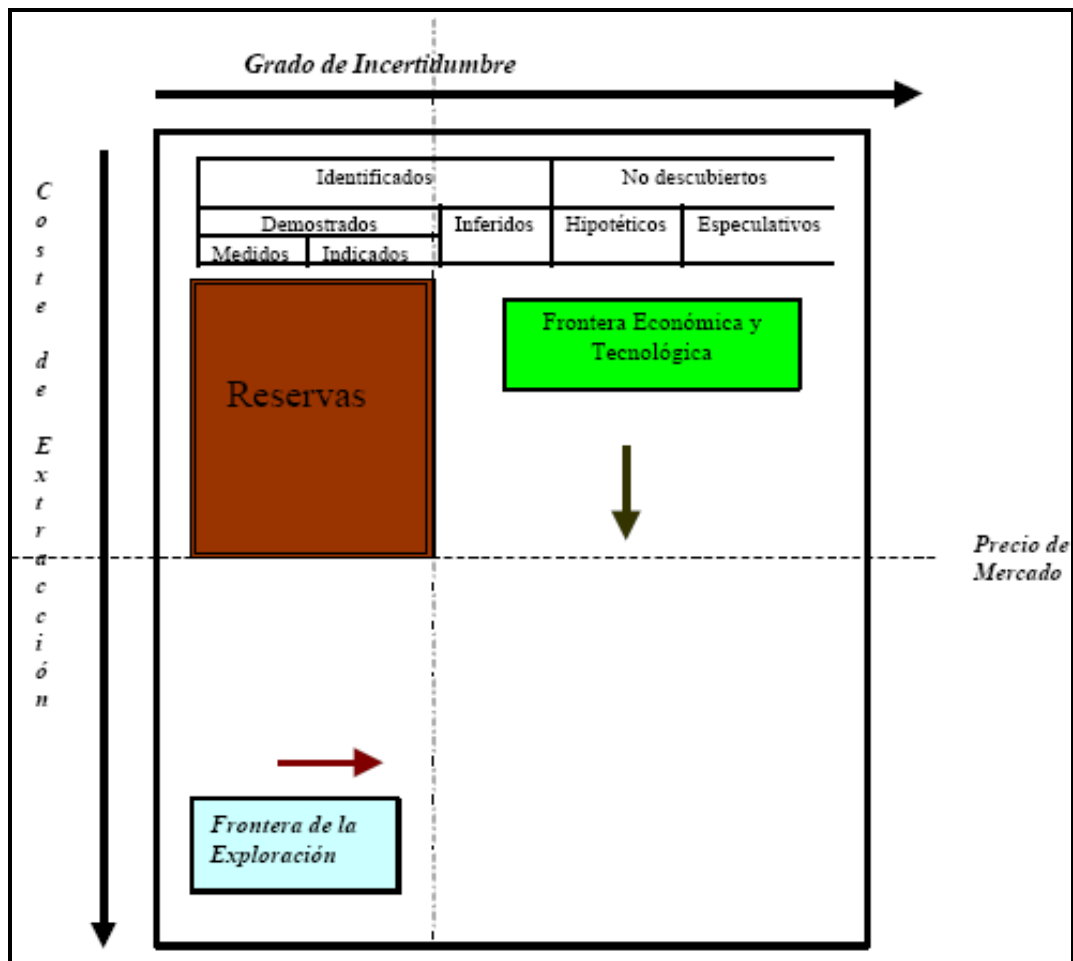


Figura 1.1 Clasificación de recursos y reservas de Mc Kelvey

CAPITULO II

ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

2.1. LA EMPRESA

2.1.1. Ubicación geográfica y acceso

La concesión está ubicada en el Cerro Riecito, municipio Jacura del estado Falcón, en la margen izquierda del río Tocuyo, a una distancia de 29 km de la población de Yaracal en la carretera Morón-Coro y a 2 km de la comunidad de Riecito. Se llega por carretera con tramos asfaltados y engranzonados y, transitable todo el año (Figura 2.1).



Figura 2.1. Ubicación geográfica y acceso de la Mina Riecito

(Fuente: INGEOMIN)

La concesión está enmarcada en un polígono rectangular cerrado por los 4 vértices, cuyos botalones están identificados por las siguientes coordenadas (tabla 2.1):

Tabla 2.1. Coordenadas de vértices de la concesión Riecito

BOTALON	COORDENADAS UTM - NORTE	COORDENADAS UTM - ESTE
1	1.204.997,24	524.758,70
2	1.206.284,20	524.158,58
3	1204.805,04	520.986,50
4	1.203.518,08	521.586,62

(Fuente: INGEOMIN)

2.1.2. Reseña histórica

La concesión fue otorgada por "denuncio minero" al Ing. Juan Martín Alegría según Gaceta Oficial N° 2203 de fecha 2 de mayo de 1947, posteriormente fue vendida al señor Radamés Borghini según documento protocolizado ante la Oficina Subalterna del Registro de los Distritos Acosta y Silva del estado Falcón en fecha 27 de abril de 1955, luego pasa a ser propiedad de la Compañía Riecito C.A. en mayo del mismo año. En diciembre de 1957 la compra el Instituto Venezolano de Petroquímica y en junio de 1977, es cedida a PEQUIVEN por ser ésta causahabiente del IVP según Ley de Conversión del Instituto, antes mencionado, en Sociedad Anónima. FOSFAVEN se la compra a PEQUIVEN en abril de 1987 y finalmente PEQUIVEN adquiere el derecho minero de FOSFAVEN en mayo de 1995.

El área donde se desarrolla la explotación ha sido arrendada a PEQUIVEN por la alcaldía del municipio Jacura. De acuerdo a la Oficina Nacional de Catastro del Ministerio de Agricultura y Cría (ahora Ministerio de Agricultura y Tierra) el régimen de propiedad dominante en el área es de tipo privado. La dedicación

predominante de la tierra es la ganadería combinada con los tradicionales conucos. El uso agrícola vegetal se restringe a los terrenos que pertenecían al Instituto Agrario Nacional (IAN), correspondientes al Asentamiento Campesino Bachacal.

2.1.3. Área afectada por la minería

El área de concesión es de 497 ha, y la actividad minera afecta sólo 69 ha. Las reservas económicamente explotables fueron divididas en tres bloques denominados Bloques A, B Y C y totalizaron un área mineralizada de 42 ha, distribuidas de la siguiente manera (tabla 2.2):

Tabla 2.2. Área de afección de la concesión por bloques

BLOQUE	SUPERFICIE (ha)	ESPELOR DEL FOSFATO (m)
A	8,9	8,69
B	23,3	12,49
C	9,5	14,02
Total: 42 ha		

(Fuente: INGEOMIN)

2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA

2.2.1. Fisiografía

Según SANTELIZ, H. (1972), el cerro Riecito es una de las últimas estribaciones orientales de la serranía Churuguara-Agua Linda. Tiene forma alargada este-oeste, la parte oeste es la más elevada y alcanza hasta 650 m de altura; en dirección hacia el sur, su pendiente es suave, medianamente uniforme y muere en el valle del río Tocuyo; hacia el norte es muy pronunciada hasta el caserío Riecito, desde donde continúa con suaves ondulaciones hasta el valle del río Araurima.

2.2.2. Suelos

2.2.2.1. Suelos del Bosque Natural

Estos suelos se encuentran en la zona de paisaje montañoso hasta los 50 msnm; de relieve fuertemente ondulado, con una topografía en posición de ladera y pendientes mayores al 30 %, cubierto por bosque natural. Los suelos localizados en esta zona tienen un alto grado de evolución y se clasifican dentro del orden de los alfisoles, evidenciados por un horizonte argílico. La estructura es granular y muy friable, encontrándose texturas finas a muy finas a través del perfil del suelo. Los horizontes superficiales son pocos profundos, menores a 10 cm, existiendo en algunos casos, afloramiento del material parental (roca caliza fosilífera, masiva, con una alta susceptibilidad a la meteorización química). La coloración que presenta es marrón oscuro a amarillenta, el drenaje interno es muy lento con una baja permeabilidad.

2.2.2.2. Suelos sobre el yacimiento de Fosfato

Estos suelos se encuentran en la parte más alta del paisaje a 650 msnm; con relieve ondulado y con una topografía de plano inclinado con pendientes fuertes. Los suelos localizados en este sector tiene un incipiente desarrollo pedogenético, con un horizonte orgánico poco profundo y se clasifican dentro del orden de los Inceptisoles. Tienen un pH de 6, contenido de materia orgánica de 2,4 %, fósforo mayor a 1000 ppm, alto porcentaje de calcio, poco potasio, y baja conductividad eléctrica.

La estructura es granular débil, con texturas gruesas de franco-arenosas en los primeros horizontes y de areno-francosa en el interior del perfil del suelo. Este suelo se desarrolló sobre la roca fosfatada y en algunos casos sobre la roca caliza fosilífera; es por ello que las propiedades químicas heredadas por estos suelos están íntimamente ligadas al material parental de los mismos. Los drenajes internos y externos son excelentes, con una alta permeabilidad.

2.2.3. Clima

Según la clasificación de KOEPPEN, FREILE (1968) desde el punto de vista climático, el área de interés se halla tipificado dentro del siguiente rango A1-W-G, donde:

- A1 Clima tropical extremo ubicado para Venezuela entre 0 y 300 msnm con más de 26° C de temperatura media anual.
- W Clima tropical extremo con estación lluviosa en el solsticio de verano.
- G Estación más calurosa después del solsticio de verano.

La precipitación media en la zona es de 1.000 a 1.800 mm.

2.2.4. Vegetación

Según el Mapa Ecológico de Venezuela, el área de interés corresponde a bosque del tipo seco tropical, húmedo tropical y húmedo premontano.

Se distinguen dos tipos de vegetación bien definidas, el primer tipo corresponde a las denominadas por el botánico Henry Pittier "selvas veraneras" que se vuelven boscosas en las zonas donde afloran los cuerpos de calizas, dentro de este tipo podemos mencionar al guatacaro, la vera, olivo, gatillo, caoba, saqui-saqui etc. El segundo tipo es de vegetación xerófila tales como: cují negro, la maya, el teco, etc.

2.2.5. Fauna

La biodiversidad está representada por varias especies, de las cuales se mencionan tan solo una parte, como son el Báquiro, Venado, Lapa, Cunaguaro, Armadillo-Cachicamo, Rabipelao, Conejo sabanero, Marmosa xerófila. La avifauna está representada por las especies nombradas a continuación: Garza blanca, Gavilán, Perdiz, Paloma torcaz-Tórtola, Cristo fue, Zamuro, Cardenal coreano, Flamencos, Cardenalito, Corocora. Los anfibios que se encuentran en el área afectada son el sapo y la rana. Los reptiles encontrados en el área son la iguana, cascabel y la macagua. Las especies de quelonios identificadas son el morocho sabanero, y el galápagos.

2.3. GEOLOGÍA

2.3.1. Geología regional de la Cuenca de Falcón

Las rocas más antiguas que afloran en la Cuenca de Falcón (figura 2.2) son los conglomerados y calizas de la Formación Santa Rita y las lutitas de la Formación Jarillas, ambas del Eoceno medio. Estas unidades litológicas afloran esporádicamente en los núcleos de los anticlinales en Falcón sur-occidental. No obstante, esta secuencia pertenece a un ciclo tectónico anterior, el cual culminó con la orogénesis del Eoceno superior, que afectó extensamente al occidente de Venezuela, con excepción del extremo sureste de la Cuenca de Falcón, donde las lutitas marinas de la Formación Cerro Misión revelan la existencia de condiciones marinas normales en el Eoceno superior (ZAMBRANO *et al.* 1971-GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* 1980).

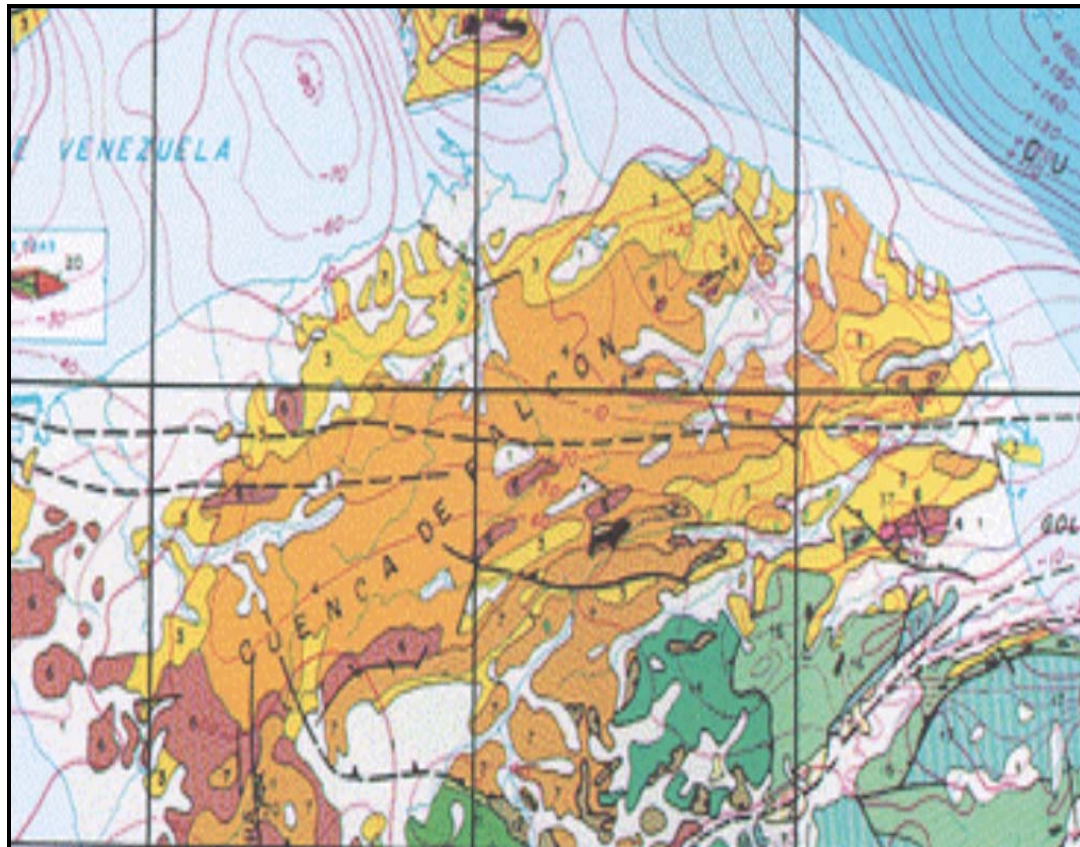


Figura 2.2 Extracto del Mapa Geológico de Venezuela.

(Fuente: Pequiven)



Figura 2.3 Leyenda del Mapa Geológico de Venezuela

(Fuente: Pequiven)

Luego de la orogénesis del Eoceno superior, la trasgresión marina avanzó de este a oeste, dando lugar a la cuenca Oligo-Mioceno de Falcón, denominado también Canal Falconiano, bordeado al sur, oeste y norte por zonas positivas que permanecieron relativamente estables a largo de la historia de la cuenca. En su parte nor-occidental, la depresión conocida como Surco de Urumaco, la conecta con la parte oriental del Golfo de Venezuela y hacia el este la cuenca de Falcón estuvo abierta y en continuación con la cuenca de Bonaire.

La cuenca de Falcón recibió aportes sedimentarios provenientes del sur, oeste y norte, en consecuencia la litología resultante es variada por la existencia de diferentes provincias distributivas y por la proximidad y coexistencia de ambientes sedimentarios diferentes.

La sedimentación comienza en el Oligoceno inferior, en la parte occidental de la cuenca, depositando una secuencia deltáica progradante hacia el este: Formación Paraíso, la cual pasa en el tope transicionalmente a la Formación Pecaya, espesa secuencia de lutitas depositadas en profundidades batiales.

El intervalo arenoso de San Juan de La Vega, confinado dentro de las lutitas de Pecaya, de extensión limitada y de ambiente litoral muy somero, es conocido sólo en la parte norte de la cuenca. DIAZ GAMERO (1977) considera que se depositó probablemente sobre una plataforma conectada al Alto de Dabajuro, sobre lutitas de

Pecaya, acuñándose hacia el sur, donde la secuencia depositada en ambientes más profundos, es ininterrumpidamente lutítica. Un posterior hundimiento de esta plataforma, depositó lutitas de la Fm. Pecaya sobre el intervalo arenáceo.

Durante este mismo período, en los bordes de la cuenca, se desarrollaron secuencias de ambientes marginales. A lo largo del borde suroeste se depositó la Formación Casupal, la cual está constituida por conglomerados y areniscas con capas de lignito y lutitas carbonáceas de ambiente costero, planicies fluviales y costeras con marcada influencia terrígena. Hacia el oeste, la Formación Casupal se integra con la Formación Churuguara, representada por calizas fosilíferas arenosas que gradan a areniscas calcáreas y calizas arrénciales locales, que no alcanzan el desarrollo de las calizas del borde norte.

En el borde occidental, la Formación Churuguara pasa a la Formación Castillo, representativa de ambiente continental a salobre, constituida por elásticos gruesos, limolitas y lutitas carbonáceas.

El Mioceno inferior termina con la depositación de una sección eminentemente lutítica, con delgadas intercalaciones de areniscas limosas y calcáreas, en aguas moderadamente profundas a someras: Fm. Agua Clara, que cubrió progresivamente toda la región occidental.

La unidad basal de este nuevo ciclo en Falcón occidental es la Formación Cerro Pelado (Mioceno medio inferior), de ambiente costero-deltaico con intercalaciones paludares. Sobre el Alto de Dabajuro la sedimentación pasa a continental (Grupo La Puerta) y más al este, sobre la Fm. Cerro Pelado, se dispone la Fm. Socorro. (Mioceno medio), representada por paquetes gruesos de areniscas poco consolidadas, frecuentemente calcáreas, de aguas marinas cálidas, poco profundas, en su sección tipo; hacia el este, el ambiente de esta formación se profundiza alcanzando más de 450 m. En la zona centro norte, transicional entre Cerro Pelado y Socorro, se encuentra un intervalo lutítico (Fm. Querales) que hacia el este pierde su carácter litológico hasta no poderse diferenciar de la Fm. Socorro.

Las Formaciones Urumaco y Caujarao siguen a Socorro. La primera con mayor influencia continental, contiene huesos de tortuga, saurios y mamíferos, en base a los cuales se ha asignado su parte superior al Plioceno. La Fm. Caujarao es más marina que Urumaco a causa de la profundización hacia el este, representada por calizas y margas glauconíticas, fosilíferas y lutitas marinas.

El Mioceno superior en Falcón central está representado por depósitos marinos someros: Fm. Codore; más al este por la Formación La Vela, de ambientes marinos someros y por la secuencia definitivamente marina de la Fm. El Veral. En su parte superior, la Fm. La Vela se interdigita con conglomerados del Plioceno de la Fm. Coro, de carácter continental.

El Alto de Cerro Misión, efectivo al menos durante el Oligoceno medio, constituyó el límite sur de la Cuenca de Agua Salada (RENZ, 1948), en donde la sedimentación marina profunda, se mantuvo desde el Eoceno superior hasta el Mioceno superior. La secuencia eminentemente lutítica incluye las Formaciones Cerro Misión (Eoceno superior), Guacharaca y el Grupo Agua Salada (Fms. San Lorenzo y Pozón, del Oligoceno) depositadas a profundidades batiales: 1.300 m.

Al sur del Alto Cerro Misión, en la subcuenca de Casupal, la sedimentación de ambientes más someros, comenzó más tarde. La sección sedimentaria registra una trasgresión marina hacia el sur, en el Mioceno medio, depositándose concordantemente sobre sedimentos litorales de la Formación Casupal una sección de carácter más marino de poca profundidad: Fm. Agua Linda. Discordantes sobre esta sección se encuentran las calizas arrécifales y margas de la Formación Capadare que más al sur, en el valle de Aroa, suprayacen sobre rocas metamórficas.

En Falcón oriental, la sedimentación termina con la depositación de arcillas y calizas de ambiente marino somero, cercanos a la costa, de la Fm. Ojo de Agua (Mioceno superior). En la Cuenca de Agua Salada, esta sección es concordante y diacrónica sobre la Fm. Pozón. Hacia el sur, en la Cuenca de Casupal, cubre discordantemente a la Fm. Capadare y más al sur suprayace a rocas metamórficas.

De manera general se observa, durante el período que abarca del Mioceno medio al superior, que la sedimentación en la Cuenca de Falcón se caracteriza por una mayor influencia marina hacia el este, en sedimentos contemporáneos. Verticalmente se observa una variación de los ambientes, que se hacen menos marinos al ascender en la columna estratigráfica.

La estructura de la Cuenca de Falcón es compleja, durante el Mioceno tardío y Plioceno, la cuenca fue levantada y deformada, formándose un anticlinorio de orientación este-noreste (ZAMBRANO y otros, 1971; WHEELER, 1963). MUESSIG, 1984 menciona los siguientes tipos de estructuras en la cuenca: 1°) Fallas transcurrentes dextrales este-oeste; 2°) Fallas normales este-oeste; 3°) Fallas normales norte-noroeste; 4°) Pliegues y fallas inversas con orientación este-noreste; 5°) Fallas transcurrentes oeste-noroeste y 6°) Fallas transcurrentes norte-noreste. Este autor propone que la Cuenca de Falcón es una cuenca de tracción que forma parte de un sistema de cuencas de este tipo en el margen norte de Venezuela. En la figura 2.3 se muestran las formaciones que afloran en la Cuenca de Falcón entre el Eoceno medio y el Pleistoceno.

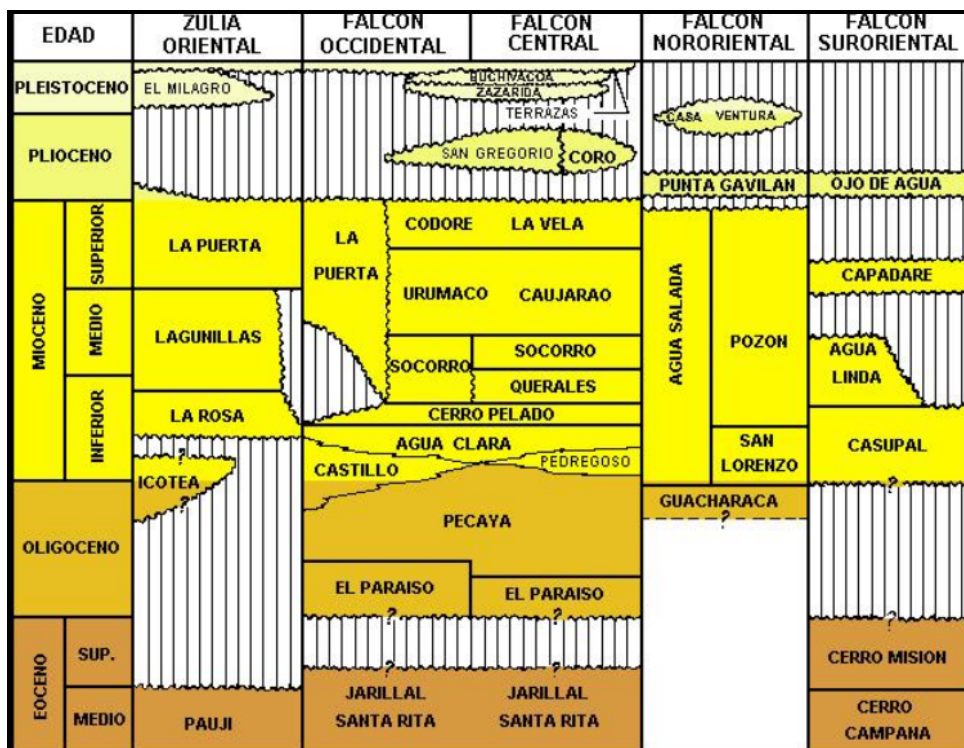


Figura 2.3 Cuadro de correlación general de la Cuenca de Falcón

(Fuente: Pequiven)

2.3.2. Geología Local

El yacimiento fosfático de Riecito se encuentra en la cuenca sedimentaria de Agua Salada, casi en los límites con la sub-cuenca de Casupal. Coincide con un levantamiento tectónico en forma de anticlinal asimétrico con eje orientado más o menos este-oeste. Intensas fallas de corrimiento, paralelas al eje, afectan la parte norte. En campo se pueden observar fallas normales que han escalonado el yacimiento. También se observa en campo que las calizas están muy fragmentadas por efecto del tectonismo. La roca que constituye el yacimiento ha sido clasificada petrográficamente como una marga fosfática arenácea, la cual se encuentra interestratificada entre dos horizontes de calizas cuya edad está limitada entre el Oligoceno medio y el Mioceno medio. (C. PONTE R., G. MARQUEZ y G. GARRIGA G. "Yacimiento Fosfático de Riecito, Estado Falcón. Estudio Geológico Económico" en: III Congreso Geológico Venezolano, Tomo IV).

Existen suficientes indicios para afirmar que el yacimiento es de origen secundario; bien sea debido a procesos supergénicos de reemplazo, o a una concentración "in situ" por descalcificación de rocas fosfáticas pre-existentes.

2.3.2.1 Estratigrafía y litología

La secuencia estratigráfica desde la superficie hasta la base del yacimiento es como sigue:

- **Sedimentos aluvionales** expuestos a lo largo del cauce de pequeñas quebradas que cruzan la zona, de espesores variables: arcillas arenosas y arenas conglomeráticas de colores amarillento, rojizo y marrón claro.
- **Sedimentos lacustres** en la parte central con espesores variables: arcillas plásticas rojizo-amarillentas, arenosas y a veces calcáreas.
- **Calizas superiores** infrayacentes a los sedimentos lacustres, se presentan espesos bancos de calizas arrecifales de color marrón a gris claro, duras o muy fosilíferas.
- **Roca fosfática** en varias tonalidades desde gris claro a marrón oscuro, bastante fosilífera, silíceo y muy cavernosa; los granos de cuarzo varían desde muy irregulares hasta perfectamente redondeados, lo que acusa un largo transporte.
- **Arcillas y calizas inferiores** ubicadas al sur del depósito de roca fosfática y suprayacentes a un potente manto de arcilla arenosa, poco consolidada, de color amarillento, a rojizo, intercalada con calizas similares a las calizas superiores.

Petrográficamente la roca fosfática puede clasificarse como una marga fosfática arenosa con contenido de cuarzo variable entre 15 y 25 %. El mineral fosfático predominante es la colofanita, que generalmente forma la matriz. El mineral secundario es dahalita, y como accesorio se presenta estafelita. La textura predominante es brechoide, aunque se observan texturas radiales-bandeadas y

drusíticas; la textura oolítica o nodular característica de los fosfatos marinos está ausente.

2.3.2.2. Formación Capadare. Descripción Litológica.

Con el nombre de Caliza de Capadare se designó a un conjunto de calizas arrénciales que afloran en Falcón oriental que se correlacionaron con diversas unidades de Falcón central. RENZ (en: *Léxico Estratigráfico de Venezuela*, 1, 1956, p. 133) restringió la aplicación del término a las calizas expuestas con localidad tipo en cerro Capadare, distrito Acosta del estado Falcón. Se desconoce la extensión geográfica de la Formación Capadare dentro de la cuenca de Agua Salada, siendo probable que las calizas en el cerro Píritu (distrito Zamora, al norte del río Hueque) sean correlativas con las calizas del miembro Cumarebo (GONZÁLEZ DE JUANA, 1937, p.204). RENZ (1948) indicó que el grupo Agua Salada profundizaba en dirección norte y este de su localidad tipo, unos 30 km al sur del río Hueque y que el mar se hacia somero en dirección sur, reemplazándose las facies lutíticas por facies de calizas arrénciales.

La Formación Capadare consiste en calizas margosas de color crema, muchas de ellas coquinoideas, de espesor variable entre pocos metros y 25 m; lutitas calcáreas también de color crema, algunas arenáceas o limosas y ricas en contenido faunal y escasos lentes de areniscas calcáreas de grano fino. Algunas calizas son fosfáticas y otras dolomíticas. Los cambios litológicos laterales son frecuentes; en algunas localidades la unidad está constituida por 90 por ciento de calizas y en otras puede contener hasta 50 por ciento de lutitas y margas.

En las calizas de la Formación Capadare se han localizado yacimientos de fosfato, como son el de Riecito (PONTE RODRIGUEZ, 1951; SANTELIZ, 1972, etc.), el de el Cerro Chichiriviche con el yacimiento de Lizardo y el de Sanare. Rodríguez et al. (1976) ubicaron un cinturón de dolomitas en la Formación Capadare entre Sanare y Cerro Misión. El espesor de la Formación Capadare sobrepasa los 135 m."

2.3.3. Geología económica

Antes de abordar el tema referente al cálculo de reservas se presentaran algunos conceptos básicos que tienen que ver con yacimientos minerales.

- **Yacimiento mineral:** es la concentración de una o más sustancias útiles, rodeada de materiales no aprovechables y que se encuentra distribuida de forma escasa en la corteza terrestre.
- **Mena:** es el mineral cuya explotación presenta interés.
- **Ganga:** comprende a los minerales que acompañan a la mena, pero que no presentan interés minero en el momento de la explotación.
- **Recurso mineral:** son los elementos de la corteza terrestre susceptibles de ser utilizados.
- **Reservas:** cantidad (masa o volumen) de mineral susceptible de ser explotado. Depende de un gran número de factores: ley media, ley de corte, y de las condiciones técnicas, medioambientales y de mercado existentes en el momento de llevar a cabo la explotación.
- **Ley de corte o cut-off:** es la concentración mínima que debe tener un elemento en un yacimiento para ser explotable, es decir, la concentración que hace posible pagar los costes de su extracción, tratamiento y comercialización.
- **Todo uno:** mezcla de ganga y mena que se extrae de la mina o cantera, con un contenido o ley determinado, que hay que saber previamente (investigación de pre-explotación) y confirmar tras la explotación.
- **Todo uno marginal:** es aquel producto de la explotación que tiene contenidos ligeramente por debajo de la ley de corte, y que no se suele acumular conjuntamente con el estéril, o bien para procesar mediante tratamientos de bajo coste, o en previsión de que los precios del producto suban y puedan aprovecharse como reservas.

- **Estéril:** corresponde a las rocas que no contienen mineral o lo contienen en cantidades muy por debajo de la ley de corte. No suele corresponder con la ganga, que como se indica antes, son los minerales acompañantes de la mena.
- **Explotación minera:** es el proceso o conjunto de procesos por el cual o cuales extraemos un material natural terrestre del que podemos obtener un beneficio económico: puede ser desde agua, hasta diamantes, por ejemplo. Se lleva a cabo mediante pozos (caso del agua o del petróleo, entre otros), en minas, subterráneas o a cielo abierto, o en canteras.
- **Erosión:** es el proceso por el cual las rocas de la superficie de la Tierra, en contacto con la atmósfera y la hidrosfera, se rompen en fragmentos y sufren transformaciones físicas y químicas, que dan origen a fragmentos o clastos, y a sales, fundamentalmente. Las transformaciones que implica la erosión pueden dar lugar a yacimientos, que reciben el nombre de yacimientos residuales.
- **Transporte:** es el proceso de arrastre de los clastos por las aguas y el viento, y de las sales por el agua, modifica la composición química tanto del área que sufre la erosión como del área a la que van a parar estos productos. Además, durante el propio transporte se producen procesos de cambio físicos y químicos, nuevas erosiones, depósito de parte de la carga transportada, etc.
- **La sedimentación detrítica** da origen a rocas como las areniscas, y a minerales que podemos encontrar concentrados en éstas, en los yacimientos denominados de tipo placer: oro, casiterita, gemas...
- **La sedimentación química** da origen a rocas de interés industrial, como las calizas, y a minerales industriales, como el yeso o las sales, fundamentalmente.
- **La sedimentación orgánica** origina las rocas y minerales energéticos: carbón e hidrocarburos sólidos (bitúmenes, asfaltos), líquidos (petróleo) y gaseosos (gas natural). También origina otras rocas y minerales de interés industrial, como las fosforitas, o las diatomitas, entre otras.

2.3.3.1. Programa de evaluación de reservas del Yacimiento de Riecito

Los trabajos realizados por la Dirección de Geología comenzaron a fines de 1965 y finalizaron en diciembre de 1967. El programa básico se dirigió a establecer las reservas fosfáticas y su tenor mediante reconocimiento geológico de superficie y perforaciones, análisis de muestras, calculo de reservas y elaboración del material cartográfico. A continuación se presenta un resumen de los trabajos realizados.

- **Topografía**

Levantamiento de unas 150 Has, de las cuales 41,7 integran el área de los sondeos para el calculo de reservas del mineral fosfático. Se realizaron mapas topográficos a escalas 1:2500 y 1:1000, mapas isópacos, mapas isógrados, perfiles topográficos y levantamientos de carreteras, quebradas y picas.

- **Perforaciones**

En la zona en estudio se realizaron un total de 81 perforaciones a intervalos de 100 m y se perforo un total de 3.798,86 m. De estos sondeos se seleccionaron 66 que mostraron material fosfático de valor económico. También se realizaron calicatas y pozos que arrojaron buenos tenores de fosfato.

- **Geología**

Se realizo un levantamiento de los contactos geológicos de la roca fosfática, una descripción de 98 columnas estratigráficas correspondientes a 81 sondeos, 12 calicatas y 5 pozos. Se replantearon y abrieron las calicatas y pozos necesarios para el cálculo de reservas.

- **Análisis químico**

Para los análisis se tomaron un total de 1.539 muestras que fueron estudiadas por los Laboratorios del Instituto Venezolano de Petroquímica en Morón y del Centro de Evaluaciones del Ministerio de Minas e Hidrocarburos en Caracas.

- **Calculo de reservas**

Para el cálculo de reservas que se presenta se utilizó la información de los análisis químicos, los sondeos, pozos y calicatas y se dividió el yacimiento en tres bloques, a saber “A”, “B” y “C”, y los cálculos se realizaron por el método de los triángulos.

A lo largo de la explotación de la Mina de Riecito se han realizado diversos estudios para determinar las reservas existentes en el yacimiento. Como se mencionó anteriormente, las reservas fosfáticas se ubican en los bloques identificados como A, B y C. En 1982, PDVSA contrató un estudio a la empresa ENADIMSA para actualizar la información disponible sobre las reservas geológicas y las económicamente explotables, cuyos resultados fueron los siguientes (tablas 3.1 y 3.2):

Tabla 3.1 Reservas geológicas (ENADIMSA, 1982)

BLOQUE	RESERVAS (tn)	% P ₂ O ₅	%SiO ₂	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃
A	2.389.644	27,55	22,00	3,51
B	10.739.306	28,55	19,81	3,34
C	6.086.990	28,96	17,64	3,93
Total:	19.215.940 ton			

(Fuente: INGEOMIN, 2005)

Tabla 3.2. Reservas económicamente explotables (ENADIMSA, 1982).

BLOQUE	RESERVAS (tn)	% P ₂ O ₅	%SiO ₂	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃
A	1.865.000	27,05	26,12	3,51
B	9.071.000	29,24	21,17	3,54
C	5.105.000	24,97	20,52	3,93
Total:	16.041.000 tn (83,48 %)			

(Fuente: INGEOMIN, 2005)

En 1995, Jacobbs realizó un estudio sobre las reservas geológicas en la mina de Riecito que dio los siguientes resultados (tabla 3.3):

Tabla 3.3 Reservas económicamente explotables (Jacobbs, 1995).

BLOQUE	RESERVAS (tn)	% P ₂ O ₅	%SiO ₂	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	
A	1.492.000	26,69	24,97	1,66	2,20
B	9.097.000	27,60	20,08	1,54	1,68
C	6.026.000	26,51	18,89	1,53	1,59
Total: 16.615.000 tn					

(Fuente: Pequiven, 2005)

Posteriormente en el año de 1997, James Spalding realizo un estudio acerca de las reservas geológicas del yacimiento de Riecito, el cual dio como resultado lo siguiente:

Tabla 3.4 Reservas económicamente explotables (Spalding, 1997).

BLOQUE	RESERVAS (tn)	% P ₂ O ₅ (Ponderado)	%SiO ₂	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	
A	1.018.000	26,69	26,58	1,71	2,24
B	7.349.000	27,80	20,05	1,54	1,68
C	3.857.000	27,06	18,59	1,25	1,69
Total: 12.224.000 tn					

(Fuente: Spalding, 1997)

2.4. DESARROLLO MINERO

2.4.1. División del yacimiento

En la Figura 2.4 se observa la división del yacimiento de Riecito en bloques, de los cuales, los bloques A y B han sido intervenidos desde el inicio de la explotación. El primero está prácticamente agotado, mientras que el bloque B, cuyas reservas actuales se sitúan en 4.139.787 tn, se extraen a razón de 390.000 tn/año. El bloque C esta todavía sin intervenir y se estima que en el se encuentran unas 5.105.000 tn de fosfato.

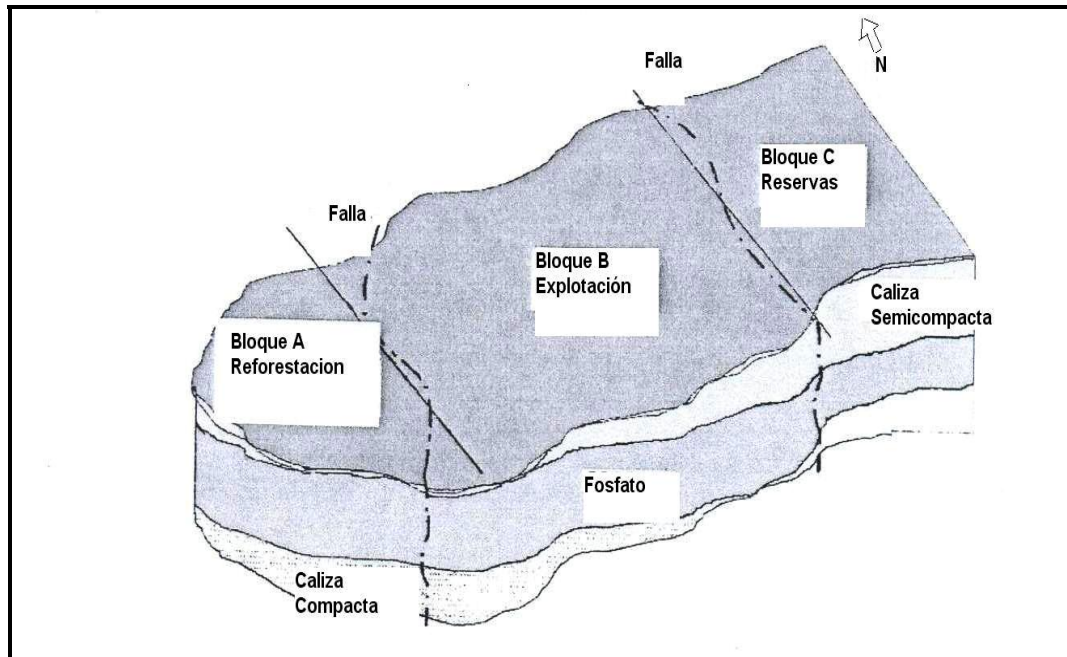


Figura 2.4 División del depósito de fosfato de la Mina Riecito.

(Fuente: INGEOMIN)

El bloque B está dividido en tres frentes de trabajo, bajo el criterio de la variación de P_2O_5 : sector B-oeste (27 % de P_2O_5), el sector B-central (29 % de P_2O_5), y el sector B-este (> 32 % de P_2O_5).

2.4.2. Sistema de explotación

El yacimiento se ha venido explotando por el método de minería a cielo abierto mediante bancos descendentes de 6 metros de altura, bermas de 12 metros de ancho y taludes con inclinación entre un rango de 30° a 45°, dependiendo de la competencia de la roca fosfática. En el sector sur, el avance se realiza en el sentido del buzamiento, (15° al sur), mientras que en el sector norte, el avance es en contra del buzamiento. En la figura 2.5 se aprecia el diseño de bancos que se realizan en las operaciones.

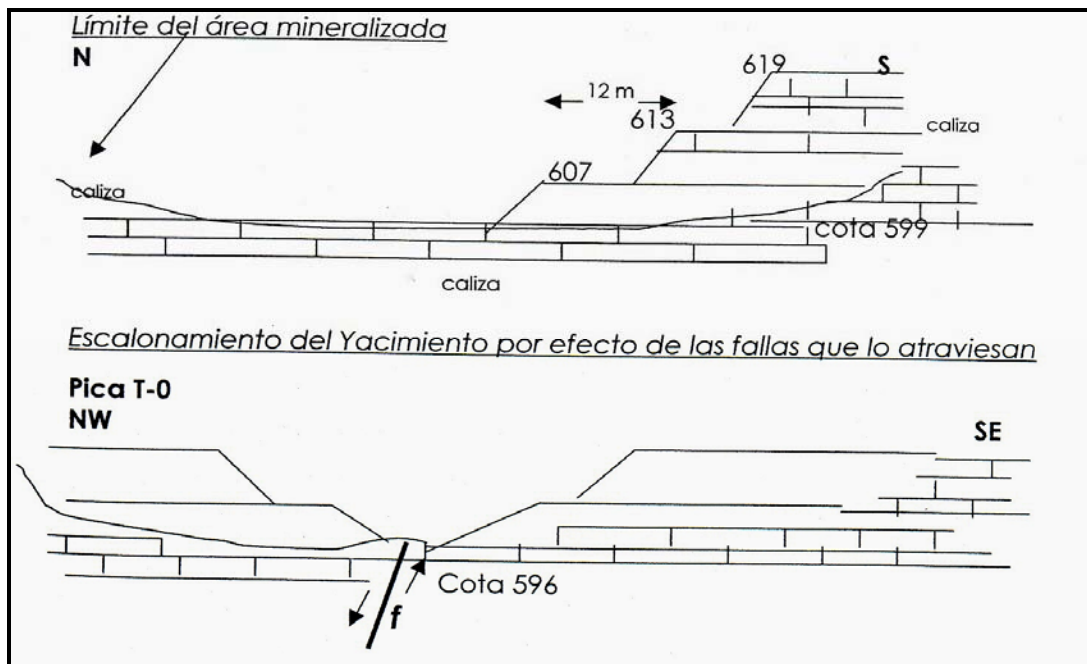


Figura 2.5 Diseño de bancos de explotación de la Mina Riccito.

(Fuente: INGEOMIN)

2.4.3. Descripción de la explotación

La remoción de la roca fosfática se realizará mediante tractores CAT-D10 R y CAT-D9 T, con escarificador, mientras que para la carga se utilizarán cargadores frontales CAT-988 B. En el acarreo, tanto de mineral como de estéril, se utilizarán camiones CAT-773 B con capacidad de 50 tn.

Debido a la existencia de sectores con calidades diferentes se hace necesario realizar la mezcla de materiales sólidos, para lograr que el mineral que entra a la planta de

fragmentación promedie 27 % P_2O_5 . Este criterio tiene su basamento en que se deberán desarrollar frentes de explotación en paralelo, en el área de bajo tenor y en la zona de alto tenor, para posteriormente realizar la mezcla hasta lograr la calidad requerida en la planta.

La secuencia del ciclo de explotación que interrelaciona las diferentes fases del proceso permite determinar un sistema discontinuo en las operaciones de producción, es decir: arranque + carga + transporte, se realiza en fases separadas es decir, primero se realiza el arranque y la dosificación, y posteriormente el proceso de carga + transporte, completa la secuencia de producción.

2.4.3.1 Ciclo de trabajo para el equipo de carga y acarreo

Una vez lograda la dosificación del mineral, mediante la combinación de volúmenes previamente establecidos según criterio técnico, y fundamentada en los resultados de los análisis químicos de las muestras obtenidas de los frentes de explotación, el cargador frontal CAT-988 B con 5,6 m³ de capacidad de pala, realiza el llenado de la tolva de los camiones CAT-773 B en 5 minutos, luego, éste se traslada hasta la planta de trituración, distante unos 4 minutos y regresa al frente en los siguientes 3 minutos, completando el ciclo en 12 minutos. Tomando en cuenta que el camión roquero puede realizar el máximo de 5 viajes a la Planta de Trituración en una hora, la misma debería procesar un máximo de 250 tn/h, pero realmente, su capacidad operativa se ha establecido en 220 tn/h.

2.4.4. Programa de perforación y voladuras

Como se menciona anteriormente, el arranque tanto del material estéril como del mineral se realiza por el método mecánico. Pero existen zonas donde no es posible el arranque mecánico debido a que la roca es muy dura y los tractores no pueden romperla. Por lo tanto, se hace necesario el empleo de explosivos. El Patrón de Voladuras se realiza para cada año dependiendo de los requerimientos de roca a ser volada.

2.4.4.1 Característica de la roca

Existen varios factores a considerar como son:

- **Resistencia de la roca**

Se trata de roca caliza de mediana resistencia.

- **Estructura de la roca**

La roca caliza presenta discontinuidades y cavernas, induciendo que la carga específica a considerar debe ser aquella determinada en el campo.

- **Disponibilidad del equipo**

Perforadora Atlas Copco, modelo ROC 742 HC Diámetro del barreno: 2 ½"
(64 mm)

- **Abrasividad del medio**

Está en función de la composición mineralógica del medio, sin embargo la presencia de cuarzo determina el grado de abrasividad.

2.4.4.2 Patrón de voladura

Parámetros del Patrón de Voladura:

- Retiro = 2 m
- Espaciamiento = 3,00 m
- Carga Lineal de Fondo = 5 Kg
- Sobreperforación = 0,9 m
- Profundidad del barreno = 6 m
- Retacado = 1.5 m
- Carga de columna = 2,4 Kg
- Carga de fondo = 7,5 Kg

2.5. Producción de roca fosfática (mensual y anual)

Siendo la jornada de trabajo de 9 horas diarias y aplicando criterios de eficiencia a los operadores de maquinarias pesadas, se tiene que un buen rendimiento se logra con un 90 por ciento, es decir que de las 9 horas serán efectivas 8,1 horas lo que implica una producción diaria de 1.782 tn.

Ahora bien, la meta de producción sería realmente de 1.653 tn/día, la cual se logra con 4 viajes/hora del camión roquero que, trabajando 26 días produciría 43.000 tn/mes. Al cabo de diez (10) meses, período de extracción de fosfato en la mina Riecito, producirá hasta 430.000 tn, que esta por encima de la meta anual establecida para la mina en 400.000 tn.

2.6. Producción de estéril (mensual y anual)

A objeto de liberar la veta fosfática, es necesario remover el recubrimiento de caliza. La remoción de estéril se efectúa por etapas, acorde con la programación establecida en el los planes quinquenales.

La densidad del estéril en banco es de 2,2 tn/m³ y tiene un factor de esponjamiento volumétrico de 1,20.

El material estéril que se extrae es trasladado a la escombrera del bloque B, ubicada en la coordenada E-523.718 y N-1.204.852, la cual dista unos 1.000 m del primer frente de extracción, mientras que el segundo y tercer frente se ubican a 700 metros aproximadamente.

2.7. Planta de trituración

La planta de trituración esta ubicada en la parte este del bloque “B”, a unos 600 metros de los frentes de explotación actuales. La misma se ajusta a los requerimientos de roca fosfática exigidos por las plantas del Complejo Petroquímico Morón, unas 400.000 tn/año.

2.7.1. Descripción del proceso

Una vez extraído el fosfato, según los procedimientos indicados en el Plan Anual de Explotación, éste es llevado por camiones roqueros a la tolva de recepción. La instalación está diseñada para producir roca fosfática a un tamaño igual o menor a 1,27 cm (1/2") a una rata de 250 tn/h (figura 2.6).

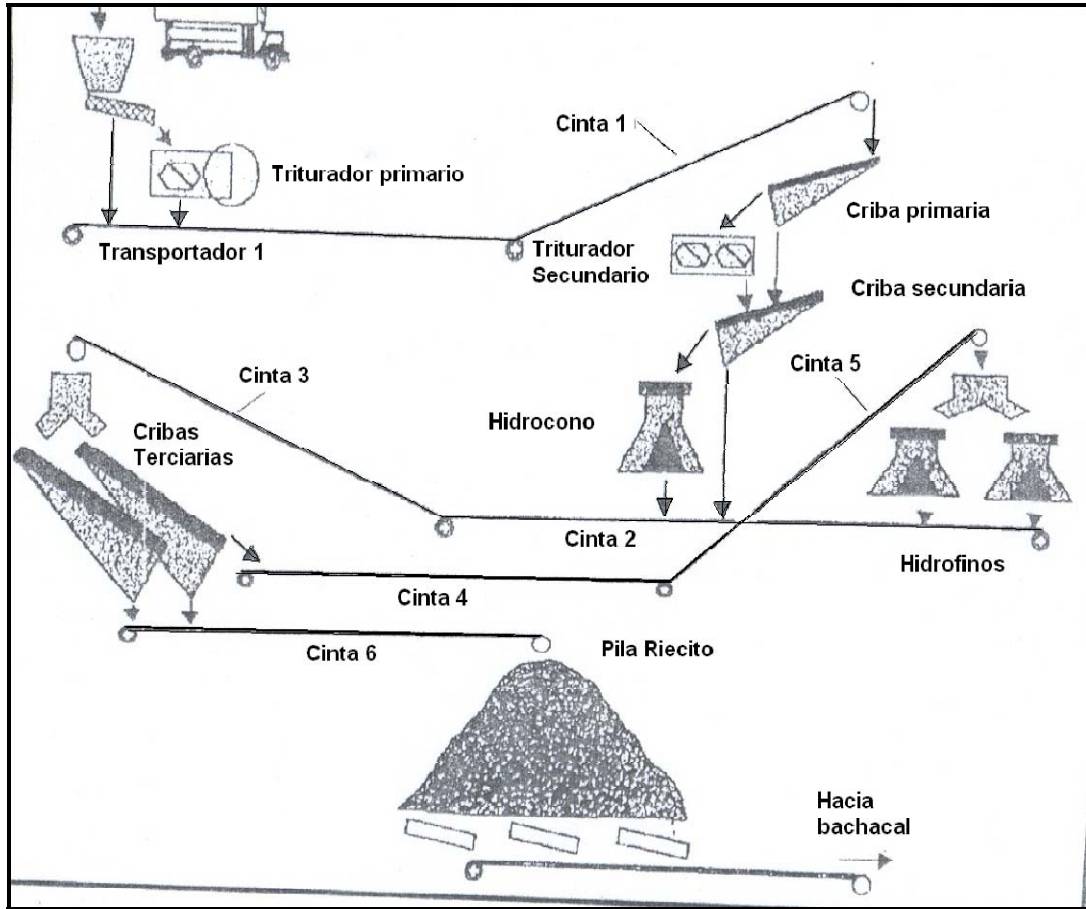


Figura 2.6 Diagrama de planta de trituración de la Mina Riecito

(Fuente: INGEOMIN)

2.7.2. Trituración primaria

En esta etapa se recibe el todouno de la mina, con un tamaño máximo de 101,6 cm (40"), el cual es descargado en la tolva de recepción con capacidad de 80 tn. La roca fosfática pasa por gravedad al alimentador vibratorio donde se separa: la roca menor

de 10,2 cm (4") pasa directamente a la correa transportadora 01, al cribado final, y la fracción entre 10,2 cm (4") y 101,6 cm (40") es recirculado al triturador de mandíbula primario, donde es reducido de tamaño y cuyo producto menor de 25,4 cm (10") es descargado en el transportador 01.

2.7.3. Trituración secundaria

La criba recibe el mineral de la cinta 01 y lo clasifica en tamaño, menor de 10,2 cm (4"), que va directamente a la criba secundaria y la fracción entre 10,2 cm (4") y 25,4 cm (10"), es descargada al triturador de mandíbula secundario donde el mineral es triturado a un tamaño igual o menor a 9 cm (3,5"). El producto resultante es descargado sobre la criba secundaria, donde el mineral es clasificado en menor de 3,8 cm (1,5"), que va directamente a la cinta 02 y mayor de 3,8 cm (1,5") descargado en el triturador terciario.

2.7.4. Trituración terciaria

En esta etapa, la roca fosfática entre 3,8 cm (1,5") y 9 cm (3,5") es reducida a 4 cm (1 5/8") en el triturador de cono terciario y el producto es descargado en la cinta 02 para ser llevado a la sección de cribado final.

2.7.5. Cribado final

Esta sección consta de dos cribas que clasifican el mineral de la siguiente manera: la roca de tamaño menor o igual a 1,27 cm (1/2") es descargada en el transportador 06 para ser llevado a la pila de almacenamiento; la roca mayor a 1,27 cm (1/2") y 4 cm (1 5/8") se descarga en las cintas 03 y 04 para ser llevada a la tolva de los trituradores cuaternarios para ser reciclado.

2.7.6. Trituración cuaternaria

En esta etapa, se dispone de dos trituradoras de cono tipo Hidrofino, que reducen la roca de 4 cm (1 5/8") a 1,9 cm (3/4"). Estos se descargan en la cinta 05 que a su vez

descarga en la cinta 02 para cerrar el reciclado del mineral. De esta manera se cierra el ciclo de trituración de mineral, por lo cual se deduce que el producto final que se enviara a Morón es menor a 1,27 cm (1/2").

2.7.7. Sistema de cintas transportadas descendentes

La pila de almacenamiento de la planta de trituración, tiene capacidad para 25.000 tn aproximadamente. Dicho mineral es transportado por cintas transportadas descendentes, y depositado en la estación de despacho en Bachacal, en una pila adyacente, la cual cumple con las exigencias de calidad y granulometría de la planta de fertilizantes.

El sistema esta compuesto por seis cintas transportadas. El recorrido de la cinta está dividido en cinco tramos de correas rectas que están interconectadas por estaciones de transferencias donde el mineral es descargado en una tolva que a su vez lo dosifica para el tramo siguiente.

Todo el trayecto de la cinta está cubierto con un techo de aluminio ondulado a dos aguas. El trazado de la cinta salva una diferencia de cota de 467 metros.

2.8. Sistema de despacho a Morón

El mineral proveniente de la planta de trituración y transportado por cintas transportadas descendentes, es depositado en una pila de almacenamiento. La instalación está diseñada para solicitar el mineral en forma automática desde la pila mediante un túnel-conveyor y entregarla a un sistema de cintas, desviadores y boquillas, ubicadas en cinco torres, desde donde se realiza la carga de los vagones. Generalmente se realizan hasta 2 viajes por día al Complejo de Morón, a una distancia de 90 km, arrastrada por una locomotora.

2.9. Equipos y maquinarias pesadas

- **Tractores**

Tractor CAT-D 10-R

Tractor CAT - D8L-2

- **Cargadores frontales**

Cargador CAT-988 B1

Cargador CAT-988 B2

Cargador CAT-988 B3

Cargador CAT-966 D

Cargador CAT-955 H

Mini-cargador (BOB-CAT)

- **Camiones**

Camión Roquero CR-6 (CAT-773 B1)

Camión Roquero CR-7 (CAT-773 B2)

Camión Roquero CR-8 (CAT-773 B3)

Camión UNIMOG (MERCEDEZ BENZ)

Camión cisterna (Kodiak)

Camión MITSUBISHI

- **Otros equipos**

Compresor (SULLAIR 185)

Moto niveladora (CAT-12 E)

Perforadora Atlas Copco (ROC-742 HC)

Planta de soldar (LINCOLN-SAE-400)

Hidrojet (AQUATEC)

Torre de iluminación (INGERSOLL RAND)

Planta eléctrica (CAT- OLIMPIA)

Montacargas (CAT- R-80)

Grúa (GROVE)

CAPITULO III

MARCO TEORICO

3.1. GENERALIDADES DE LAS ESCOMBRERAS

3.1.1. Escombrera

Se denomina escombrera a toda aquella acumulación de materiales sólidos de granulometría variable procedentes de las actividades humanas, bien como residuos de los procesos mineros (estériles rocosos) o de otros procesos industriales o urbanos (escombros de demolición, tierras de vaciado, etc.), figura 3.1.

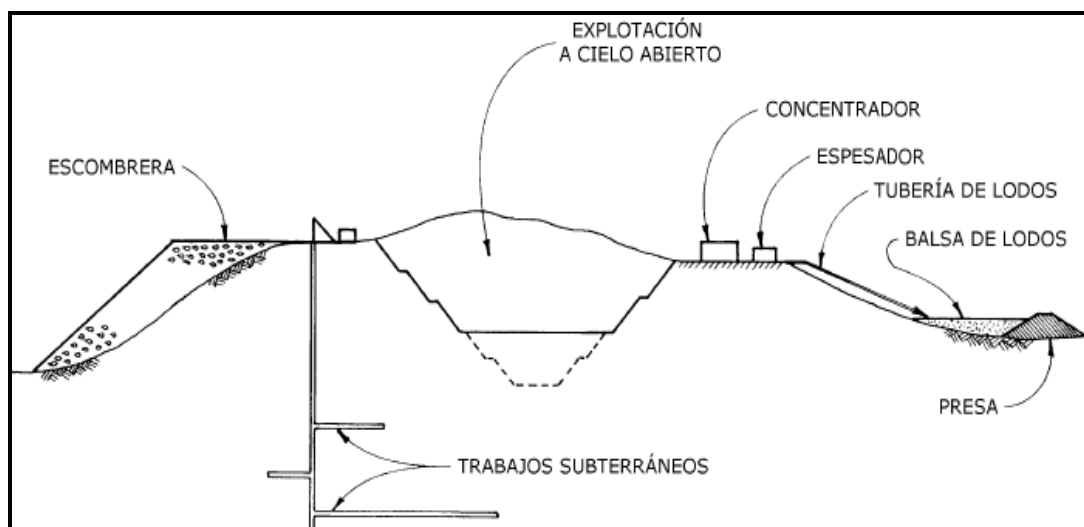


Figura 3.1 Labores mineras que generan estériles y sistemas de deposición
(Junta de Andalucía, 2003)

Tradicionalmente, la forma de implantar las escombreras se ha realizado buscando la facilidad de transporte y ocupación de terrenos sin un plan previo de desarrollo. Aunque, en líneas generales, este proceder ha dado resultados aceptables, en algunos casos se han producido accidentes importantes y en otros un impacto ambiental

excesivo, lo que hace aconsejable disponer de unas normas de buena práctica y unos criterios de ejecución y control para futuras implantaciones.

3.1.2. Estudio y descripción de las escombreras

Los depósitos de estériles se pueden describir atendiendo, normalmente, a los siguientes criterios:

- **Por sus dimensiones**

Se considera escombrera cualquier acumulación de materiales que sobrepase los 25 000 m³ de volumen, los 15 m de diferencia de altura entre su pie y la parte superior del depósito, o bien cuyo espesor de estéril sea superior a 10 m. En condiciones normales de homogeneidad y humedad del material, se dividen en:

- ❖ Grandes. Aquellas cuya altura sea superior a 30 m.
- ❖ Medianas. Aquellas cuya altura sea superior a 20 m e inferior a 30 m.
- ❖ Pequeñas. Aquellas cuya altura sea superior a 15 m e inferior a 20 m.

- **Por su emplazamiento**

- ❖ De valle o cauce.
- ❖ De ladera. Situadas sobre pendientes con inclinaciones de hasta el 8 %.
- ❖ De divisoria.
- ❖ En llanura o exenta.
- ❖ De relleno de corta o hueco minero.

- **Por el tipo o sistema de vertido**

- ❖ De vertido libre o por gravedad. En general, no reglamentario, excepto en el caso de escombreras de pequeñas dimensiones o en el interior de minas activas siempre y cuando no exista riesgo de deslizamiento o inestabilidad.
- ❖ De vertido libre por fases adosadas. Método más recomendable debido a su mayor estabilidad.

- ❖ Escombreras con dique de retención en pie o tacón de escollera. Recomendable cuando los estériles a verter presentan diferentes litologías
- ❖ De vertido por fases ascendentes compactadas y superpuestas. Implican capas horizontales compactadas.
- ❖ Estructuras mixtas. Aquellas que combinan algunos de los métodos anteriores.

- **Por el método constructivo**

- ❖ Por basculamiento final. Da lugar a franjas de material inclinadas de acuerdo con el ángulo de rozamiento interno del mismo.
- ❖ Por capas horizontales compactadas. Método más general y recomendable debido a su mayor estabilidad.

- **Por su grado de riesgo potencial, estabilidad y coeficiente de seguridad**

Debido a su posible deslizamiento, se dividen en:

- ❖ Clasificación por riesgo (Tipo A):
 - Escombreras Tipo AI. Sin riesgos para personas, bienes, etc.
 - Escombreras Tipo AII. Presentan riesgo moderado para personas, bienes, etc.
 - Escombreras Tipo AIII. Presentan un riesgo elevado para personas, bienes, etc.
- ❖ Clasificación por seguridad ligada a la presencia de agua y problemas del cimientto (Tipo B):
 - Escombreras normales (Tipo BI). Sin efecto de aguas freáticas y en cuya estabilidad no interviene el cimientto.

- Escombreras sometidas a filtración (Tipo BII). Agua en grietas o fisuras y riesgo de deslizamiento por la cimentación.
- Escombreras en situación de inundación, inestabilidad por riesgo sísmico, etc. (Tipo BIII).

3.2. DESCRIPCION DE LOS ESTERILES MINEROS Y SUS PROPIEDADES

3.2.1. Clases de estériles mineros

Una descripción básica de los estériles mineros debe incluir una descripción de cada tipo de roca y el porcentaje contenido de cada uno de ellos.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las propiedades físicas y químicas de los materiales vertidos en las escombreras, así como del tipo de ensayo a efectuar.

Tabla 3.1 Propiedades de los estériles mineros y ensayos a realizar.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACION	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN: <ul style="list-style-type: none"> • Litología • Composición • Microestructura • Forma de las partículas 	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Durabilidad • Correlación entre resistencia intacta y al corte 	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción en campo • Clasificación preliminar • Sondeos con recuperación de testigos 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis microscópico • Clasificación detallada
GRANULOMETRÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Correlación entre resistencia y conductividad hidráulica 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación visual • Examen en campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cribado • Medida de la humedad (hidrómetro)

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACION	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
PLASTICIDAD DE LOS FINOS	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Correlación con la resistencia al corte • Índice del contenido de arcilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia seca, dilatación y dureza 	<ul style="list-style-type: none"> • Límite de Atterberg en finos
RESISTENCIA INTACTA	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad • Correlación con la resistencia al corte 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de carga puntual • Dureza en campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo triaxial • Ensayo de compresión simple
RESISTENCIA AL CORTE	<ul style="list-style-type: none"> • Criterio de rotura • Estabilidad de escombreras 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de corte en campo • Ángulo de reposo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de corte directo o triaxial
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de hinchamiento • Durabilidad • Microestructura • Clasificación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de acidez para carbonatos 	<ul style="list-style-type: none"> • Difracción de R-X • Límite de Atterberg en finos
DURABILIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la conductividad hidráulica • Duración en firmes y base 	<ul style="list-style-type: none"> • Meteorización de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad al desmenuzarse • Ensayos de abrasión

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACION	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
	de cimentación <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la resistencia al corte 		
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación de la infiltración • Predicción de las condiciones piezométricas • Cálculo del drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Correlación basada en la granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Compactación y permeabilidad
CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al corte • Consolidación y asentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso unitario a partir del esponjamiento 	
GEOQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto medio-ambiental • Riesgo por lixiviación de metales pesados. • Adsorción • Drenajes ácidos. • Neutralización 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de surgencias de agua • Medida del pH en flujos de agua, conductividad, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación en columna • Celdas de humedad • Medida de la acidez • Ensayos para determinar contaminantes

(Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007).

3.2.2. Propiedades de los estériles mineros

3.2.2.1. Granulometría

La granulometría de los estériles tiene una influencia directa sobre la permeabilidad y la resistencia al corte. Por lo general, los materiales gruesos con pocos finos (menos del 10% de Malla 200) tienen buena resistencia y alta conductividad hidráulica.

El tamaño de los estériles de las escombreras depende de una serie de factores como: litología, dureza, discontinuidades del macizo rocoso, técnica de arranque y/o voladura, manipulación y transporte, método de vertido, etc.

Cuando el porcentaje de finos es superior al 10%, éstos controlan o tienen gran influencia sobre las propiedades de los materiales vertidos en la escombrera (resistencia al corte, conductividad hidráulica, grado de oxidación, formación de aguas ácidas, etc.).

La granulometría está muy relacionada con el fenómeno de la segregación, producido cuando los estériles transportados con camión o pala se vierten en la cresta del talud. Es muy habitual utilizar la fracción gruesa generada en la segregación natural, y que se acumula en el pie del talud, como método de drenaje del agua de las escombreras.

En general, en la segregación que se produce en un talud se pueden distinguir tres zonas:

- La concentración de finos en la cresta del talud.
- Una distribución uniforme de material de tamaño intermedio en el resto del talud hasta el pie.
- Una amplia dispersión de material grueso que se extiende más allá del pie del talud.

Internamente, la escombrera está compuesta de una serie de capas paralelas a la cara de vertido donde, alternativamente, se suceden las compuestas por granos finos y las de granos gruesos.

La altura del talud prácticamente no influye en la distribución granulométrica de la segregación. Por otro lado, la construcción en capas relativamente finas produce un depósito más homogéneo. En ciertos casos, pueden ser necesarias unas capas especiales de drenaje para evitar la saturación de los materiales.

También se puede distinguir entre los efectos que se producen en la segregación al realizarse un vertido por empuje (tractor) de un vertido desde una cierta altura (volquete, pala cargadora). En el primer caso disminuye la segregación de finos en la zona alta del talud, pero las partículas gruesas se siguen acumulando en el pie, disminuyendo, en general, la cantidad de material segregado

En cuanto a la hidrogeología de una escombrera donde se haya producido segregación, destaca el fenómeno de que los finos acumulados en la zona alta del talud impiden el paso de agua, produciéndose infiltraciones a lo largo del propio talud de la escombrera, por lo que un correcto drenaje del pie de la misma favorece la estabilidad.

3.2.2.2. Plasticidad de los finos

Si aparece una cantidad considerable de componentes de tamaño limo o menor en los estériles, se deberán determinar los Límites de Atterberg (Límite líquido y Límite plástico) en laboratorio. La plasticidad de los finos puede tener un impacto sobre las características de resistencia al corte del material, y debe ser indicativa del tipo de minerales arcillosos contenidos en él. Los Límites de Atterberg también se determinarán en rocas sedimentarias de tamaño fino mediante desagregación mecánica.

3.2.2.3. Resistencia intacta

La resistencia de los fragmentos de roca intactos influye en la durabilidad y resistencia al corte de los materiales de la escombrera

En investigaciones preliminares de escombreras pequeñas, donde los estériles están sometidos a esfuerzos relativamente bajos (menores de un 25-50 % de la resistencia a

compresión de la roca intacta), o donde los estériles sean muy resistentes, la resistencia intacta se conocerá a partir de relaciones empíricas dependiendo del tipo de roca, por ensayos de dureza en campo y con el índice de carga puntual en los testigos de perforación.

En escombreras grandes, donde los materiales de la escombrera están sometidos a esfuerzos relativamente altos o son frágiles, los esfuerzos entre partículas alcanzan o superan la resistencia intacta de la roca, produciéndose el aplastamiento y rotura de las partículas. En este caso, deben realizarse estudios más detallados de la resistencia intacta que consistirán en ensayos de compresión simple.

3.2.2.4. Resistencia al corte

Para conseguir un análisis y un diseño correctos, es fundamental tener un conocimiento de las características de resistencia al corte de los materiales de las escombreras. La resistencia efectiva al esfuerzo cortante de estos estériles depende de una amplia gama de parámetros interrelacionados, entre los que se incluyen la resistencia de la partícula intacta y resistencia anisotrópica, angulosidad de las partículas, granulometría, rugosidad de las superficies y propiedades de fricción, composición litológica, mineralogía y grado de saturación. En este sentido, la resistencia al corte puede variar con el tiempo debido a factores como la consolidación; oxidación; filtración y cambios químicos; además de deformaciones inducidas por los cimientos o reagrupamientos internos y migración de finos.

También está comprobado que la resistencia al corte es función de la tensión de confinamiento, proponiéndose varios modelos para materiales de relleno (Marshall, 1973; Barton, 1981; Hoek, 1983). Excepto en caso de producirse colapso que incluya la saturación de los estériles finos, es habitual suponer resistencias a fricción iguales o mayores que el ángulo de rozamiento interno.

En el análisis y diseño de las escombreras, se suele determinar la resistencia al corte de los materiales de éstas suponiendo el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb, sin cohesión y con un ángulo de rozamiento igual al ángulo de reposo natural de los

materiales de la escombrera. Dicho ángulo de reposo es fácil de averiguar en campo y su valor suele oscilar entre 35° y 40°. Esta teoría relativamente simple para la evaluación de la resistencia al corte se puede considerar válida para escombreras de pequeño a medio tamaño, donde las tensiones internas son bajas en comparación con la resistencia de la roca intacta. Además, se ajusta a los materiales de escombrera que contienen una cantidad limitada de finos (menor del 10%) y no estén sometidos a degradación.

Para escombreras más grandes y complejas, donde las tensiones internas son mayores, las deformaciones que aparecen debido a la consolidación y a los esfuerzos y ajustes internos son considerables y, además, aparece una proporción significativa de finos, por lo que se recomienda un mayor conocimiento de la resistencia al corte. En estos casos, se puede optar por varias teorías. Una de ellas sería adoptar suposiciones muy conservadoras de resistencia al corte, sin embargo, esto puede dar como resultado un diseño de la escombrera excesivamente conservador y poco económico.

Pueden realizarse ensayos de corte directo a gran escala o ensayos triaxiales de muestras representativas de los materiales de la escombrera. Las deformaciones halladas durante los ensayos deben ser suficientes para determinar la resistencia al corte tanto residual como de pico. Los resultados de los ensayos deben ser evaluados y se deberán elegir los parámetros de resistencia suficientemente conservadores para el estudio de la estabilidad a corto y largo plazo.

En los estudios anteriormente señalados de Barton y Kjaernsli (1981) se muestra que el valor de Φ' en estériles de mina puede ser cuantificado por la rugosidad equivalente, R , y por la resistencia equivalente, S , según la figura 3.2.

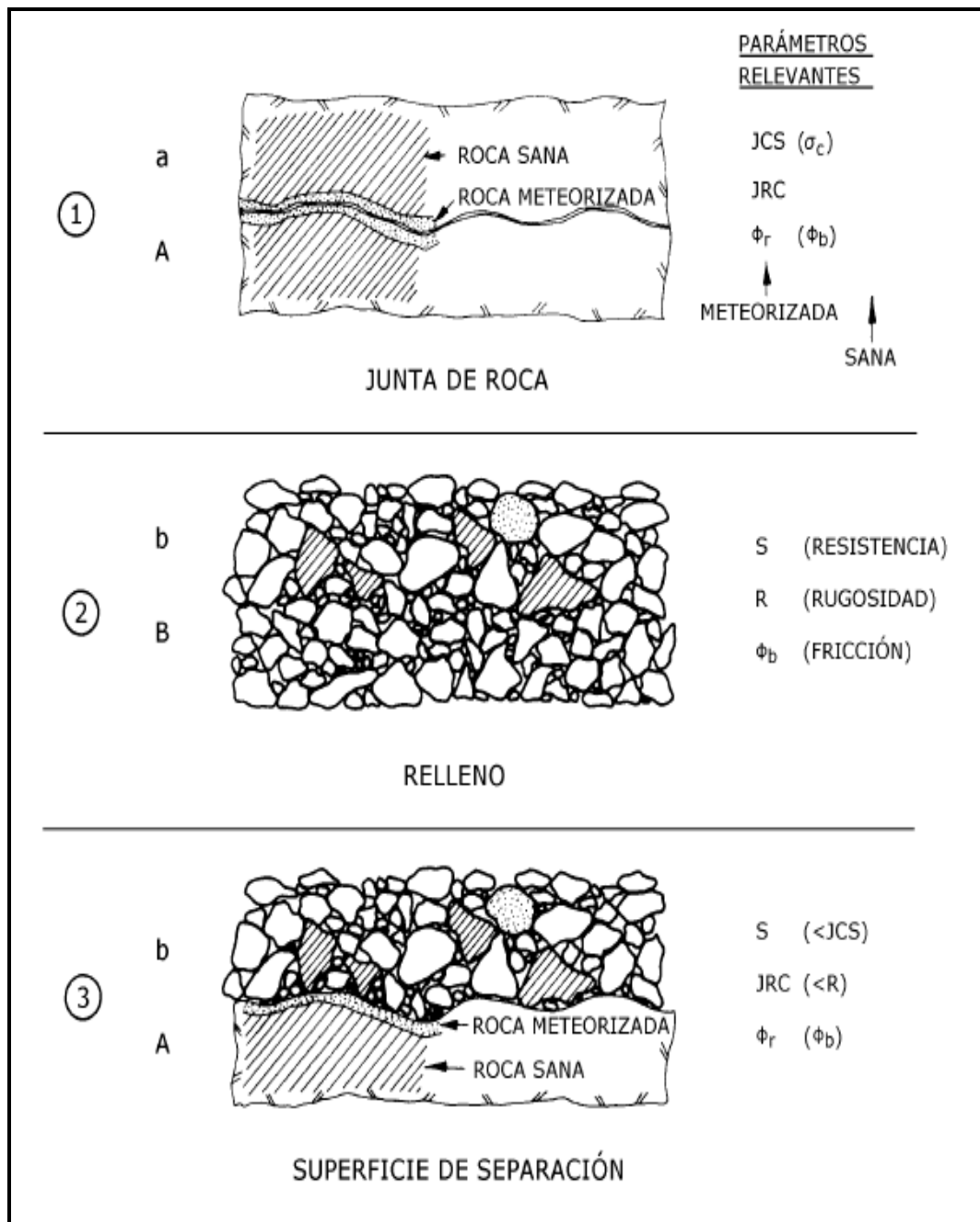


Figura 3.2 Análisis empírico para la estimación de la resistencia al corte de juntas de roca, estériles y contacto entre ambas.

Fuente: Junta de Andalucía, 2003

El valor de R depende de la porosidad del material y de la rugosidad y geometría de las partículas. La rugosidad equivalente, que es análoga al valor JRC de las juntas de roca, puede ser estimado utilizando la figura 3.3.

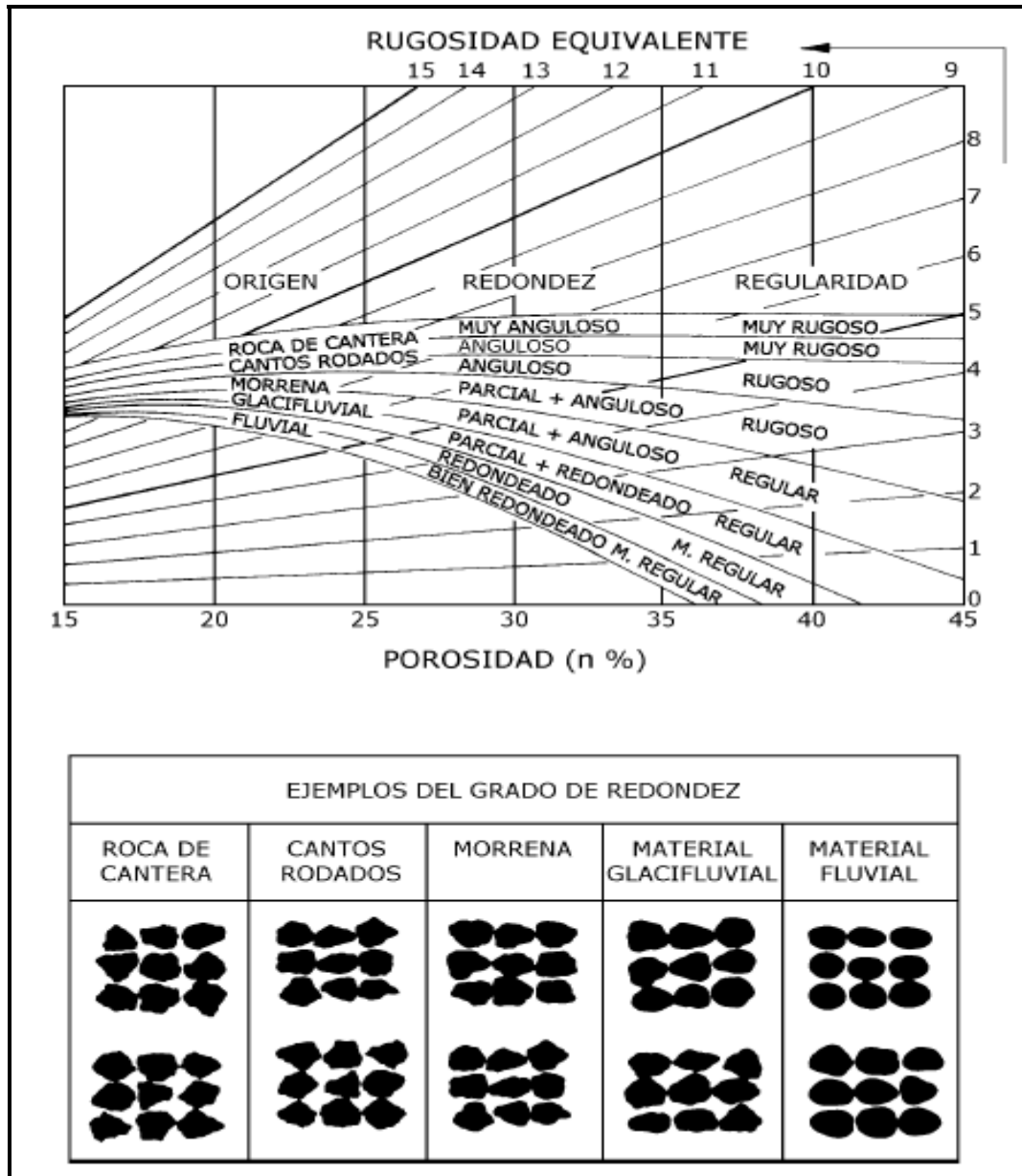


Figura 3.3 Método para estimar la rugosidad equivalente (R) de un estéril de mina.

Fuente: Junta de Andalucía, 2003

Un método empírico para la estimación de la resistencia equivalente de partículas de roca (S) aparece en la figura 3.4. Este parámetro es análogo al valor de compresión de juntas JCS y también depende de la escala.

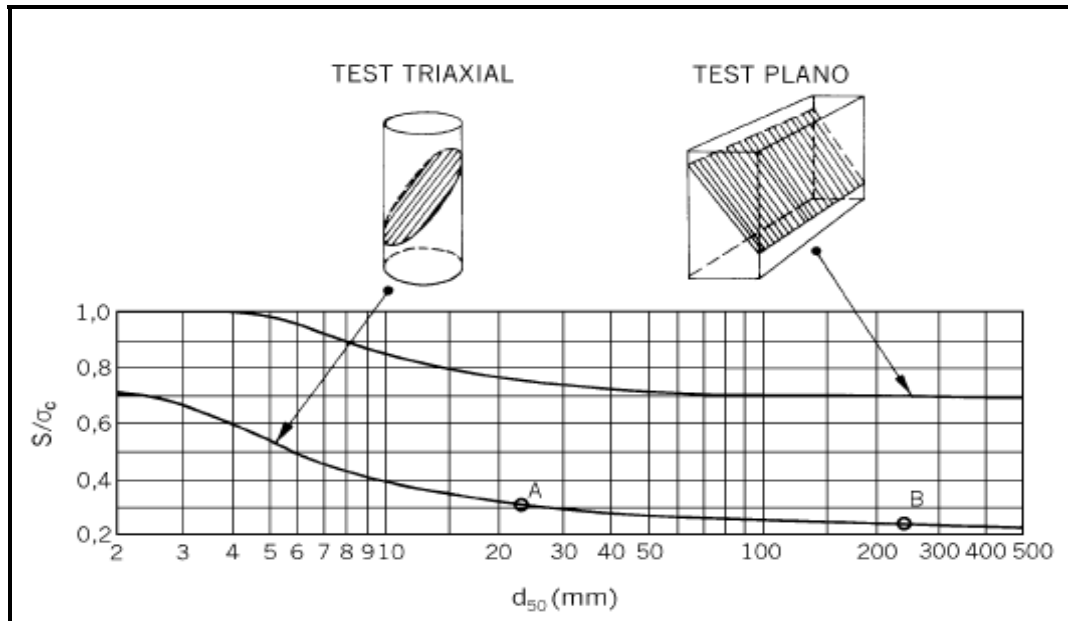


Figura 3.4 Método para estimar la resistencia equivalente (S) de un estéril de mina

Fuente: Junta de Andalucía, 2003

El ángulo de rozamiento interno efectivo en estériles se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$\Phi' = R \cdot \log (S/\sigma'_n) + \Phi_b$$

Se estudian los valores de Φ' al multiplicar los valores de las tensiones por 10, comenzando con un valor de 0,1 MPa. Este grado de dependencia de las tensiones se puede ampliar hasta cinco órdenes de magnitud.

3.2.2.5. Mineralogía y Petrografía

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o la aparición de hinchamientos, microgrietas y otras texturas, pueden influir en la durabilidad y resistencia de los materiales de la escombrera. Un conocimiento de la mineralogía y

petrografía de las rocas puede ayudar también en la clasificación y descripción de las mismas.

Se deben determinar los Límites de Atterberg para muestras desagregadas de rocas sedimentarias de grano fino u otras rocas que contengan minerales arcillosos, para ayudar a la identificación de los tipos de minerales que pueden estar presentes.

3.2.2.6. Durabilidad

La durabilidad y el potencial de degradación física y química de la roca influyen en la resistencia al corte a largo plazo y la conductividad hidráulica de la escombrera, así como en la circulación y filtración de los fluidos en la misma. Las características del desmoronamiento de las rocas son muy importantes en la exposición a sulfuros y en la generación de ácidos, así como en la estabilidad de la superficie de la escombrera, en relación al desplome y erosión. Además, la meteorización y el derrumbamiento mecánico de los materiales de la escombrera pueden ser acelerados por las condiciones de esfuerzo que aparecen en las grandes escombreras, por lo que se deben tener en cuenta.

El conocimiento cualitativo de la durabilidad debe estar basado en la meteorización observada, en la estanqueidad de las escombreras existentes, en los afloramientos de roca y en los testigos de sondeos. Si los conocimientos cualitativos indican que la roca puede ser susceptible de meteorización y degradación, deben realizarse ensayos de durabilidad y fisico-químicos en laboratorio, así como para los materiales de drenaje.

Los criterios de durabilidad dependen de las necesidades particulares del diseño. Los materiales más duros son apropiados para el drenaje y donde se necesite mantener sus características a largo plazo. La construcción de la escombrera en capas relativamente finas es recomendable para materiales blandos y suele estar controlada por la proporción de finos presente.

3.2.2.7. Conductividad hidráulica

Será necesario estimar la conductividad hidráulica de los materiales de la escombrera para los análisis de filtración y el conocimiento del drenaje interno. Asimismo, la conductividad hidráulica sirve para conocer las condiciones piezométricas en el interior de la escombrera que pueden conducir a la inestabilidad.

Las estimaciones preliminares de la conductividad hidráulica están, generalmente, basadas en correlaciones empíricas con la granulometría. Donde las escombreras contienen componentes con gran cantidad de finos o materiales propensos a la degradación, las estimaciones de conductividad hidráulica realizadas deben estar basadas en ensayos con permeámetros de compactación realizados en la fracción fina del material.

Las propiedades hidráulicas de los estériles son muy variables, apareciendo valores entre 10^{-2} m/s, para estériles ígneos y metamórficos, y 10^{-9} m/s para materiales arcillosos. La distinción entre estériles que se comportan como un suelo y como una roca señala una separación entre materiales de baja y alta permeabilidad, respectivamente.

3.2.2.8. Consolidación y asentamiento

Los procesos de consolidación y asentamiento que las escombreras sufren durante y después de su construcción, influyen en la densidad y en las características de resistencia al corte de los materiales de dichas estructuras. Dependiendo de las técnicas de construcción, las distintas zonas del interior de las escombreras pueden sufrir diferentes esfuerzos de compactación.

Las características de los asentamientos pueden variar, produciéndose asentamientos diferenciales en el tiempo y su consecuente rotura, la cual puede conducir a la rotura de la superficie de drenaje, terrenos de recubrimiento, etc., además de grandes infiltraciones en la escombrera.

Debido a la granulometría, frecuentemente gruesa de la mayoría de los estériles de mina, los ensayos de compactación en laboratorio son difíciles, y los resultados,

generalmente, no son representativos. Por eso, no se suelen realizar ensayos de compactación ni ensayos de densidad. Las estimaciones preliminares de la densidad de los materiales de la escombrera están, normalmente, basadas en factores de esponjamiento conocidos, tolerantes con la consolidación y los asentamientos. Los factores de esponjamiento se encuentran en un rango entre 1,2 y 1,5, dependiendo de los tipos de material, métodos de construcción de la escombrera, etc.

3.2.2.9. Características geoquímicas

Las propiedades geoquímicas de los estériles pueden tener un impacto medioambiental significativo. Las aguas subterráneas y superficiales que circulan a través y sobre los materiales pueden arrastrar elementos contaminantes, tales como metales pesados. Además, los problemas de acidez son muy frecuentes en algunas escombreras, principalmente de pirita.

La composición química de los estériles es muy variable según la explotación minera de que se trate, ya que no sólo depende de la naturaleza litológica de los propios materiales extraídos, sino también del método de tratamiento y vertido, de las condiciones climatológicas y de las reacciones de meteorización que se desarrollan dentro de los depósitos.

Muchos residuos mineros tienen en su composición metales que, aun estando presentes en pequeñas cantidades, son tóxicos para las plantas, el hombre y los animales, y el grado de contaminación producido por las aguas superficiales de escorrentía y lixiviados puede llegar a ser muy alto.

Los análisis químicos en laboratorio del material utilizado son necesarios para cumplir con los permisos pertinentes. Los ensayos normalmente utilizados son la columna de filtración y la determinación de ácido-base.

3.3. ELECCION Y PREPARACION DEL EMPLAZAMIENTO

3.3.1. Lugar del emplazamiento

En la elección del emplazamiento de una escombrera deben considerarse criterios de diversa naturaleza: técnicos, económicos, ambientales, socioeconómicos, etc.

Entre los criterios específicos más importantes se encuentran la distancia de transporte desde la explotación hasta la escombrera, que afecta al coste total de la operación; la capacidad de almacenamiento necesaria, que viene impuesta por el volumen de estériles a mover, las alternativas potenciales que pueden producirse sobre el medio natural y las restricciones ecológicas existentes en el área de implantación.

Debido al riesgo de deslizamientos y desprendimientos, no es aconsejable la ubicación de escombreras sobre cauces o zonas de ribera, salvo que vayan acompañadas de medidas especiales de protección.

En función del lugar de emplazamiento y de su configuración, las escombreras pueden clasificarse en los siguientes tipos: de vaguada, de ladera, de divisoria, exenta y de relleno de huecos, Figura 3.5.

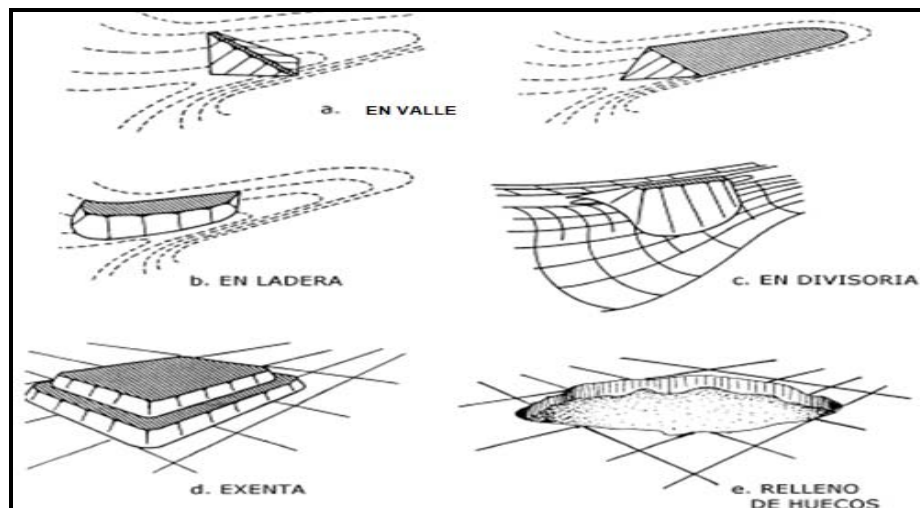


Figura 3.5 Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento.

(Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007)

a) Escombrera en valle

Pueden rellenar parcial o totalmente un valle o una vaguada, disponiéndose la superficie de la escombrera con una cierta inclinación para evitar la acumulación de agua en la parte superior. En función de las surgencias aguas arriba y dependiendo de la altura de la escombrera, en algunos casos se requiere la colocación de sistemas de drenaje en el interior de las mismas.

b) Escombrera en ladera

Cuando la construcción de la escombrera se realiza sobre un terreno con pendiente, sin llegar a bloquear totalmente el drenaje principal. Por lo general, el talud de la escombrera está en función de la inclinación de la superficie del terreno sobre la que se apoya.

c) Escombrera en divisoria.

Es un caso especial de escombrera en ladera, en el que ésta está emplazada en la cima y queda apoyada sobre ambos lados de la línea divisoria del terreno.

d) Escombrera exenta.

La escombrera se construye por apilamiento o amontonamiento de material sobre un terreno llano o con ligera inclinación. Cuando la escombrera alcanza una altura considerable, la construcción se realiza mediante terrazas y bermas.

e) Escombrera de relleno de huecos.

Debido a la fuerte presión ambiental para la conservación de los terrenos, se está generalizando el relleno con estériles de mina y escombros en antiguos huecos mineros abandonados.

Cuando existe la posibilidad de inestabilidad física o química de los materiales que se vayan a depositar en esos huecos, deberán acondicionarse e impermeabilizarse previamente para impedir el movimiento de los lixiviados o efluentes contaminantes.

3.3.2. Clasificación de las escombreras según su ubicación con respecto a la explotación

El tamaño de las escombreras está marcado por el volumen de estéril que es preciso mover para la extracción del mineral. En minas a cielo abierto, la cantidad de estériles no depende sólo de la estructura geológica del yacimiento y de la topografía del área, sino también del valor económico del mineral y de los costes de extracción del estéril. Los ratios o relaciones entre la roca estéril y el mineral, expresados en m^3/t o t/t , son, en la mayoría de las explotaciones de sustancias metálicas y energéticas, muy superiores a la unidad.

Según sea la implantación de la escombrera con respecto a la explotación, éstas se clasifican en interiores, si los estériles se depositan dentro de los propios huecos excavados tras la apertura de un hueco inicial, y exteriores, cuando la morfología del yacimiento y su consiguiente explotación no permiten el relleno del hueco creado en las primeras fases de la mina, Fig. 3.6.

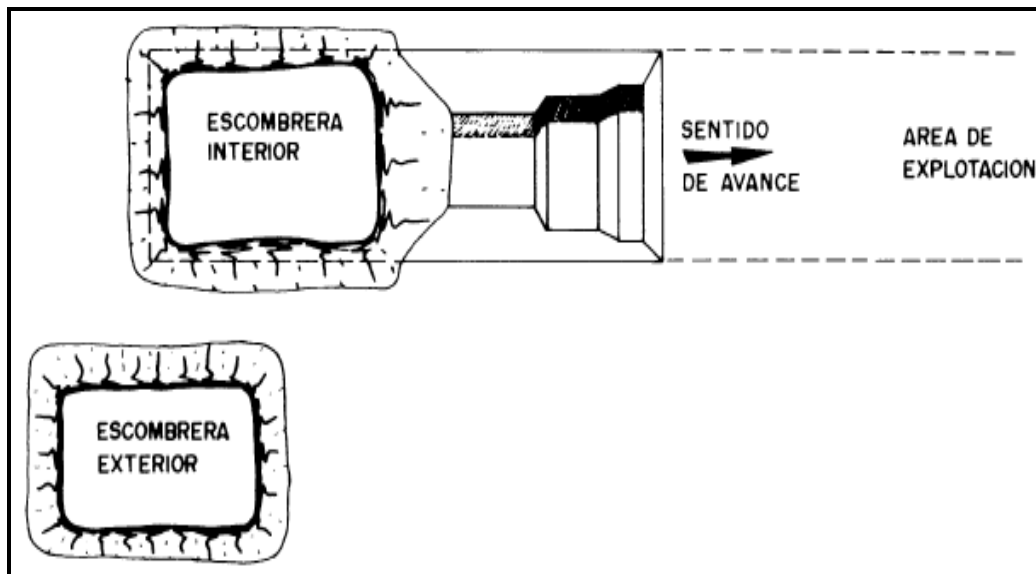


Figura 3.6. Implantación de escombreras en relación al hueco de explotación

(Fuente: Junta de Andalucía, 2003)

3.3.3. Geología y capacidad portante

Al elegir el lugar de asentamiento de una escombrera es preciso realizar una investigación de campo para determinar, mediante muestreo, las características geomecánicas de los materiales que constituirán la base del depósito, así como descartar la existencia de mineral potencialmente explotable en el subsuelo.

En una primera etapa se realizará un reconocimiento visual del terreno para identificar los afloramientos rocosos, la cubierta vegetal, los tipos de suelos, surgencias de agua, áreas de baja permeabilidad, vestigios de hundimientos mineros, discontinuidades estructurales, etc.

En la segunda etapa se efectuarán sondeos y calicatas que servirán para conseguir información geológica del subsuelo, así como para obtener muestras para la realización de ensayos in-situ o en laboratorio. Los sondeos para reconocimientos se deben realizar a profundidades superiores a los 5 ó 7 m.

Entre los ensayos in-situ de los suelos cabe destacar los ensayos de corte directo, ensayos de deformabilidad y ensayos de permeabilidad, mientras que, en laboratorio, se realizan los ensayos de propiedades índice, de compactación, de permeabilidad, de consolidación y de corte directo.

Dependiendo de las dimensiones de la escombrera y de las limitaciones impuestas por el entorno, el número de ensayos a realizar variará, siendo la investigación más completa conforme el riesgo de daños a bienes materiales o personas aumente.

Como mínimo se necesitan conocer tres parámetros básicos, como son: la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y el peso específico aparente (seco y saturado), para estimar si la base de una escombrera puede soportar la sobrecarga que supone el peso de los estériles vertidos o si, por el contrario, es probable que se produzcan inestabilidades estructurales y movimientos de los materiales de la base que afecten a la estructura que gravita sobre los mismos.

3.3.4. Metodología para la elección del emplazamiento

La elección del área de implantación de una escombrera persigue diversos objetivos, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Minimizar los costes de transporte y vertido.
- Alcanzar la integración y restauración de la estructura en el entorno.
- Garantizar el drenaje.
- Minimizar el área afectada.
- Evitar la alteración sobre hábitats y especies protegidas.

Como resultado de las restricciones medioambientales y económicas que influyen en el proceso de tratamiento de los residuos mineros, es evidente que se hace necesario llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las distintas alternativas de emplazamiento de la escombrera. Los datos necesarios no siempre son sencillos de obtener, pueden ser incompletos o incluso las alternativas pueden ser económicamente irrealizables. Por tanto, existe siempre un grado de incertidumbre que juega un papel importantísimo en el proceso de elección del emplazamiento.

A continuación se presentan los métodos mas utilizados para la elección del emplazamiento:

3.3.4.1. Método del Índice de Calidad

El sistema propuesto por Ayala y Rodríguez (1986) sirve como instrumento de elección preliminar cuando las diversas alternativas existentes para el emplazamiento de la escombrera no resultan lo suficientemente definitivas. El método propuesto pasa por determinar el llamado índice de calidad del emplazamiento, Q_e , mediante la siguiente expresión:

$$Q_e = \alpha \cdot (\beta \cdot \theta)^{(\delta+\eta)}$$

Cada uno de los parámetros que definen el índice de calidad son:

A. Factor α de alteración de la capacidad portante del terreno debido al nivel freático. Los valores que puede tomar son los siguientes:

$\alpha = 1$ Sin nivel freático o con nivel a profundidad superior a 5 m.

$\alpha = 0,7$ Con nivel freático entre 1,5 y 5 m.

$\alpha = 0,5$ Con nivel freático a menor profundidad de 0,5 m.

$\alpha = 0,3$ Con agua socavando menos del 50 % del perímetro de la estructura.

$\alpha = 0,1$ Con agua socavando más del 50 % del perímetro de la estructura.

B. Factor de resistencia de la cimentación, β . Depende de la naturaleza del cimiento y de la potencia de la capa superior del terreno de apoyo (tabla 3.2):

Tabla 3.2 Factor de resistencia de la cimentación, β

TIPO DE SUELO	POTENCIA				
	< 0,5 m	0,5 a 1,5 m	1,5 a 3,0 m	3,0 m a 8,0 m	> 8 m
Coluvial granular	1	0.95	0.90	0.85	0.80
Coluvial de transición	0.95	0.9	0.85	0.80	0.75
Coluvial limo-arcilloso	0.80	0.80	0.70	0.60	0.50
Aluvial compacto	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
Aluvial flojo	0.75	0.70	0.60	0.50	0.40

(Fuente: Junta de Andalucía, 2003)

C. Factor topográfico o de pendiente, θ . Varía en función de si la implantación se efectúa en terraplén o en ladera y en función de la inclinación de la zona (tabla 3.3):

Tabla 3.3 Factor topográfico o de pendiente, θ

TOPOGRAFIA DE IMPLEMENTACION		VALOR DE θ
TERRAPLÉN	Inclinación < 1 °	1
	Inclinación entre 1 ° y 5 ° (< 8 %)	0.95
	Inclinación entre 5 ° y 14 ° (de 8 % a 25 %)	0.90
LADERA	Inclinación entre 14 ° y 26 ° (de 25 % a 50 %)	0.70
	Inclinación > 26 ° (> 50 %)	0.40
	Perfil en V cerrada (inclinación de laderas > 20 °)	0.80
	Perfil en V abierta (inclinación de laderas < 20 °)	0.6 – 0.7

(Fuente: Junta de Andalucía, 2003)

D. El factor relativo al entorno humano y material a ser afectados, η , considera el riesgo de ruina de distintos elementos si se produjera la destrucción de la escombrera (tabla 3.4):

Tabla 3.4 Factor relativo al entorno humano y material a ser afectados, η

ENTORNO AFECTADO	VALOR DE η
Deshabitado	1
Edificios aislados	1,1
Explotaciones mineras poco importantes	1,1
Servicios	1,2
Explotaciones mineras importantes	1,3

Instalaciones industriales	1,3
Cauces intermitentes	1,2 - 1,4
Carreteras de 1 ° y 2 ° orden, vías de comunicación	1,6
Cauces fluviales permanentes	1,7
Poblaciones	2

(Fuente: Junta de Andalucía, 2003)

E. Factor de alteración de la red de drenaje, δ , que viene dado por (tabla 3.5):

Tabla 3.5 Factor de alteración de la red de drenaje, δ

ALTERACIÓN DE LA RED DE DRENAJE	VALOR DE δ
Nula	0.0
Ligera	0.20
Modificación parcial de la escorrentía de una zona	0.30
Ocupación de un cauce intermitente	0.40
Ocupación de una vaguada con drenaje	0.50
Ocupación de una vaguada sin drenaje	0.60
Ocupación de un cauce permanente con erosión activa menor del 50 % del perímetro de la estructura	0.80
Ocupación de un cauce permanente con erosión activa mayor del 50 % del perímetro de la estructura	0.90

(Fuente: Junta de Andalucía, 2003)

Tras la obtención de los distintos parámetros se puede llegar a calcular cuál es el valor del índice de calidad Q_e . Según el valor obtenido, los emplazamientos se clasifican de acuerdo con (tabla 3.6):

Tabla 3.6 Clasificación de los emplazamientos según valor de Q_e

VALOR DE Q_e	EMPLAZAMIENTO
$1 < Q_e < 0,90$	Óptimo para cualquier tipo de estructura. Tolerable para estructuras de gran volumen.
$0,90 < Q_e < 0,50$	Adecuado para estructuras de volumen moderado
$0,50 < Q_e < 0,30$	Tolerable
$0,30 < Q_e < 0,15$	Mediocre
$0,15 < Q_e < 0,08$	Malo
$Q_e < 0,08$	Inaceptable

(Fuente: Junta de Andalucía, 2003)

3.3.5. Estudio del emplazamiento

El conocimiento de las propiedades del cimientó y de los materiales de la escombrera será necesario para realizar un diseño correcto de la misma. En este sentido, también será importante establecer tanto la localización como la calidad del agua subterránea para poder predecir los impactos ambientales y establecer los programas de vigilancia adecuados.

Para seleccionar y obtener muestras representativas de los materiales, interpretar correctamente los resultados y aplicarlos al diseño, se requiere un conocimiento adecuado de ciertas propiedades físicas del medio. El tipo y cantidad de ensayos necesarios variará dependiendo de los siguientes factores: complejidad de las condiciones del emplazamiento, localización, tipo, tamaño y configuración de la escombrera, y características medioambientales. Para escombreras grandes, o situadas en ubicaciones ambientalmente sensibles, será necesario realizar una mayor cantidad de ensayos específicos.

La mayoría de los parámetros necesarios para el análisis y el diseño provienen de criterios empíricos basados en clasificaciones y descripciones cualitativas. En cualquier caso, cuando los programas de ensayos estén limitados o cuando los parámetros no se puedan hallar utilizando las técnicas habituales, se realizará un diseño más conservador.

3.3.5.1. Suelos del cimiento

A continuación se describirán las propiedades más importantes de los suelos del cimiento, así como su aplicación en el diseño y sus métodos de medida en campo y en laboratorio (tabla 3.7).

Tabla 3.7 Propiedades y Pruebas Importantes para Suelos de Cimentación

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Correlación entre resistencia intacta y al corte 	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción en campo • Clasificación preliminar 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis microscópico • Clasificación detallada
PROPIEDADES	<ul style="list-style-type: none"> • Correlación entre resistencia y conductividad hidráulica • Evaluación del potencial de separación 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación visual • Examen en campo • Ensayo de separación en campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cribado • Medida de la humedad (hidrómetro)
PLASTICIDAD DE LOS FINOS	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Correlación con la resistencia al corte • Índice del contenido de arcilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia seca, dilatación y dureza 	<ul style="list-style-type: none"> • Límite de Atterberg en finos
RESISTENCIA INTACTA	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad • Correlación con la resistencia al corte 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de carga puntual • Dureza en campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo triaxial • Ensayo de compresión simple

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
RESISTENCIA AL CORTE	<ul style="list-style-type: none"> • Criterio de rotura • Estabilidad de escombreras 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de corte en campo • Ángulo de reposo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de corte directo o Triaxial
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad • Microestructura • Clasificación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de acidez para carbonatos 	<ul style="list-style-type: none"> • Difracción de Rx • Límite de Atterberg en finos
DURABILIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la conductividad hidráulica • Duración en firmes y base de cimentación • Reducción de la resistencia al corte 	<ul style="list-style-type: none"> • Meteorización de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad al desmenuzarse • Ensayos de abrasión
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación de la infiltración • Predicción de las condiciones piezométricas • Cálculo del drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Correlación basada en la granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Compactación y permeabilidad
CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al corte • Consolidación y asentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso unitario a partir del esponjamiento 	
GEOQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto medio-ambiental • Riesgo por lixiviación de metales pesados • Drenajes ácidos. • Neutralización 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de surgencias de agua • Medida del pH en flujos de agua, conductividad, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación en columna • Medida de la acidez • Ensayos para determinar contaminantes

(Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007)

3.3.5.2. Propiedades de los suelos del cimiento

- **Descripción**

Se debe realizar una descripción de los diferentes suelos que aparecen en el emplazamiento elegido. Dicha descripción debe incluir características tales como el color, la granulometría, la textura, el olor, la estructura, etc., que ayuden a la identificación y clasificación del suelo, además de indicar los procesos de meteorización que haya sufrido. La clasificación del suelo permitirá separar los distintos tipos de suelos que conforman el terreno y analizarlos por separado.

Las descripciones preliminares se suelen realizar en campo mediante la perforación de sondeos y reconocimientos. Las condiciones en campo no suelen ser ideales y algunas técnicas de muestreo no pueden proporcionar descripciones detalladas, por lo que se debe recurrir a ensayos en laboratorio, principalmente con microscopio.

- **Propiedades y clasificación**

Se deben determinar las propiedades de cada tipo de suelo que se haya identificado durante las investigaciones en campo. Dichas propiedades, como la granulometría y plasticidad, son fundamentales para la clasificación del suelo, mientras que la resistencia, permeabilidad y consolidación se deberán tener en cuenta en el diseño. Ciertos parámetros, como el contenido de humedad, densidad y peso específico, proporcionan información referente a la relación volumen-peso que podrá ser usada para el cálculo del grado de consolidación, la presión de preconsolidación, la porosidad, cálculos de estabilidad, etc. El contenido de humedad natural también indica el estado del suelo in situ en relación con sus límites líquido y plástico.

Aunque existen numerosas clasificaciones, la más utilizada y mundialmente aceptada es la SCSU (Sistema de clasificación de suelos unificada), siendo aplicable a la mayoría de los tipos de suelo, excepto en el caso de suelos donde predominen los guijarros y grandes cantos rodados.

- **Conductividad hidráulica**

El conocimiento de la conductividad hidráulica es necesario para analizar las filtraciones, predecir las condiciones piezométricas, conocer la efectividad del recubrimiento y diseñar el sistema de drenaje. En la mayoría de las escombreras, será suficiente el conocimiento de la conductividad hidráulica a partir de relaciones empíricas basadas en las propiedades y descripción del suelo. Para casos más complejos, como la aparición de un medio ambientalmente sensible o dificultades en la cimentación, serán necesarias medidas más específicas basadas en ensayos en laboratorio.

- **Consolidación**

En aquellos casos en los que la cimentación de la escombrera se realice sobre suelos de grano fino, será necesario obtener datos sobre la consolidación que se pueda producir. Esta información será necesaria para predecir los posibles asentamientos y la generación de presiones intersticiales excesivas debido a la carga de la escombrera. Una presión intersticial excesiva puede reducir la estabilidad de la escombrera durante su construcción, por lo que el grado de seguridad a lo largo de la vida de la misma vendrá limitado por la disipación de la presión intersticial excesiva.

Los asentamientos debidos a la consolidación de los cimientos también pueden reducir las filtraciones, aumentando la resistencia al corte. Por otro lado, esta consolidación provoca deformaciones en el material de la escombrera con un cambio en su resistencia al corte y en su comportamiento. Si los asentamientos son importantes, se producirá la rotura de las capas de drenaje, diques perimetrales, etc., por lo que se deberá tener muy en cuenta en el diseño.

- **Resistencia**

Las características resistentes de la cimentación serán muy importantes para definir su estabilidad y su capacidad portante. Para una estimación inicial, o cuando la escombrera se construya sobre estratos competentes, se adoptarán criterios conservadores basados en relaciones con la clasificación del suelo y sus propiedades, o a partir de ensayos sencillos en campo.

Cuando las condiciones de la cimentación sean difíciles, esté formada por suelos de grano fino, blando o susceptible de consolidación, o se prevea la generación de presiones intersticiales y otros efectos adversos, será necesario realizar ensayos en campo y en laboratorio más detallados. El número y tipo de ensayos a realizar dependerá de la complejidad del emplazamiento, de la naturaleza del suelo y de las condiciones de carga a las que va a ser sometido.

Relacionando las características del terreno con los aspectos del diseño, se puede señalar que en el vertido de estériles sin cohesión sobre un cimiento competente, la pendiente máxima de la escombrera será igual al ángulo de reposo de dichos estériles. El ángulo de reposo representa el límite inferior del ángulo de rozamiento interno del vertido y varía entre 30° y 40° . Cuando el cimiento esté nivelado y sea competente, además de poseer un drenaje adecuado, la altura alcanzada por estériles sin cohesión formando su ángulo de reposo es, prácticamente, ilimitada. Cuando se viertan estériles no cohesivos sobre cimientos blandos, la máxima altura permitida de la escombrera estará controlada por la resistencia al corte del cimiento.

Las alturas y pendientes máximas permitidas en escombreras que contengan materiales cohesivos y situadas sobre terrenos competentes estarán determinadas por la resistencia del material de la escombrera, mientras que si el cimiento tiene unas características blandas, la altura y la pendiente vendrán determinadas por la resistencia de dicho terreno.

- **Densidad in situ**

La densidad in situ de los suelos influye directamente en la resistencia al corte y capacidad de asentamientos del cimiento, además de la resistencia a la licuefacción, sobre todo en aquellos casos en que el cimiento esté formado por suelos arenosos o limosos. En esta situación, se podrán utilizar relaciones empíricas entre la densidad, el potencial de licuefacción y la resistencia a la penetración.

- **Compactación**

El conocimiento de las características de compactación del suelo del cimiento será necesario si en el diseño se contempla alguna construcción de protección, como bermas o revestimientos, que necesiten el uso de maquinaria de compactación. Las medidas en campo quedan restringidas, normalmente, a las medidas de densidad en sondeos mediante el uso de densímetros, mientras que el ensayo de compactación habitualmente utilizado en laboratorio será el Proctor modificado o estándar.

3.3.5.3. Sustrato rocoso del cimiento

Además de las características geológicas básicas del cimiento rocoso que, normalmente, serán evaluadas durante la fase de investigación en campo, se necesitarán hallar otras propiedades importantes en el diseño de la escombrera que serán descritas a continuación y que se pueden observar en la tabla 3.8. Los métodos de campo y de laboratorio para la caracterización de los parámetros importantes del lecho de roca también aparecen en este cuadro. En los casos en que aparezcan rocas con un comportamiento semejante a un suelo, se realizarán los análisis y ensayos descritos en el apartado anterior. Cabe destacar el hecho de que el sustrato rocoso es la estructura que al final de cuentas va a sostener todo el peso de la escombrera, por lo que es muy importante obtener una buena descripción

Tabla 3.8 Propiedades del sustrato rocoso del cemento y ensayos a realizar.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN: <ul style="list-style-type: none"> • Litología • Origen • Textura y microtextura 	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Durabilidad • Correlación con resistencia intacta • Resistencia anisotrópica y planos de discontinuidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción en campo • Clasificación preliminar 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis microscópico • Clasificación detallada
RESISTENCIA INTACTA	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad de la cimentación • Capacidad portante 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de carga puntual • Dureza en campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo triaxial • Ensayo de compresión simple
RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad de cimentación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de inclinación • Análisis retrospectivo de roturas naturales 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de corte directo
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Hinchamiento de arcillas • Durabilidad • Microestructura • Clasificación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de acidez para carbonatos 	<ul style="list-style-type: none"> • Difracción R-X • Límite de Atterberg • Análisis geoquímicos
DURABILIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la resistencia y la capacidad portante • Transitabilidad • Reducción de la conductividad hidráulica 	<ul style="list-style-type: none"> • Meteorización de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidad al desmenuzarse • Ensayos de abrasión con sulfatos

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación de la infiltración • Predicción de las condiciones piezométricas 	<ul style="list-style-type: none"> • Piezómetros • Ensayos de infiltraciones • Control de acuíferos 	<ul style="list-style-type: none"> • Compactación y permeabilidad

(Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007)

3.3.5.4. Propiedades del Sustrato rocoso del cimiento

- **Descripción**

Se debe preparar una descripción de cada uno de los tipos de rocas principales que se hayan encontrado durante las investigaciones en campo, y clasificarlas según su litología y origen. Una descripción y clasificación básica será útil para conocer las características generales del cimiento. Las estimaciones cualitativas preliminares de los parámetros más importantes, tales como resistencia a compresión y durabilidad, pueden basarse en valores típicos dados a cada tipo de roca hallada. En la mayoría de los casos, no serán necesarios análisis más detallados.

- **Resistencia**

La resistencia de la roca intacta y la resistencia al corte de las discontinuidades pueden influir en la estabilidad y capacidad portante de la cimentación. Las estimaciones preliminares de la resistencia a compresión pueden basarse en correlaciones empíricas o en ensayos de dureza en campo. Cuando sea necesaria una mayor información, se pueden realizar ensayos de carga puntual en muestras provenientes de los testigos de sondeos. Los ensayos de resistencia intacta en laboratorio se hacen en aquellos casos en los que la cimentación rocosa sea muy blanda. Para estudiar la resistencia al corte de las discontinuidades se utilizan ensayos de inclinación en campo o ensayos de corte directo en laboratorio.

- **Mineralogía y petrografía**

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o susceptibles de hinchamiento, y la aparición de microfracturas y otras texturas de la roca, pueden influir de manera importante en la durabilidad y resistencia de la cimentación. Un conocimiento de la mineralogía de la roca puede ayudar en su clasificación y descripción. Los métodos para estudiar la mineralogía y petrografía de la arcilla en laboratorio incluyen la difracción de rayos X y el microscopio electrónico. La determinación de los límites de Atterberg también puede ser útil en la identificación de los minerales arcillosos.

- **Durabilidad**

La durabilidad de los materiales de la cimentación puede influir en la estabilidad a largo plazo. Las características de resistencia al corte y la capacidad portante pueden disminuir con el tiempo si el lecho de roca sufre un proceso de degradación. Un conocimiento cualitativo preliminar de la susceptibilidad de dicho lecho a la degradación se puede basar en observaciones de la meteorización de la superficie y en el hinchamiento o degradación de los testigos de sondeos. Si estos estudios iniciales indican que las características del lecho de roca facilitan la meteorización y degradación, se realizarán ensayos de durabilidad al desmoronamiento, que indican la susceptibilidad de la roca a la rotura mecánica.

- **Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica de la cimentación afecta a la filtración y a las condiciones piezométricas, y puede determinar la necesidad de instalación de revestimientos o medidas de control del drenaje. Cuando las investigaciones preliminares en campo señalen acuíferos importantes o condiciones adversas, será necesario realizar ensayos de conductividad hidráulica. El único método práctico de conocer dicha conductividad del lecho rocoso se basa en técnicas de control in situ tales como infiltración, piezómetros o sondeos.

3.3.5.5. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)

Esta clasificación geomecánica se basa en el índice RMR (Rock Mass Rating), desarrollado por Z.T Bieniawski 1989, da una estimación de la calidad del macizo rocoso, teniendo en cuenta los siguientes factores:

- La resistencia a la compresión simple del material, que se puede obtener mediante ensayos de laboratorio o en campo a través del martillo de Schmidt.
- El grado de fracturación en términos del RQD, que se puede obtener a partir de la siguiente formula:

$$\text{RQD} = (100/(1+s)) \cdot e^{-0,1/s}, \text{ donde } s \text{ es el espaciamiento de las discontinuidades}$$

- El espaciamiento de las discontinuidades, este se puede medir en campo, o se puede tener un estimado mediante el grafico de Franklin, para la clasificación de las rocas según su excavabilidad.
- El estado de las discontinuidades, se puede observar en campo.
- La presencia de agua, se le asigna un puntaje según las condiciones de agua en el macizo.

Estos factores se cuantifican definiendo valores para cada parámetro, cuya suma, en cada caso, nos da el índice de calidad del RMR que varía entre 0 y 100 (mayor cuanto mejor es la calidad de la roca), tabla 3.9.

Tabla 3.9 Parámetros para la clasificación geomecánica RMR y sus valores.

Parámetros	ESCALA DE VALORES							
	Resistencia de la roca intacta	Carga Puntual	80 kg/cm ²	40-80 kg/cm ²	20-40 kg/cm ²	10-20 kg/cm ²	10 kg/cm ²	
A Compresión Simple		2000 Kg/cm ²	1000 - 2000 Kg/cm ²	500 - 1000 Kg/cm ²	250 - 500 kg/cm ²	100-250 kg/cm ²	30-100 kg/cm ²	10-30 Kg/cm ²
VALOR		15	12	7	4	2	1	0
R. Q.D.		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	25%		
VALOR		20	17	13	8	3		
Espaciado de Juntas		3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50-300 mm	50 mm		
VALOR		30	25	20	10	5		
Condición de Juntas		Muy rugosas sin continuidad cerradas, Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1 mm. de separación Paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1 mm. de separación Paredes de roca suave	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm ó abiertos 1-5mm FisurasContinuas	relleno blando de espesor < 5mm. ó abiertas <5 mm. fisuras continuas		
VALOR		25	20	12	6	0		
Aguas Subterráneas	Cant. Infiltración 10 m. de túnel	Ninguna		25 litros/min	25-125 litros/min	>125 litros/min.		
	Presión de agua	Cero		0.0-0.2	0.2-0.5	0.5		
	Esfuer. principal	Cero		0.0-0.2	0.2-0.5	0.5		
	Situación General	Totalmente Seco		Solo húmedo agua inderst.	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua		
VALOR		10		7	4	0		

Fuente: ISRM, 1981

Según el índice RMR obtenido, el macizo rocoso se puede clasificar en cinco clases que corresponden a una calidad y unas características geotécnicas definidas, pudiéndose incluso obtener valores estimados para la cohesión el ángulo de fricción y tiempos de estabilidad de una excavación según se indica en la tabla 3.10:

Tabla 3.10 Calidad del macizo y valores estimados de cohesión y ángulo de fricción

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Mediana	Mala	Muy mala
RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Cohesión (kg/cm ²)	>0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	<0,1
Angulo de fricción(°)	>45°	35-45°	25-35°	15-25°	<15°

Fuente: ISRM, 1981

3.3.5.6. Capa vegetal

Como capa vegetal se entiende todos los suelos superficiales que deben ser trasladados debido a la explotación minera, y que serán incorporados a la escombrera o utilizados como recubrimiento o cobertura final antes de la restauración. Cuando el volumen de suelo superficial incluido en la escombrera sea grande puede tener una gran influencia en la estabilidad y la conductividad hidráulica, mientras que cuando se utilice como recubrimiento final, sus características influirán en las filtraciones producidas además de la erosión y la estabilidad. Las propiedades más importantes del material del recubrimiento, su influencia en el diseño y los métodos de análisis se resumen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Propiedades del recubrimiento del cimient y ensayos a realizar.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN: <ul style="list-style-type: none"> • Color • Olor • Textura • Estructura 	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Identificación de suelos problemáticos • Meteorización 	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción en campo 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis microscópico
PROPIEDADES <ul style="list-style-type: none"> • Granulom. • Plasticidad • Contenido humedad • Densidad • Peso específico 	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación • Correlaciones empíricas con la conductividad hidráulica, resistencia y consolidación 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación visual de la granulometría • Estimación de la plasticidad • Ensayos de densidad y humedad in situ 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamizado • Sedimentación • Límites de Atterberg • Métodos de medida de los parámetros de volumen y peso
RESISTENCIA	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al corte • Estabilidad de talud 	<ul style="list-style-type: none"> • Correlaciones empíricas con las propiedades • Ensayos de resistencia in situ 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo triaxial • Ensayo de corte directo

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Hinchamiento de arcillas • Fijar zonas contaminadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de acidez para carbonatos 	<ul style="list-style-type: none"> • Difracción R-X • Determinación acido-base • Adsorción
DENSIDAD Y COMPACTACION	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al corte • Consolidación y asentamientos • Diseño de revestimientos 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad basada en el factor de esponjamiento • Densímetros 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo Proctor modificado
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación de la infiltración • Predicción de las condiciones piezométricas • Conocimiento del drenaje de roca 	<ul style="list-style-type: none"> • Correlaciones empíricas con la granulometría • Ensayos de infiltraciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Permeámetro de compactación • Ensayo triaxial

(Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007)

3.3.5.6. Propiedades de la capa vegetal

- **Descripción, propiedades y clasificación**

Como en los casos anteriores, la descripción, propiedades y clasificación del terreno será útil para poder separar los distintos tipos de suelos que aparecen y poder analizarlos separadamente, compararlos y distinguir sus diferencias, para completar los estudios preliminares. La descripción y clasificación se deberá realizar para todos los tipos de suelos que aparezcan en el recubrimiento. En este sentido, se determinará la granulometría, límites de Atterberg y contenido en humedad para conocer su distribución a través del depósito.

- **Conductividad hidráulica**

Dependiendo de la cantidad y distribución del recubrimiento en la escombrera, la conductividad hidráulica de éste puede jugar un papel importante en las filtraciones y desarrollo de presiones piezométricas que aparezcan. Sin embargo, debido a la dificultad de estimar la conductividad hidráulica de los estériles, será suficiente con una aproximación empírica basada en la granulometría. Si se van a verter grandes cantidades de terreno de recubrimiento en la escombrera o va a ser utilizado como revestimiento o recubrimiento final de ésta, es recomendable un ensayo de permeámetro de compactación.

- **Resistencia al corte**

Si los materiales del recubrimiento ocupan una parte importante de la escombrera o están situados de forma que puedan crear una zona de debilidad, es necesario un estudio de la resistencia al corte. Cuando los suelos contienen una alta porción de finos, especialmente minerales arcillosos, pueden proporcionar unas propiedades, como cohesión e impermeabilidad, que pueden ser aprovechados en el diseño. Un valor aproximado de la resistencia al corte puede obtenerse por correlación empírica con las propiedades descritas anteriormente, siendo los ensayos en laboratorio, tales como el corte directo y triaxial, los más indicados cuando se necesiten datos más exactos.

- **Densidad**

La densidad in situ del recubrimiento influirá en la resistencia al corte y en las características de asentamiento de la escombrera. Sin embargo, debido a la dificultad para hallar esta densidad y por su variación dentro de la propia escombrera, no es habitual obtener datos demasiado precisos de la misma.

Cuando el suelo superficial se vaya a utilizar como revestimiento o recubrimiento final, se debe realizar un ensayo de compactación del terreno que, normalmente, será un ensayo Proctor modificado.

- **Mineralogía y química**

La composición mineralógica y química del revestimiento puede ser importante en relación con el impacto ambiental. La presencia de ciertos tipos de arcillas puede fijar los elementos contaminantes o disminuir su liberación y, además, puede ser exigido un estudio químico básico del suelo para cumplir con la legislación vigente.

Si los ensayos del resto de materiales que aparecen en la escombrera indican un posible aumento de los elementos contaminantes, serán necesarios estudios más detallados del recubrimiento constituidos por ensayos de difracción de rayos X, determinación ácido-base, adsorción y conocimiento específico de dichos elementos contaminantes.

3.4. CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS

El método de construcción de escombreras tiene una gran importancia sobre la homogeneidad y estabilidad de la misma, predominando la estratificación horizontal o la paralela al talud. Además, se deberá prestar una especial atención al sistema de vertido. Así, se diferenciará el sistema de vertido directo desde camión o cinta, que será admisible en escombreras de pequeña envergadura y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras, del sistema de vertido por empuje con tractor de orugas o pala.

Por otro lado, el recrecido de la escombrera se debe realizar de la forma más homogénea posible, que será por capas o tongadas horizontales. Para este mismo fin, se evitará que los escombros de distinta naturaleza se combinen en una misma zona de la escombrera.

3.4.1. Preparación del cimientto y sistemas de drenaje

Dependiendo de la situación, tanto el control del drenaje como la preparación del cimientto puede jugar un papel importante en la estabilidad de la escombrera. Ambos aspectos deben ser contemplados en la etapa de diseño y controlarse durante la etapa de construcción u operación de dicha estructura.

3.4.1.1. Preparación del cimiento

Los trabajos de preparación de los terrenos a ocupar pueden ir desde un simple desbroce, con eliminación de la vegetación existente antes del vertido, hasta una completa retirada selectiva de los horizontes de suelo más superficiales y su posterior aprovechamiento en los trabajos de restauración, así como la deforestación previa de esas superficies. También se puede realizar la excavación de suelos de recubrimiento que, aún no siendo aptos para la restauración, ofrecen una baja capacidad portante o baja resistencia.

En la mayoría de los casos, tanto la cubierta vegetal como los suelos de cobertura afectan negativamente a la estabilidad de las escombreras.

En algunos emplazamientos se pueden precisar distintas actuaciones además de las indicadas, tales como el refuerzo o consolidación del material de la base de apoyo, o la construcción de un sistema de drenaje.

3.4.1.2. Drenaje

El control del agua es un aspecto básico en la construcción y operación de las escombreras. Las fuentes principales de agua que deben considerarse con vistas al drenaje de las escombreras y las superficies circundantes de éstas son las siguientes:

- Escorrentías de los terrenos que constituyen la cuenca de recepción de las escombreras.
- Precipitaciones directas de agua sobre la escombrera.
- Filtraciones del cimiento de apoyo o de laderas ocupadas por la escombrera.
- Labores subterráneas abandonadas que actúan como vías de drenaje de las explotaciones.
- Arroyos o cauces de agua existentes en emplazamientos de vaguada.

Los fenómenos principales que deben estudiarse con relación a estas fuentes de agua son: la estabilidad y erosión de las escombreras, así como la calidad de las aguas procedentes de dichos depósitos.

Existen ciertas normas o recomendaciones encaminadas a mejorar la resistencia de las masas de estériles frente a los deslizamientos, así como a rebajar los niveles de agua dentro de las estructuras. Así, la primera norma a seguir consiste en la retirada de la vegetación y de los suelos del lugar de asentamiento. La descomposición de esta vegetación con el tiempo y la existencia de una capa de suelo, constituyen una zona de rotura probable por la baja resistencia al corte que presentan. En el caso de que estos materiales no puedan ser apartados, se recomienda la compactación o tratamiento de mejora de los mismos.

Si existe agua estancada en la base de apoyo deberá ser drenada antes de verter los primeros estériles o, si esto no es posible, rellenar dichas zonas con material de escollera. En zonas de surgencia de acuíferos se procederá a la captación y drenaje de las mismas con la doble finalidad de evitar el efecto de las presiones intersticiales del agua en la escombrera y conservar las fuentes y manantiales.

Si las surgencias son extensas, debe disponerse de una red de zanjas o tubos drenantes conectados a unos colectores. En la Figura 3.7 se representa la construcción de una zanja de drenaje del tipo denominado “Francés”, que consiste en la colocación en el interior de la misma de material granular protegido por un geotextil o lámina filtrante.

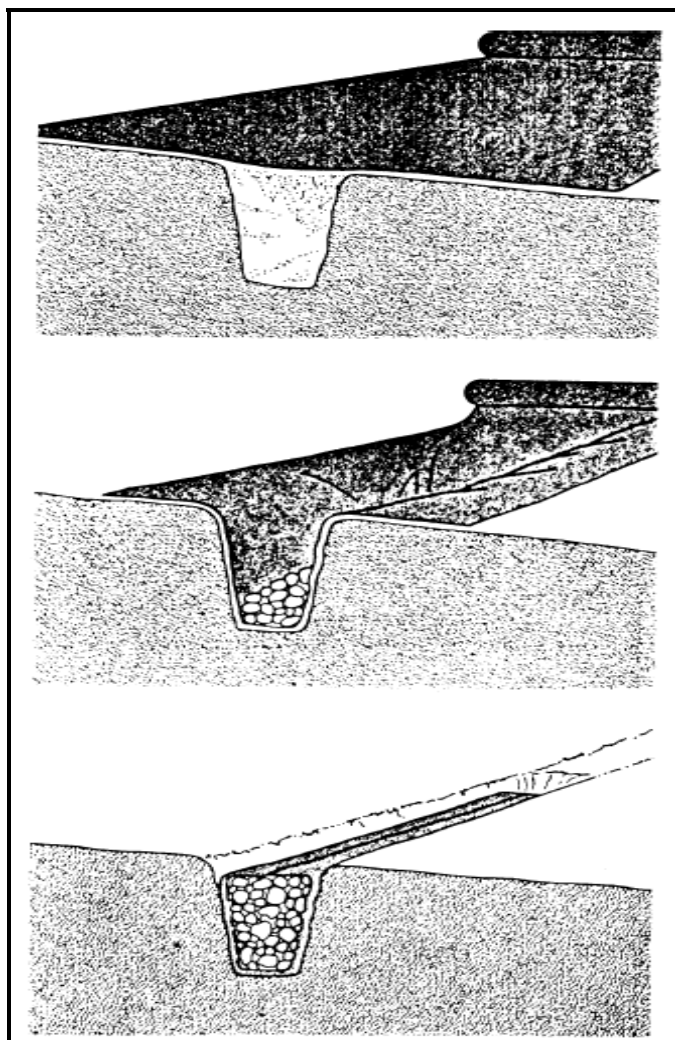


Figura 3.7 Colocación de geotextil en una zanja de drenaje (Dren Francés)

Fuente: Junta de Andalucía

Cuando las escombreras se construyan en terrenos montañosos ocupando vaguadas, se deberá proceder a la construcción previa de canales de desvío de los cauces naturales, aunque éstos sean estacionales, así como de sistemas de decantación aguas abajo de dichas estructuras.

Una alternativa recientemente utilizada en algunas explotaciones ha sido la de colocar drenes rocosos en las bases de las escombreras, constituidos por bloques de roca dura competente estratégicamente colocados o segregados naturalmente en el pie de los

depósitos al efectuar el vertido directo de esos materiales, y a través de los cuales el agua puede circular fácilmente, figuras 3.8 y 3.9.

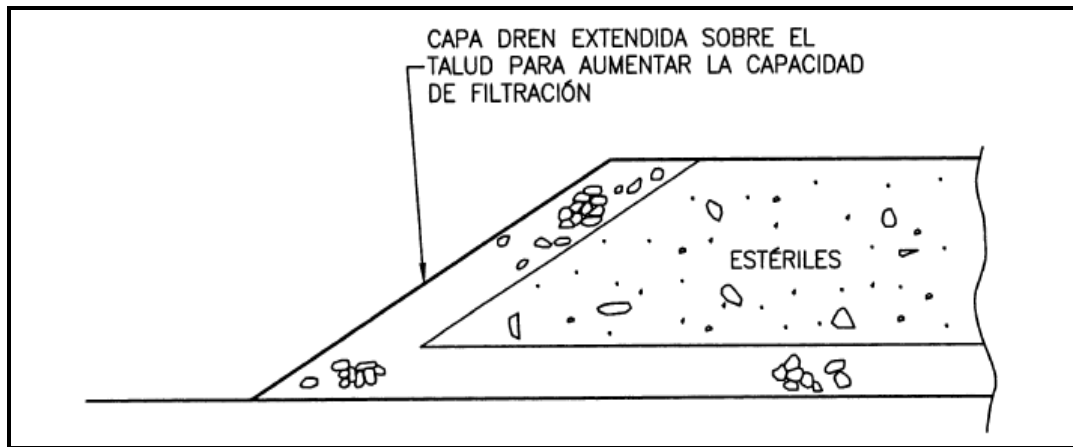


Figura 3.8 Drenaje del talud de la escombrera

Fuente: Junta de Andalucía

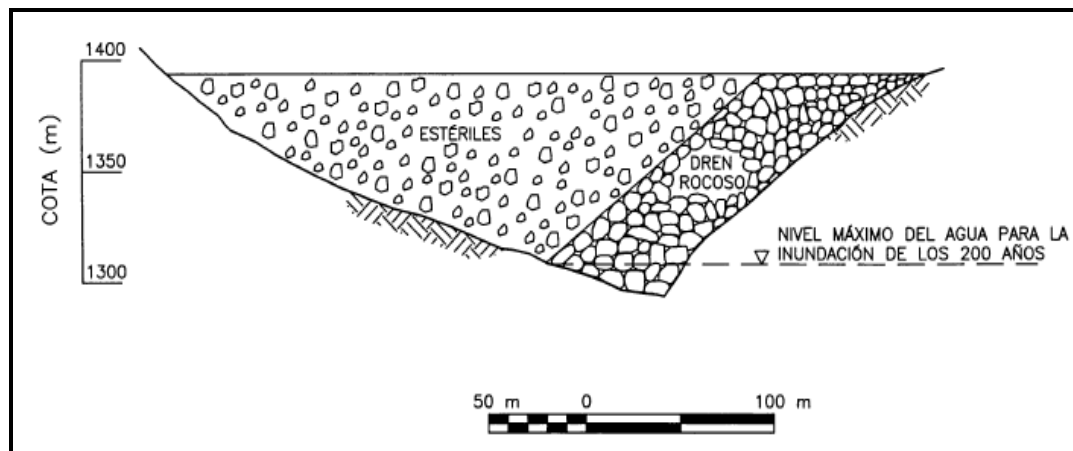


Figura 3.9 Colocación del drenaje rocoso

Fuente: Junta de Andalucía

En ciertos casos es necesaria la construcción de pequeñas presas o balsas de decantación aguas debajo de las escombreras, con el fin de eliminar los sólidos en suspensión de las aguas procedentes de estas estructuras y que garanticen así unos estándares de calidad de las aguas vertidas. En estos casos esas balsas deben construirse y estar operativas antes de que se proceda a la construcción de las escombreras.

Cuando sea previsible la contaminación química de las aguas, será preciso prever sistemas colectores de aguas superficial y, en su caso, subterránea, para su posterior tratamiento.

Inevitablemente, la infiltración aparecerá como el resultado de las precipitaciones directas sobre la superficie de las escombreras. De manera ideal, el agua percolará a través del cuerpo de la escombrera debido a la alta permeabilidad de la capa base (formada por bloques de roca gruesa estratégicamente colocados o por la propia segregación natural) que facilitará su salida de la escombrera.

Para canalizar el agua de escorrentía de las escombreras es necesario construir un dren perimetral al pie de cada terraza figura 3.10; y para evacuar esta agua hacia los drenajes de la mina, es necesario construir graderías para así disipar la energía alcanzada por el agua, figura 3.11.

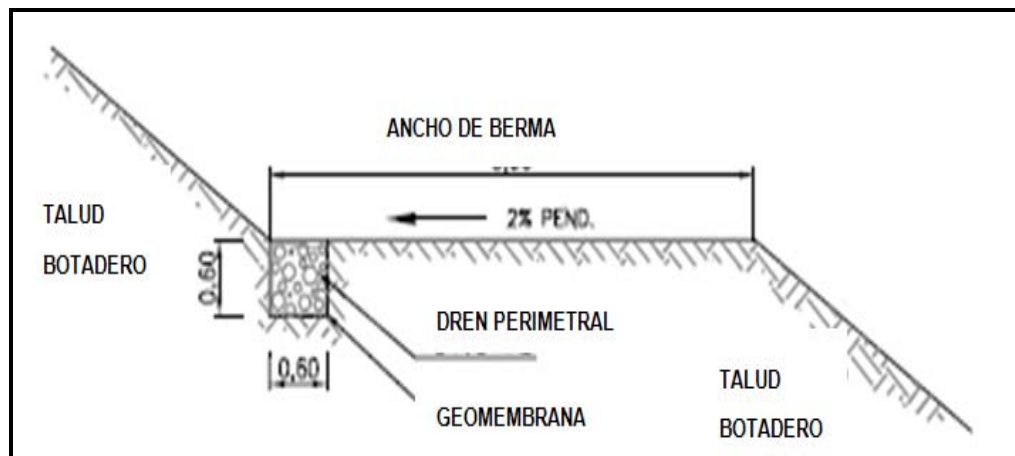


Figura 3.10 Detalle de dren perimetral

Fuente: SEIA

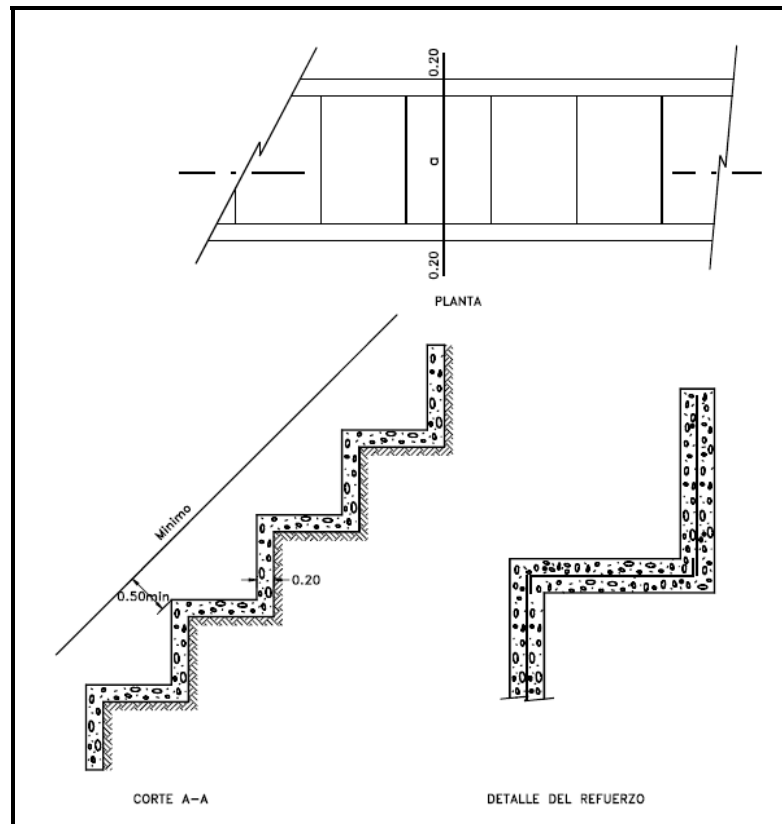


Figura 3.11 Detalle de gradería

Fuente: SEIA

3.4.2. Control de la calidad de los materiales

El material vertido puede variar considerablemente en su resistencia y durabilidad. Como con cualquier material ingenieril, son ideales las rocas duras y durables, y los fragmentos gruesos y angulares resistentes.

En el extremo opuesto están los materiales con alto contenido de finos o que tienen una baja durabilidad y, por ello, una tendencia a romperse con el tiempo. Los materiales con un alto porcentaje de partículas de material meteorizado, o material que se deteriora con el paso del tiempo, pueden contribuir a que aparezca una variedad de problemas tales como la permeabilidad debido al cambio en el tamaño de las partículas, con un aumento de la presión de poro del agua y una menor resistencia al corte, pudiendo todo ello desembocar en una precaria estabilidad de la escombrera.

Se puede establecer una clasificación de la calidad de los estériles basándose en el tamaño de grano y en su composición, como por ejemplo de la forma siguiente, figura 3.12:

1. Calidad alta: predominancia de fragmentos de arenisca de tamaños mayores de 0,3 m.
2. Calidad media-alta: predominancia de fragmentos de arenisca y limonita de 0,2-0,3 m de diámetro y con muestras de material arenoso y gravas.
3. Calidad media: predominancia de fragmentos de arenisca y limonita menores de 0,1 m y muestras de tamaños finos.
4. Calidad media-baja: areniscas y limonitas muy fragmentadas con muestras de rocas arcillosas y finos.
5. Calidad baja: terreno vegetal, arcilla y muestras de rocas arcillosas muy fragmentadas.



Figura 3.12 Calidad de los estériles

Fuente: Junta de Andalucía

La calidad de los estériles que aparecen en cada banco se puede estimar a partir de los testigos de los sondeos mediante la utilización de rayos gamma capaces de identificar

los cambios en su composición en caso de que la inspección visual no sea definitiva. En general, la roca de calidad media y alta se suele utilizar como material de drenaje, mientras que las rocas de calidad inferior se colocarán en zonas cuya estabilidad esté garantizada (cerca del terreno natural, entre dos escombreras construidas con materiales de alta calidad, zonas de cimentaciones planas y zonas de mezcla con materiales de alta calidad). Por lo tanto, los materiales de baja calidad no se deberán utilizar en las capas o tongadas inferiores ya que será necesario crear un pie del talud fuerte y permanente capaz de soportar el resto de los vertidos.

Los suelos de recubrimiento deben excluirse del material vertido en las escombreras, así como las zonas que supongan una baja resistencia al corte o zonas que dificulten el drenaje. Los horizontes superficiales serán retirados y depositados en lugares concretos. Cuando ello no sea posible, los materiales podrán ser mezclados y vertidos, conjuntamente con los estériles, siguiendo unos criterios preestablecidos. El objetivo es que los materiales más finos puedan rellenar los huecos que aparecen entre los fragmentos rocosos gruesos sin que tengan un efecto significativo sobre los parámetros resistentes del conjunto de estériles vertidos.

3.4.3. Operaciones de vertido

3.4.3.1. Procedimientos de vertido

Las normas generales de vertido son las siguientes:

- En general, se necesitará un operador en cada una de las zonas de vertido.
- En los casos en los que la cresta de vertido supere los 3 m de altura no se podrá verter sobre dicho banco, excepto que exista una banqueta de seguridad y un operario dirija los vehículos al punto de vertido.
- La altura de la banqueta debe ser, al menos, igual al radio máximo de las ruedas de los camiones de transporte.
- La banqueta de seguridad tiene la función de servir de guía y no se debe utilizar como un tope sobre el que apoyarse.

- La superficie de la banqueta se debe construir y mantener con una cierta inclinación hasta llegar al punto de vertido para evitar que los camiones caigan en el frente de la escombrera. Dicha superficie debe tener una inclinación de un 2 %, aproximadamente.
- Cuando dos o más camiones están vertiendo al mismo tiempo, se deberá guardar una distancia de seguridad equivalente, al menos, al ancho de dos camiones.
- Si no existe ningún operario en la escombrera, los camiones deben verter su carga sin alcanzar la cresta de la banqueta y, posteriormente, ésta será empujada por un tractor hasta el frente de vertido.

El esquema de una plataforma de vertido y los principales procedimientos del mismo se representan en la figura 3.13.

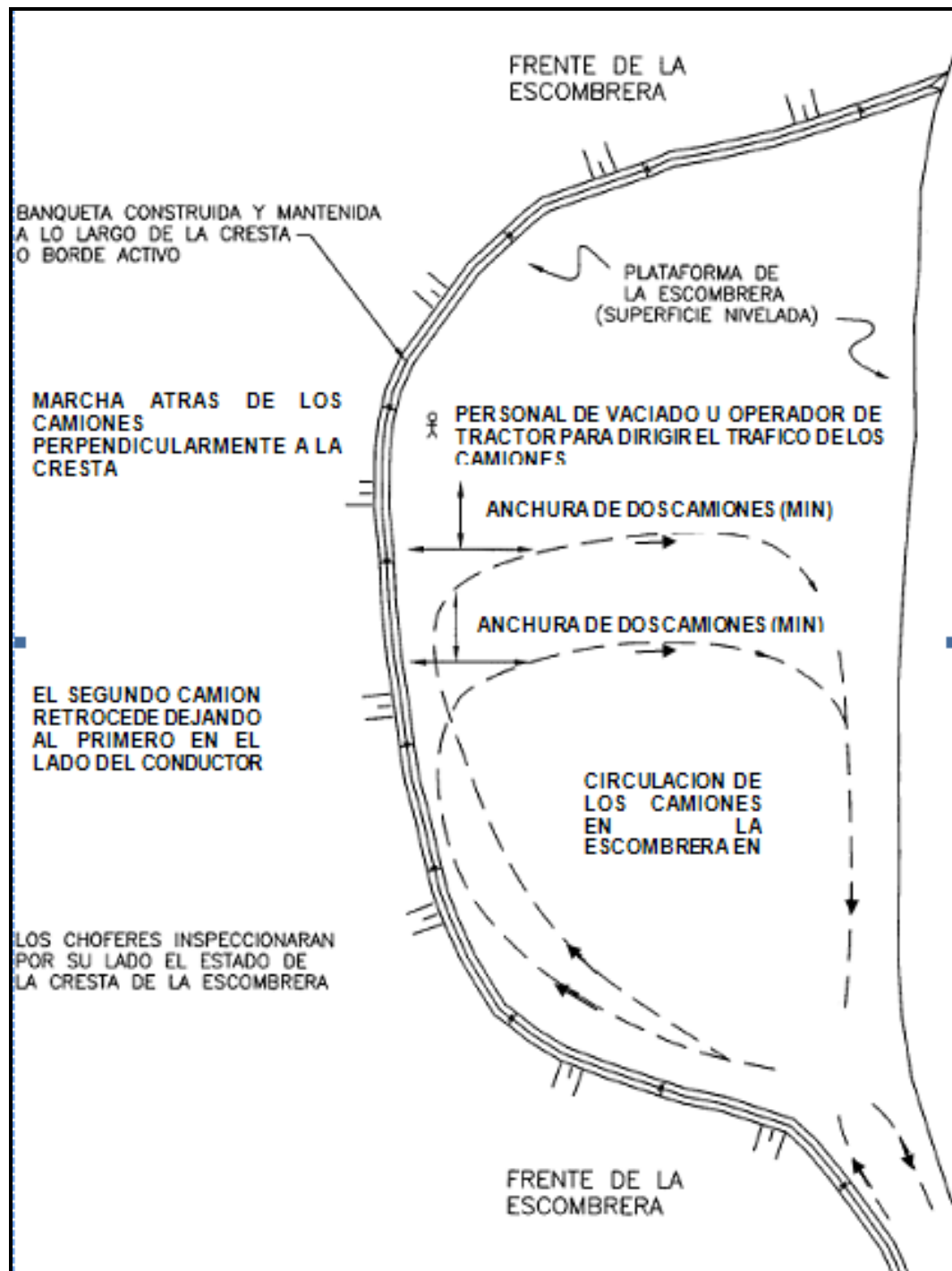


Figura 3.13 Configuración de la plataforma de vertido

Fuente: Junta de Andalucía

Los procedimientos que deben seguir los vehículos de transporte en el vertido de materiales serán los siguientes:

- La circulación de los camiones en la plataforma de vertido se realizará en el sentido de las agujas del reloj para que la visión de la escombrera por parte de los conductores sea nítida antes de llegar a la misma.
- Cuando el camión llegue a la escombrera, el conductor debe detenerlo para cerciorarse de las condiciones de la banqueta, del personal y de otros vehículos. El área de la escombrera debe ser segura y estar despejada.
- Los vehículos de transporte avanzarán marcha adelante hasta llegar al punto de vertido en el que deberán de dar la vuelta.
- Los camiones deberán dar la vuelta para situarse en la banqueta en el momento que indique el operario.
- Los camiones no abandonarán la banqueta hasta que la caja no se haya vaciado.
- La carga debe ser vertida de una vez.
- Los camiones no se deberán mover hasta que la caja no esté completamente vaciada.

Los tractores son usados en la escombrera para realizar el mantenimiento de la superficie de vertido y de la berma de seguridad, además de empujar el material hasta el borde de vertido cuando sea necesario.

3.4.3.2. Ritmos de descarga

Los ritmos de descarga se suelen expresar en términos de volumen vertido por metro lineal de cresta y día ($m^3/m/día$), o en metros de cresta por día ($m/día$), siendo más habitual ésta última.

En un primer momento, el material recién vertido sufre un pequeño asentamiento, manteniendo el estado suelto inicial. Debido a las siguientes descargas este material

quedará enterrado, incrementándose la tensión de carga, por lo que el material adoptará una configuración más densa y una mayor resistencia al corte. Por lo tanto, para estudiar la estabilidad será necesario conocer el asentamiento final de la superficie de la escombrera.

Existe una importante relación entre el ritmo de descarga y la estabilidad de la escombrera, tal como se ha podido observar en ciertos casos estudiados. Sin embargo, también existen otros factores que actúan en la estabilidad y que hacen que no sea fácil determinar unos ritmos de descarga generales. Entre dichos factores destacan los siguientes:

- **Condiciones piezométricas:** La descarga rápida de material saturado de grano fino incrementa el nivel piezométrico, disminuyendo la tensión efectiva. Con el tiempo, el terreno consolida, permitiendo una disminución de la presión intersticial que hace aumentar la tensión efectiva y la estabilidad.
- **Características del material vertido:** El aumento de densidad que experimenta el material al colocar sobre él nuevas capas de vertido, produce un aumento en la estabilidad debido al incremento en la resistencia al corte. Si el vertido se realiza con altos ritmos de descarga, puede que no se guarde el tiempo suficiente como para conseguir la densidad y resistencia al corte adecuados como para asegurar la estabilidad.
- **Altura de vertido:** Para un ritmo de descarga dado (m/día), una mayor altura de vertido implica una mayor cantidad de material. Por tanto, la tensión del material vertido y de la cimentación será mayor.

3.4.4. Métodos y sistemas constructivos

En el diseño de una escombrera se deben tener en cuenta una serie de consideraciones para determinar las distintas zonas de vertido, así como maximizar la longitud de la cresta de la escombrera. Esta planificación presenta dos ventajas:

- Si aparece una superficie de rotura en una zona del depósito o la subsidencia de la cresta es excesiva, las operaciones en esta parte de la escombrera pueden ser suspendidas hasta alcanzar condiciones estables.
- Si se puede verter sobre una gran longitud de cresta de talud, el ritmo de avance disminuirá, reduciéndose la carga aplicada sobre la cimentación y la correspondiente generación de altas presiones intersticiales en la zona del pie. Un ritmo lento de avance también permite una mayor consolidación de los materiales y un aumento en su resistencia al corte.

Los tipos de escombreras que pueden distinguirse de acuerdo con la secuencia constructiva de las mismas en terrenos con pendiente, que es el caso más habitual, son cuatro: vertido libre, por fases adosadas, con dique de pie y por fases superpuestas, figura 3.14.

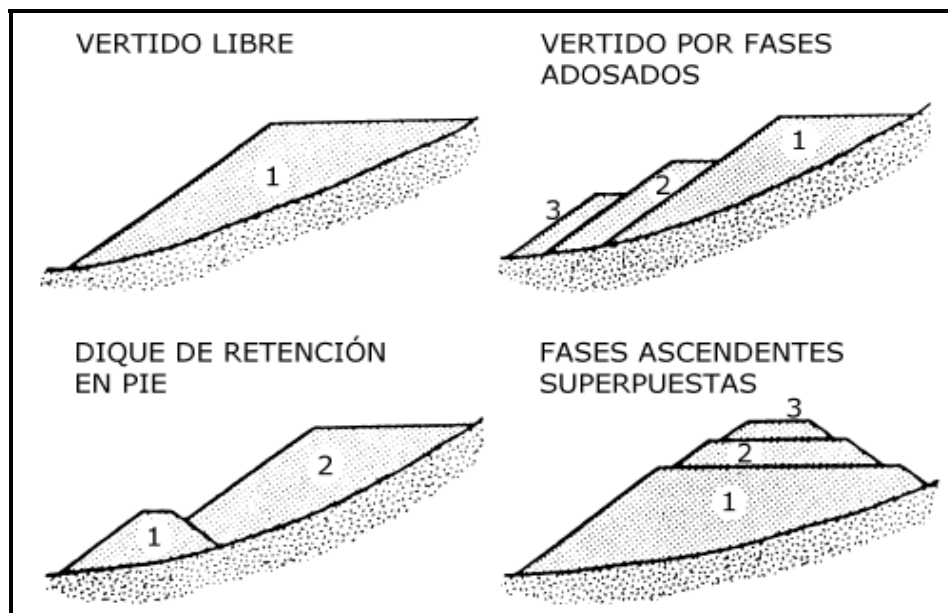


Figura 3.14 Tipos de escombrera según la secuencia de construcción

Fuente: Junta de Andalucía

La formación con vertido libre sólo es aconsejable en escombreras de pequeñas dimensiones y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras aguas abajo. Se caracteriza por presentar en cada momento un talud que coincide con el ángulo de

reposo de los estériles y una segregación por tamaños muy acusada. De los cuatro tipos es el más desfavorable geotécnicamente, aunque ha sido el más utilizado hasta épocas recientes.

Las escombreras con fases adosadas proporcionan unos factores de seguridad mayores, pues se consiguen unos taludes medios finales más bajos. La altura total puede llegar a suponer una limitación por consideraciones prácticas de acceso a los niveles inferiores.

Cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas, puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúen de muro de contención del resto de los estériles depositados. Esta secuencia constructiva es la que se suele seguir en aquellas explotaciones donde se extraen grandes cantidades de materiales arcillosos o finos, cuya deposición exigiría de otro modo grandes extensiones de terreno y presentaría un elevado riesgo de corrimientos, o cuando las condiciones de la base de apoyo no sean buenas.

El tipo de fases superpuestas y retranqueadas aporta una mayor estabilidad, ya que se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

Así pues, la secuencia constructiva de una escombrera incide directamente sobre la estabilidad de tales estructuras y sobre la economía de la operación, llegando a ser preciso en algunos casos una solución de compromiso entre ambos factores.

El recrecido de una escombrera debe realizarse de la manera más homogénea posible y de ello depende en gran medida la modalidad de vertido que se elija. Normalmente, los estériles se desplazan desde las minas hasta las escombreras por cintas transportadoras o por camiones, siendo habitual disponer de tractores para el extendido y empuje de estos materiales, así como el acondicionamiento del piso; aunque en algunos casos se realiza el vertido directamente desde los camiones hacia el talud de la escombrera, figura 3.15.

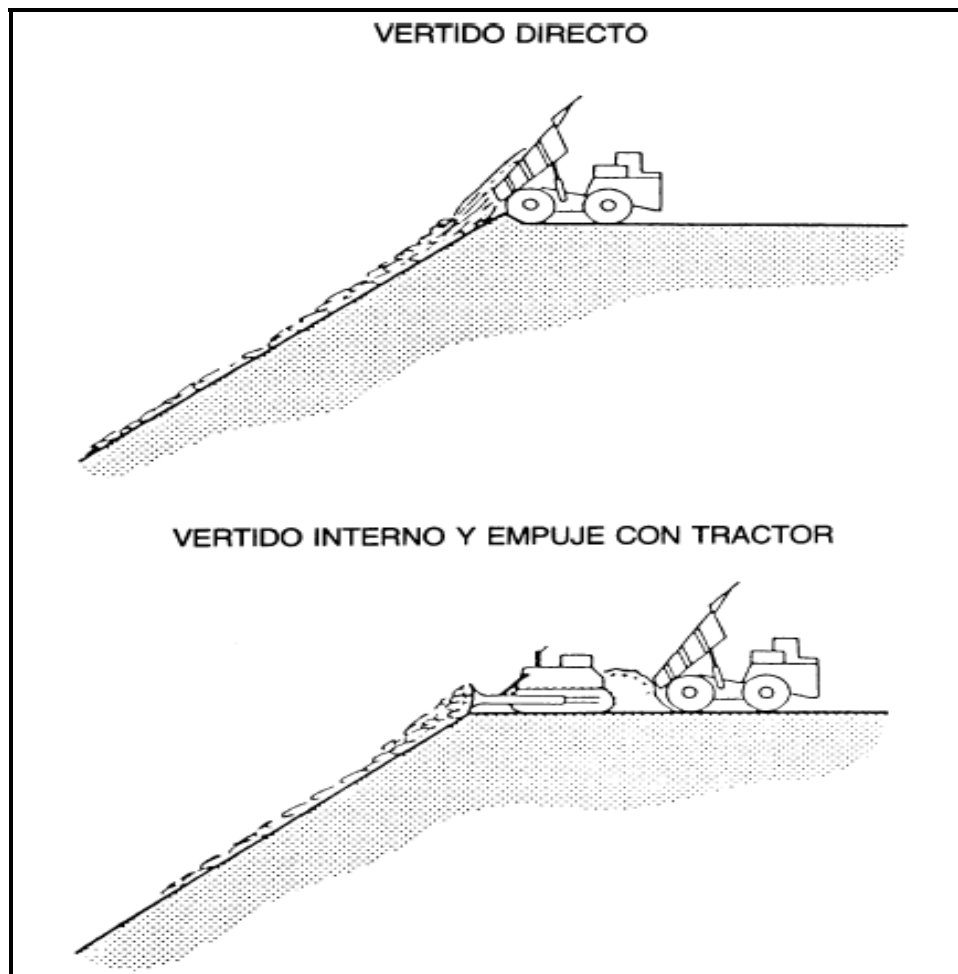


Figura 3.15 Métodos de vertido en escombreras

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia

Los tractores permiten operar en unas mayores condiciones de seguridad, ya que los camiones no tienen que posicionarse al borde de los taludes, mientras que en los casos en que se utilicen cintas, permite disminuir los alargamientos y los cambios de ubicación de las mismas. Al mismo tiempo, se aminora el fenómeno de segregación con respecto al que se produce con el vertido libre.

En estrecha relación con el procedimiento de vertido se encuentra el método de construcción, que puede ser por basculamiento final o en retroceso por terrazas, figura 3.16.

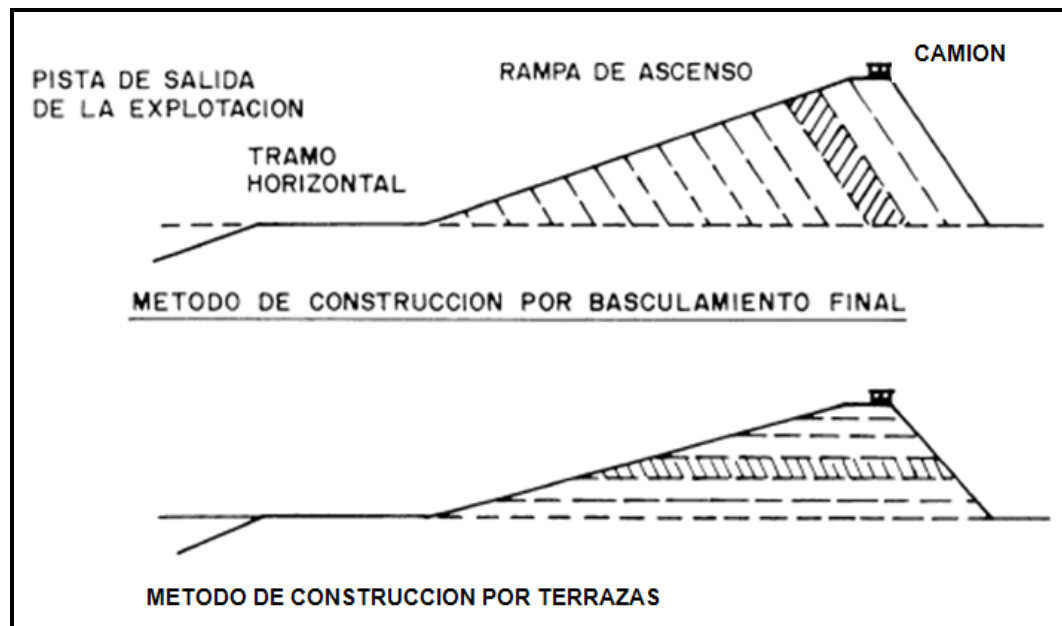


Figura 3.16 Métodos de construcción de escombreras

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia

El método de basculamiento final consiste en descargar los estériles desde una gran altura, consiguiendo las condiciones de drenaje por la segregación natural que sufre el material durante el descenso por rodadura. Los bloques grandes se encontrarán en el pie del talud, disminuyendo la granulometría en sentido ascendente.

Sin embargo, existen factores que impiden alcanzar las condiciones de estabilidad deseadas:

1. Con rocas friables o poco resistentes a los choques y rozamientos (pizarras o esquistos) no se produce una segregación clara y suficiente, que permita un correcto drenaje de la masa de material que sustentan.
2. Si el material es depositado en la plataforma de vertido y empujado hasta el borde del talud, se dificultará la diferenciación granulométrica y se crearán superficies planas compactadas y paralelas al talud general de avance, pudiendo actuar como planos de rotura por la escasa resistencia al corte en estas zonas.

3. El vertido por gravedad proporciona ángulos de reposo con un coeficiente de seguridad próximo a 1. En rocas sedimentarias estos ángulos se aproximan a 37° . Por ello, y con el fin de garantizar las condiciones de estabilidad durante lluvias prolongadas, se recomienda tener un talud general de unos 20° .

4. Las escombreras construidas con este método son más susceptibles a la erosión por las aguas de escorrentía a pesar de mantener taludes inferiores, pues las superficies son largas e ininterrumpidas, sin bermas o terrazas intermedias, y los taludes no pueden protegerse con vegetación hasta que se complete la construcción de la escombrera.

El método por terrazas consiste en depositar y compactar los estériles en capas, con lo que se aumenta notablemente la resistencia al corte y la capacidad de vertido, pues se reduce el efecto de esponjamiento.

Normalmente, la mayoría de las grandes escombreras se construyen en capas gruesas formando bancos con una altura vertical de 10 m o más. Estos bancos se realizan con el fin de minimizar la distancia vertical de transporte. La estabilidad de la escombrera se puede controlar a partir del espesor y longitud de las bermas y del espaciamiento vertical entre ellas. La construcción de escombreras en banco permite disminuir el ángulo del talud total.

Como también se puede apreciar en la figura 3.17, la construcción de una escombrera se puede realizar en sentido ascendente o descendente. La construcción ascendente es la más habitual debido a que, como cada capa se construye sobre otra anterior ya finalizada, su comportamiento será suficientemente conocido y documentado. Cualquier superficie de rotura se extenderá a través de las capas anteriores, por lo que este método también funciona como un refuerzo del pie del talud y produce un confinamiento del cimiento, además de proporcionar siempre terreno firme para el apoyo del pie del talud.

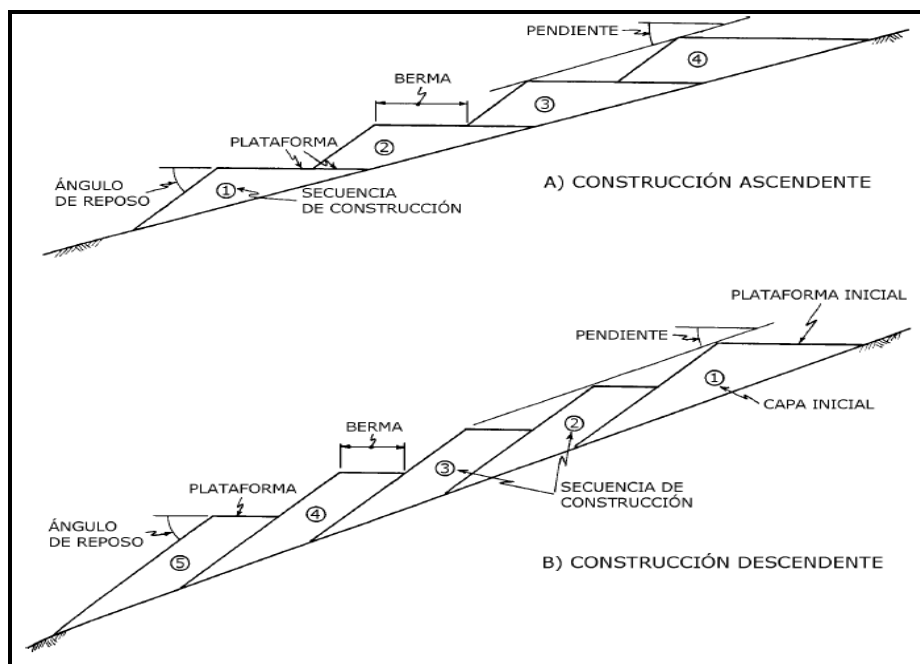


Figura 3.17 Construcción ascendente y descendente de escombreras

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia

3.5. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS

3.5.1. Generalidades

Los análisis de estabilidad de taludes tales como los que se realizan en las escombreras de estériles mineros, es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta tanto en su diseño como durante la construcción y vida útil del depósito. Con este fin, se han desarrollado diversos métodos, modelos y sistemas de evaluación de la estabilidad que ayudan a minimizar los errores y a garantizar la suficiente seguridad frente a posibles roturas.

En este sentido, cabe destacar que la estabilidad de taludes es analizada, normalmente, por los métodos denominados de equilibrio límite a partir de los datos de resistencia del suelo, sin tener en cuenta su comportamiento tensional, y dando como resultado un factor de seguridad. Por otro lado, para estimar la magnitud del movimiento de los taludes se recurrirá a la utilización de métodos de elementos

finitos, donde la definición de las tensiones sufridas por el suelo toma un papel muy importante. La aplicabilidad de estos y otros métodos de análisis de estabilidad es, en la mayoría de los casos, de carácter general, dándose aplicaciones de tipo particular y concreto en otros que serán posteriormente descritos.

La utilización de uno u otro método de análisis, vendrá definida por las características de la obra en estudio, tales como la geometría, el tipo de material de construcción o la presencia de agua, además de los parámetros que se deseen obtener en cada caso para determinar la estabilidad de las escombreras.

3.5.2. Factores que afectan la estabilidad

Existe una serie de factores que influyen sobre la estabilidad de una escombrera, entre los principales se pueden citar: configuración de la escombrera, pendiente del cimientado y grado de confinamiento, tipo de cimientado, propiedades del material vertido, método constructivo, condiciones climatológicas y piezométricas, ritmo de vertido y grado de sismicidad del lugar.

3.5.2.1. Configuración de la escombrera

El tamaño y la configuración de una escombrera tienen una relación directa sobre la estabilidad y el riesgo de rotura de la misma. Entre las variables geométricas a analizar está la altura de vertido, el volumen y el talud de vertido.

- **Altura de vertido.** Es la distancia vertical entre la cresta de la escombrera y la superficie del terreno sobre la cual está apoyada la escombrera. Este valor puede variar desde unos 20 m hasta superar los 400 m.
- **Volumen vertido.** Comúnmente expresado en m^3 banco, se agrupan en pequeño ($<1 Mm^3$), medio (1 a $50 Mm^3$) y grande ($> 50 Mm^3$).
- **Talud de vertido.** Es el ángulo que forma la horizontal con la línea que va desde la cresta hasta el pie de la escombrera. Para conseguir la estabilidad de la escombrera, y dependiendo del grado de cohesión del material vertido, este ángulo puede ir desde los 26° hasta los 37° .

3.5.2.2. Pendiente del cimientto y grado de confinamiento

Ambos factores proporcionan estabilidad a la escombrera. Existirá un menor riesgo de deslizamiento o rotura de la estructura cuando la pendiente del cimientto no supere los 10° y se coloquen rellenos de contención en el pie de la escombrera.

3.5.2.3. Tipo del cimientto

Debido a que es el punto de contacto entre las estructuras y el terreno, las condiciones del cimientto se configuran como el principal factor que aporta estabilidad a una escombrera. Se puede clasificar en tres tipos: competente (materiales resistentes), medio (suelo que gana resistencia por consolidación) y débil (suelos blandos con surgencias de agua).

3.5.2.4. Calidad del material vertido

Las propiedades de los materiales depositados en las escombreras, como clasificación granulométrica, durabilidad y resistencia, determinan su calidad y el grado de estabilidad de la escombrera. Se considera material de buena calidad cuando se refiere a rocas resistentes, poco alteradas y que contienen menos del 10 % de partículas finas.

3.5.2.5. Método de construcción

Generalmente las escombreras se construyen mediante una serie de plataformas en sentido ascendente o descendente. La ventaja de una secuencia ascendente es que el pie de cada plataforma estará soportado por la plataforma inferior, lo que favorece la estabilidad de la estructura. En la elección del método constructivo de una escombrera hay que tener en cuenta la distancia de transporte, la forma de vertido, el grado de accesibilidad, la capacidad disponible y la estabilidad requerida. Para mejorar la estabilidad de una escombrera se puede recurrir al aterrazado y a la formación de plataformas de poca altura con vertidos desde los contornos de la misma.

3.5.2.6. Condiciones piezométricas y climatológicas

La aparición de filtraciones en el cimiento y en el interior de la escombrera genera un riesgo potencial de desestabilización. Los climas lluviosos afectan de igual forma a la creación de superficies freáticas.

Si los niveles freáticos formados en el interior de la escombrera interceptan el ángulo de reposo del material, se pueden crear situaciones críticas que pueden desestabilizar la estructura. Para evitar esta situación, es conveniente realizar un estudio de las características del material y de las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas del lugar.

La generación de altas presiones intersticiales en el cimiento provocadas por el vertido, se pueden disipar mediante un adecuado diseño constructivo de la escombrera y la eliminación de materiales finos y blandos del cimiento.

3.5.2.7 Ritmo de vertido

Una causa de rotura de las escombreras es la debida a los ritmos intensos de vertido o de avance de la cresta, ya que generan una elevada presión intersticial en el cimiento y no hay tiempo suficiente para la consolidación de los materiales vertidos ni para desarrollar una adecuada resistencia que garantice la estabilidad de la escombrera.

3.5.3. Clasificación del grado de estabilidad de las escombreras. Índice INESTEC

Una forma de valorar el grado de estabilidad de una escombrera, consiste en asignar una puntuación a cada uno de los factores que afectan a la estabilidad de la misma, Tabla 3.12. En función de un intervalo de las distintas condiciones se hace una descripción cualitativa y se le puntúa según un rango de valores. El grado de estabilidad total de la escombrera se calcula sumando los valores individuales de todos los factores, la puntuación máxima que se puede alcanzar es 1800.

Teniendo en cuenta los diversos factores y sus interrelaciones se deben identificar las actuaciones desestabilizantes de una escombrera. Por sí solos estos factores no

permiten realizar una fácil valoración cuantitativa, por ello, la clasificación de estabilidad de la escombrera resulta bastante subjetiva. La clasificación presentada en la Tabla 3.12 es de uso fácil y considera un acertado rango de aplicación, pero, al ser un concepto nuevo, puede ser mejorado mediante ajustes y muestreos.

Tabla 3.12 Clasificación de estabilidad de escombreras

FACTORES PRINCIPALES QUE AFECTAN ESTABILIDAD		DESCRIPCIÓN O INTERVALO DE CONDICIONES		PUNTAJE
CONFIGURACIÓN DE LA ESCOMBRERA	Altura de vertido	Pequeña	< 50	0
		Media	50 m - 100 m	50
		Grande	100 - 200 m	100
		Muy grande	> 200 m	200
	Volumen vertido	Pequeño	< 1 Mm ³	0
		Medio	1 - 50 Mm ³	50
		Grande	> 50 Mm ³	100
	Talud de vertido	Tendido	< 26°	0
		Medio	26° - 35°	50
Escarpado		> 35°	100	
PENDIENTE DEL CIMIENTO		Suave	< 10°	0
		Medio	10° - 25°	50
		Escarpado	25° - 32°	100
		Extremo	> 32°	200

GRADO DE CONFINAMIENTO	Confinada	<ul style="list-style-type: none"> • Talud cóncavo en planta o perfil • Relleno de valle o vaguada, con berma de contención en pie • Aterrazado del cimiento de apoyo 	0
	Moderadam. confinada	<ul style="list-style-type: none"> • Banqueo natural o aterrazado del talud • Taludes variables, diversidad topográfica natural limitada • Vertidos en vaguadas, en fondo de valle, en ladera o exenta 	50
	No confinada	<ul style="list-style-type: none"> • Talud convexo en planta o perfil • Vertido en ladera o divisoria sin confinamiento • No aterrazado o banqueo en el desarrollo 	100
TIPO DE CIMIENTO	Competente	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales de la base de apoyo resistentes o muy resistentes frente a los estériles vertidos • No sometidos a presiones de poro adversas • Estructura geológica favorable 	0
	Medio	<ul style="list-style-type: none"> • Entre competente y débil • Suelo que gana resistencia con la consolidación • Presión de poros que se disipa con ritmo de carga controlada 	100
	Débil	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos blandos, capacidad portante blanda • Presión de poro adversa • Condiciones hidrológicas adversas • Resistencia sensible a esfuerzos cortantes, licuefacción potencial 	200

CALIDAD DEL MATERIAL VERTIDO	Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente y durable • Menos de 10 % finos 	0
	Media	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia media, durabilidad variable • 10 % al 25 % finos 	100
	Mala	<ul style="list-style-type: none"> • Predominantemente rocas débiles de baja durabilidad • Más del 25 % finos, estériles de cobertera 	200
MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN	Favorable	<ul style="list-style-type: none"> • Tongadas menores de 25 m, plataformas amplias • Vertido desde los contornos • Construcción ascendente • Banqueado a aterrazado 	0
	Combinada	<ul style="list-style-type: none"> • Tongadas entre 25 y 50 m • Mét. de construcción combinado 	100
	Desfavorable	<ul style="list-style-type: none"> • Tongadas grandes > 50 m, plataformas estrechas • Vertido libre siguiendo líneas de rotura del talud • Construcción descendente 	200
CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS	Favorables	<ul style="list-style-type: none"> • Presiones piezométricas bajas, sin filtraciones en cimentación • Aparición improbable de superficie freática • Precipitaciones bajas • Infiltración pequeña en la escombrera • Inexistencia de nieve o hielo en escombrera o cimienta 	0

	Medias	<ul style="list-style-type: none"> • Presión piezométrica media, algunas filtraciones en el cimiento • Posible desarrollo limitado de superficie freática en la escombrera • Precipitaciones medias • Alta infiltración en escombreras 	100
	Desfavorables	<ul style="list-style-type: none"> • Presiones piezométricas altas • Fuertes precipitaciones • Potencial alto de desarrollo de superficies freáticas o niveles de aguas colgadas en la escombrera 	200
RITMO DE VERTIDO	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> • Menor de 25 m³ por m lineal de cresta por día • Ritmo de avance de la cresta < 0,1 m por día 	0
	Medio	<ul style="list-style-type: none"> • De 25 a 200 m³ por m lineal de cresta por día • Ritmo de avance de la cresta de 0,1 a 1 m por día 	100
	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Más de 200 m³ por metro lineal de cresta por día • Ritmo de avance > 1,0 m por día 	200
SISMICIDAD	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> • Sismicidad baja 	0
	Medio	<ul style="list-style-type: none"> • Sismicidad media 	50
	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Sismicidad alta 	100
CALIFICACIÓN MÁXIMA POSIBLE DE ESTABILIDAD			1800

(Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia, 2007).

Para simplificar la clasificación de estabilidad de las escombreras en función al riesgo de rotura y el nivel de esfuerzo, se pueden agrupar en cuatro clases, Tabla 3.13. En esta tabla se presentan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar y construir una escombrera, ya que está basada en experiencias con las que se ha estudiado la probabilidad de inestabilidad o de rotura de las escombreras. Esta clasificación también ayuda a la evaluación y comparación de las

distintas alternativas de configuración y del lugar de emplazamiento de las escombreras.

Tabla 3.13 Clases de estabilidad de escombreras y actuaciones recomendadas

CLASE DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERA	RIESGO DE ROTURA	RECOMENDACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	CALIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE LA ESCOMBRERA (INESTEC)
I	Inexistente	<ul style="list-style-type: none"> • Reconocimiento básico del emplazamiento. • Escasos ensayos de laboratorio • Comprobación rutinaria de estabilidad, posiblemente usando ábacos • Restricciones mínimas en la construcción • Auscultación visual exclusivamente 	< 300
II	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> • Reconocimiento del emplazamiento general • Pueden requerirse pozos en el terreno y toma de muestras • Algunos ensayos de laboratorio • La estabilidad puede o no influir en el diseño • Se requiere análisis de estabilidad básico • Restricciones limitadas en la construcción • Auscultación con instrumentos y visual rutinaria 	300 - 600

III	Medio	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación del emplazamiento detallada • Pueden requerirse pozos, sondeos y otras investigaciones in-situ • Pueden necesitarse muestras inalteradas • Ensayos de laboratorio detallados, incluyendo propiedades índice, resistencia al corte, durabilidad, etc. • La estabilidad influye y afecta al diseño • Análisis de estabilidad detallado, requiriendo posiblemente un estudio paramétrico • Puede ser necesario un diseño detallado para su aprobación y certificado de clausura • Restricciones moderadas en la construcción (e.g. ritmo de vertido, altura de recrecimiento, calidad de materiales, etc.) • Auscultación con instrumentación amplia para confirmar el diseño, documentar el comportamiento y establecer límites de carga 	600 - 1200
-----	-------	--	------------

IV	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación del emplazamiento detallada • Pueden requerirse pozos y calicatas • Pueden necesitarse sondeos y posiblemente otras investigaciones in-situ • Se necesitan muestras inalteradas • Ensayos de laboratorio detallados, incluyendo propiedades índice, resistencia al corte, durabilidad, etc. • Consideraciones generales de estabilidad • Análisis de estabilidad detallado, requiriendo posiblemente un estudio paramétrico y posiblemente una evaluación completa de alternativas • Puede ser necesario un diseño detallado para su aprobación y certificado de clausura • Severas restricciones en la construcción (e.g. limitación en los ritmos de vertido, altura de recrecimiento) • Auscultación con instrumentos amplia para confirmar el diseño, documentar el comportamiento y establecer límites de carga 	> 1200
----	------	---	--------

Fuente: Ministerio de Energía y Minas de British Columbia

3.5.4. Evaluación de riesgos

El riesgo se puede definir como el producto entre la probabilidad de ocurrencia (azar) y la severidad de las consecuencias (exposición). El azar se mide en términos de frecuencia, en probabilidad de ocurrencia o en magnitud de eventos adversos, mientras que la exposición se mide en función al grado de cercanía, al período de exposición y al impacto potencial.

La evaluación del riesgo de una escombrera puede ayudar a mejorar su seguridad y las condiciones medioambientales porque previene y pone los medios para disminuir la probabilidad de accidentes por fenómenos internos (surgencias, escapes, asentamientos, roturas, etc.), o externos que, indudablemente, tienen un efecto negativo sobre el entorno.

Por lo general, en las escombreras existen dos fuentes de riesgo: la estabilidad física (rotura de la escombrera) y la estabilidad química (formación de aguas ácidas).

Según el tipo de actuación y el método de control del riesgo, se pueden agrupar en tres áreas: seguridad de personas y equipos, riesgo en instalaciones y riesgo medioambiental.

3.5.4.1. Seguridad de personas y equipos

Uno de los aspectos principales que afectan a la operación de vertido en una escombrera es la seguridad del personal y de la maquinaria. Por ello, el principal objetivo del diseño y de la secuencia constructiva es minimizar la probabilidad de ocurrencia de rotura. Aunque el grado de seguridad es mayor en grandes operaciones de vertido, un acertado diseño puede minimizar el riesgo y reducir el tiempo de exposición.

3.5.4.2. Riesgo en instalaciones

Tanto la mina como la planta de tratamiento que se encuentren emplazadas cerca a las escombreras, están expuestas a sufrir daños por posibles roturas de estas estructuras.

Por ello, es necesario realizar una evaluación del riesgo potencial en función del tamaño y forma de la escombrera, las distancias que alcanzarán los materiales en el caso de rotura y la probabilidad de impactar sobre las instalaciones (equipos móviles y fijos, balsas de sedimentación, diques de contención, etc.).

3.5.4.3. Riesgo medioambiental

En la valoración del riesgo potencial sobre el medio ambiente debido a la existencia de una escombrera, se deben considerar todos los escenarios posibles, incluida la evaluación del probable impacto resultante de la rotura de la misma en el caso más desfavorable.

3.5.5. Tipos de roturas de escombreras

Los fenómenos de inestabilidad más frecuentes observados en escombreras corresponden a los tipos siguientes:

- Deslizamientos superficiales, típicos de escombros sin cohesión. Normalmente, son rápidos y no suelen afectar a grandes volúmenes, salvo que se produzca una alteración sustancial de su geometría, por ejemplo, por socavación.
- Deslizamientos profundos, de tipo aproximadamente circular o mixto, con tramos paralelos a un contorno de base. Suelen tener una evolución en el tiempo condicionada por fenómenos de fluencia, rotura progresiva, etc., y, generalmente, afectan a masas importantes de escombros. Predominan en materiales con rozamiento y cohesión.

Los problemas de estabilidad general pueden venir forzados por el establecimiento de un nivel freático alto en el cuerpo de la escombrera, bien por cubrir surgencias naturales o por embalsarse agua en zonas de vaguada.

Las causas principales de inestabilidad suelen ser (Figura 3.18):

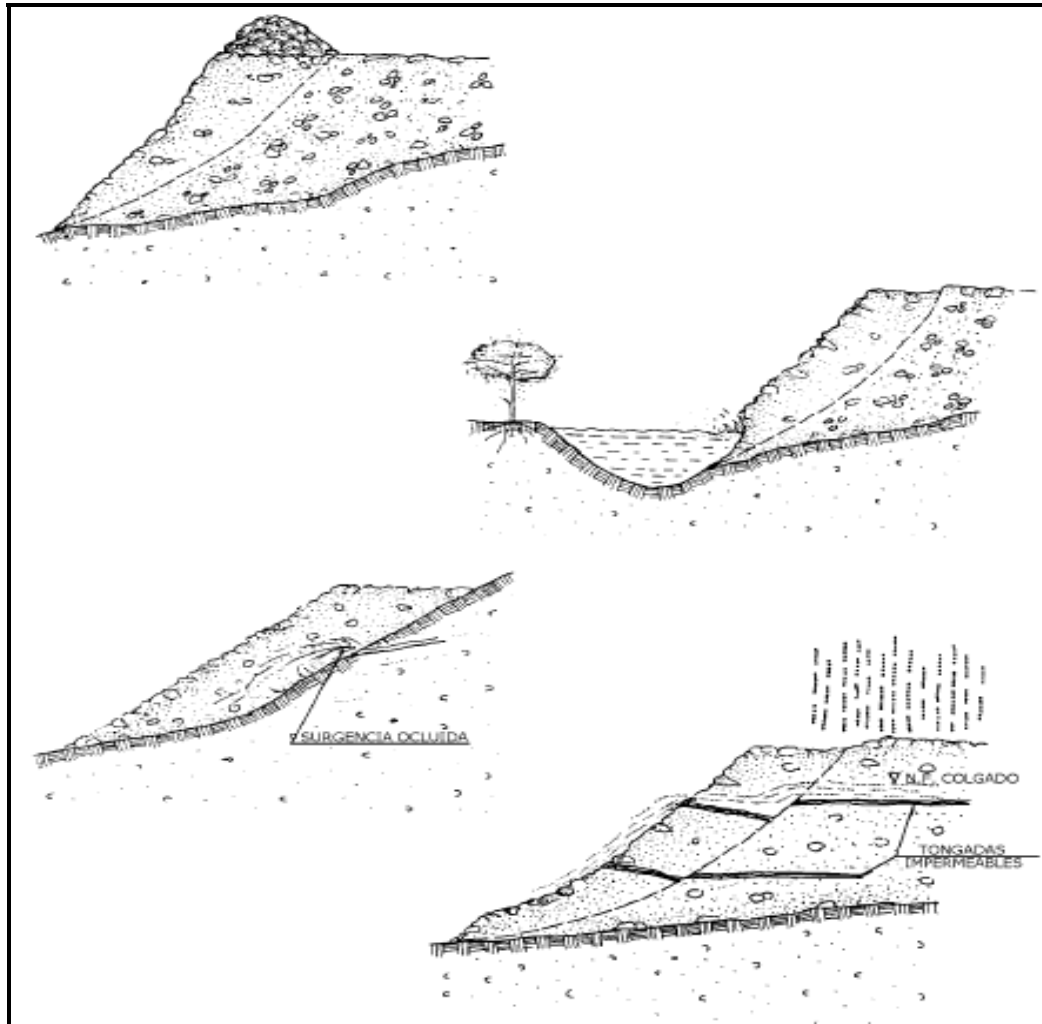


Figura 3.18 Causas de inestabilidad de escombreras

(ITGE, 2006)

- Sobrecarga anormal del borde de la escombrera, por ejemplo, acumulando descargas de dumpers sin proceder a su extendido.

- Creación de taludes más escarpados de los admisibles por excavación o recorte, erosión superficial, fenómenos de subsidencia, etc.
- Eliminación del soporte natural al pie de la escombrera, por ejemplo, por socavación fluvial, apertura de zanjas en el terreno de cimentación, etc.
- Creación de presiones intersticiales por ascenso del nivel freático al no existir sistema de drenaje o quedar inutilizado y, más frecuentemente, al ocluir cursos estacionales o surgencias.
- Erosión interna como consecuencia de la filtración generada por las causas anteriores.
- Inundación del pie de escombreras situadas próximas a cauces fluviales.
- Fenómenos dinámicos como voladuras, hinca de pilotes, impactos de vertido, etc.

Para seleccionar una apropiada técnica de análisis de estabilidad en escombreras así como para elaborar el programa de control, es necesario conocer la teoría básica sobre deformación y rotura de estas estructuras.

3.5.5.1. Rotura de borde

También conocida como rotura de cresta, este tipo de rotura se produce, generalmente, en escombreras con crestas de fuertes pendientes, con alto contenido de materiales finos y cohesivos, y cuando el ritmo de vertido ha sido rápido. En algunos casos ocurre en zonas de fuertes precipitaciones, donde se genera una importante presión intersticial en el material fino, así como la pérdida de la cohesión aparente.

La rotura de borde también puede ocurrir cuando el material de la escombrera es deleznable y crea una baja permeabilidad cuando es vertido por tongadas, permitiendo desarrollar una presión intersticial alta. Las altas precipitaciones y las fuertes pendientes también pueden iniciar la rotura de escombreras con materiales gruesos.

Por lo general, la rotura de borde ocurre debajo del área de la cresta, sin embargo, el cuerpo de la escombrera y el cimientto no se ven afectados.

Es más probable que se produzca la rotura de borde en escombreras construidas mediante vertido directo a grandes alturas y rápido crecimiento de la cresta, o cuando el material vertido contiene gran cantidad de finos y es degradable.

3.5.5.2. Rotura planar

La rotura planar consiste en el desplazamiento del material vertido a lo largo de un plano de debilidad situado en el interior de la escombrera. Si el plano de debilidad no corta el talud de la escombrera, la rotura se produce en el pie. Este plano de debilidad se crea durante la fase de construcción de la escombrera debido a la mala calidad del material o la presencia de gran cantidad de finos que forman una capa aproximadamente paralela al frente de vertido.

La alta presión intersticial en el interior de la escombrera también puede contribuir a la formación de la rotura planar y, si el plano de debilidad es paralelo a la superficie de vertido, la rotura es muy similar a la del caso de rotura de borde, excepto cuando la superficie de rotura es generada por un hundimiento interno de la escombrera y la rotura resultante es sustancialmente más pronunciada.

3.5.5.3. Rotura rotacional

Consiste en el movimiento del material vertido en la escombrera o el cimientto a lo largo de una superficie de rotura en forma circular o curvilínea, que puede estar provocada por rápidos ritmos de descarga y vertido de material débil o fino en la escombrera. Este tipo de rotura también puede iniciarse por las altas presiones intersticiales debido a la presencia de agua en el interior de la escombrera.

3.5.5.4. Rotura en flujo

Este tipo de rotura puede estar provocada por el deslizamiento de materiales saturados y derrumbamiento o colapso del talud de la escombrera. Generalmente, son

roturas de poca profundidad acompañadas de la fluidificación del material saturado, o parcialmente saturado, en la cresta o en el frente de la escombrera.

La saturación de los materiales de la escombrera, por lo general, se debe a las altas precipitaciones y la infiltración superficial, así como a las surgencias de agua en el interior de la escombrera.

El volumen y la velocidad del flujo del material pueden incrementarse pendiente abajo y, debido a la erosión de la base, la fuerza del flujo irá aumentando.

El riesgo de rotura por flujo será mayor cuando se trata de materiales de poca densidad, de rellenos flojos o compuesto por materiales finos.

3.5.6. Métodos de análisis de estabilidad

Para comprender el comportamiento de una escombrera, es fundamental un conocimiento adecuado de las condiciones del cimiento y de las propiedades del material. Basándose en estos conocimientos, se podrán estudiar diferentes alternativas para la configuración de la escombrera y una evaluación inicial del tipo de inestabilidad de la misma. Por lo tanto, los criterios de diseño se desarrollan tomando los resultados de los análisis de estabilidad como base.

El paso más importante en la etapa de análisis es la determinación del tipo de rotura crítica. En muchos casos, este tipo de rotura puede ser fácilmente hallada basándose en la configuración de la escombrera o en las propiedades del material. Sin embargo, cuando estos factores son más complejos, se debe realizar un análisis preliminar de los posibles tipos de rotura, fase donde los métodos gráficos son muy aconsejables debido a su rapidez.

Una vez que el tipo de rotura ha sido claramente definido, se llevará a cabo un análisis detallado utilizando cualquier técnica posteriormente detallada. En la mayoría de los casos, los resultados dados por los diferentes métodos son comparables, por lo que para cada caso existen varios métodos aplicables.

Cuando las condiciones de la cimentación y las propiedades de los materiales sean complejas y no estén bien definidas, se puede complicar la obtención fiable del mecanismo de rotura. Además, ciertos tipos de rotura se comprenden mejor que otros, algunas técnicas de análisis son muy complejas, y puede que no modelicen correctamente el caso en estudio. En estos casos, es conveniente realizar un diseño más conservador, con altos factores de seguridad y una geometría más conservadora.

Existe una gran variedad de métodos para el estudio de la estabilidad de taludes, aunque, en principio, se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Métodos de cálculo en deformaciones: tienen en cuenta las deformaciones del terreno, así como las leyes de la estática.
- Métodos de equilibrio límite: se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable.

Estos últimos se suelen dividir en métodos exactos y no exactos, dependiendo de la naturaleza de sus resultados. En la mayoría de los casos prácticos no aparece una solución exacta debido a la geometría de la superficie de rotura, y se deberá recurrir a simplificaciones o hipótesis previas. Además, un cálculo riguroso exigiría considerar la anisotropía de los escombros, las variaciones de resistencia con los niveles de tensiones en cada punto de la eventual superficie de deslizamiento, efectos de forma, etc. Por lo tanto, no está justificado tal refinamiento dado el tipo de estructura y la gran incertidumbre respecto a la naturaleza de los estériles y sus variaciones a lo largo de la vida de la estructura.

En general, los métodos de análisis también se pueden dividir en aquellos que tienen en cuenta las tensiones totales, donde no se considera la presión intersticial, por lo que serán aplicables a casos donde ésta sea desconocida o cuando el estudio se vaya a realizar a corto plazo, y los que tienen en cuenta las tensiones efectivas, que se considera el método más versátil y adecuado, aplicable a estudios a largo plazo donde las condiciones intersticiales sean conocidas.

Los métodos de equilibrio límite no exactos, a su vez, se subdividen en métodos que consideran el equilibrio global del terreno, y en métodos de fajas (rebanadas), que consisten en la división de la masa deslizante en fajas verticales en donde se realiza un estudio de estabilidad individual, y que representa el método más utilizado.

En particular, los métodos de fajas se pueden dividir en dos grupos:

- Métodos aproximados: en estos casos no se cumplen todas las ecuaciones de la estática. En este apartado se incluirán los métodos de Fellenius, Jambu y Bishop modificado.
- Métodos precisos: estos métodos cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los métodos de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop completo pertenecen a este grupo.

Se puede decir que los cálculos de estabilidad finalizan siempre con la determinación del Factor de Seguridad.

Si el valor obtenido está por debajo del exigido se procede a rediseñar geoméricamente la escombrera o a mejorar las condiciones de drenaje. En la Tabla 3.14 se indican los Factores de Seguridad mínimos para los diferentes escenarios posibles.

Tabla 3.14 Coeficientes de seguridad mínimos requeridos en el proyecto de escombreras

CASO I: Implantaciones sin riesgo para personas, instalaciones o servicios.			
H ≤ 15 m o V ≤ 25 000 m ³ , o H > 15 m en escombreras en manto Pueden constituirse con el ángulo de vertido de los escombros (F ≈ 1)			
	F2	F1	
15 < H ≤ 30 m	1,20	1,10	
H > 30 m	1,30	1,20	

CASO II: Implantaciones con riesgo moderado			
	F3	F2	F1
H ≤ 15 m o V ≤ 25 000 m ³ , o H > 15 m en escombreras en manto	1,20	1,15	1,00
15 < H ≤ 30 m	1,35	1,25	1,10
H > 30 m	1,45	1,30	1,15
CASO III: Implantaciones con riesgo elevado. Se proscriben las escombreras en manto sin elementos de contención o desviación al pie.			
	F3	F2	F1
H ≤ 20 m	1,40	1,20	1,10
H > 20 m	1,60	1,40	1,20

Fuente: ITGE, 2006

Con respecto a la tabla anterior se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Esta tabla corresponde a escombreras de la minería de carbón, realizadas de acuerdo con estas recomendaciones, relativamente homogéneas y en las que los finos cohesivos o de lavadero no influyen de manera apreciable en la estabilidad.
- Los coeficientes de seguridad corresponden a las situaciones siguientes:
F1: Escombreras normales, sin efectos de aguas freáticas y en cuya estabilidad no influye el cimienta
F2: Escombreras sometidas a filtración, agua en grietas o fisuras, y riesgo de deslizamiento por la cimentación.
F3: Situaciones excepcionales de inundación, riesgo sísmico, etc.
- Los valores de F indicados son para escombreras exentas o en ladera con inclinación de hasta el 8 %. En el caso de vaguadas encajadas (ancho máximo ≈ altura) puede admitirse una reducción del 10 %, llegando al 3 % para vaguadas con ancho máximo ≈ 2,5 veces la altura.

En laderas de inclinación superior al 8 % los coeficientes de F se incrementan en los valores siguientes:

CASO I: $F = 0,10$

CASO II: $F = (0,03(\alpha-0,08))^{1/2}$

CASO III: $F = (0,07(\alpha-0,08))^{1/2}$

siendo α la inclinación de la ladera en tanto por 1, con $\alpha \approx \Phi$.

Se supone que los parámetros geotécnicos se han determinado mediante ensayos. En el caso de estimación, éstas deben justificarse, mayorando los coeficientes de la tabla en un 10-15 %, según la fiabilidad de las estimaciones.

3.5.6.1. Método del equilibrio límite (M.E.L.)

Los métodos de equilibrio límite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una superficie de rotura. Se basa en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- La definición de “Coeficiente de seguridad”.

Los problemas de estabilidad son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Así mismo, se asumen las siguientes condiciones:

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.).

- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Con estas condiciones, se establecen las condiciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del factor de seguridad del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o limite entre las fuerzas que actúan. Es decir, el coeficiente F por el que deben dividirse las fuerzas tangenciales resistentes (o multiplicarse las fuerzas desestabilizadoras) para alcanzar el equilibrio estricto:

$$F = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Fuerzas desestabilizadoras

Una vez evaluado el coeficiente de seguridad de la superficie supuesta, es necesario analizar otras superficies de rotura, cinemáticamente posibles, hasta encontrar aquella que tenga el menor coeficiente de seguridad, F_{\min} , la cual se admite como superficie potencial de rotura del talud, y F_{\min} se toma como el correspondiente al talud en cuestión.

Las fuerzas actuando sobre un plano de rotura o deslizamiento potencial, suponiendo que no existen fuerzas externas sobre el talud, son las debidas al peso del material, W, a la cohesión, c, y a la fricción, Φ , del plano. El coeficiente de seguridad viene dado por:

$$F = (Rc + R\Phi) / S$$

Siendo:

$$Rc = \text{fuerzas cohesivas} = cA$$

$$R\Phi = \text{fuerzas friccionales} = W \cos\alpha \operatorname{tg}\Phi$$

$$S = \text{fuerzas que tienden al deslizamiento} = W \operatorname{sen}\alpha$$

$$A = \text{área del plano de rotura}$$

En caso de existir presión de agua sobre la superficie de rotura, siendo U la fuerza total debida al agua sobre la superficie A:

$$R\Phi = (W \cos\alpha - U) \operatorname{tg}\Phi$$

Existen varios métodos para el cálculo del coeficiente de seguridad por equilibrio límite, más o menos complejos, desarrollados fundamentalmente para su aplicación a materiales tipo suelo. Los métodos analíticos proporcionan el coeficiente de seguridad a partir de la resolución inmediata de ecuaciones simples (método de Taylor, de Fellenius), mientras que los métodos numéricos necesitan, para su resolución, sistemas de ecuaciones y procesos de cálculo iterativo; en esta categoría se encuentran los métodos de Morgensten y Price, de Spencer, etc.

Los métodos de equilibrio límite se clasifican en:

- Métodos que consideran el análisis del bloque o masa total.
- Métodos que consideran la masa dividida en rebanadas o fajas verticales

Mientras que los primeros son validos para materiales homogéneos, y únicamente realizan el computo y la comparación de fuerzas en un punto de la superficie de rotura, los segundos pueden considerar materiales no homogéneos, y conllevan una serie de hipótesis propias sobre la localización, posición y distribución de las fuerzas que actúan sobre las rebanadas; el calculo de las fuerzas actuantes se hace para cada una de las rebanadas en que se ha dividido el talud, integrándose finalmente los resultados obtenidos. Los métodos de rebanadas mas comunes son el de Bishop modificado y el de Jambu, valido para el análisis de roturas curvas el primero y de roturas curvas, planas y poligonales el segundo.

3.6 ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación se presentan las características de los ensayos de mecánica de rocas de Carga Puntual y Corte Directo en Roca. Estos procedimientos están normalizados por la I.S.R.M. (INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, por sus siglas en inglés), y fueron adaptados en el año de 1995 por el Ing. Pietro De Marco,

según los equipos pertenecientes al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Universidad Central de Venezuela.

3.6.1. Ensayo de Carga Puntual

Este ensayo se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca o de testigos cilíndricos por sondeos. El parámetro obtenido en este ensayo es el índice I_s y es correlacionable con la resistencia a la compresión simple del material ensayado. Estos datos de resistencia a la compresión simple se pueden obtener aplicando a la muestra una compresión axial y longitudinal.

En rocas duras el registro de la distancia (D) será suficiente para el cálculo de I_s . Sin embargo, en muestras débiles, las puntas de carga pueden penetrarla o marcarla, por lo que deberá registrarse la distancia (D') en el momento de la falla. Algunos investigadores recomiendan tomar la medida (W) como la mínima dimensión de la superficie de rotura después del ensayo o la falla.

La longitud del testigo debe de ser como mínimo 1,5 veces el diámetro de la misma y consiste en presionar una muestra entre 2 puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa hasta lograr la rotura del material. El índice I_s se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

Donde:

P = Carga de rotura

D = Diámetro de la probeta o altura de la muestra (distancia entre puntas)

La correlación entre el I_s y la resistencia a la compresión simple de la roca (σ_c) es la siguiente:

$$\sigma_c = f \times I_s$$

Donde:

f varía según el diámetro de la muestra.

Para un diámetro de 50 mm, $f = 23$.

Para muestras con diámetros diferentes a 50 mm se debe corregir el valor de I_s utilizando el ábaco mostrado en la figura 3.19.

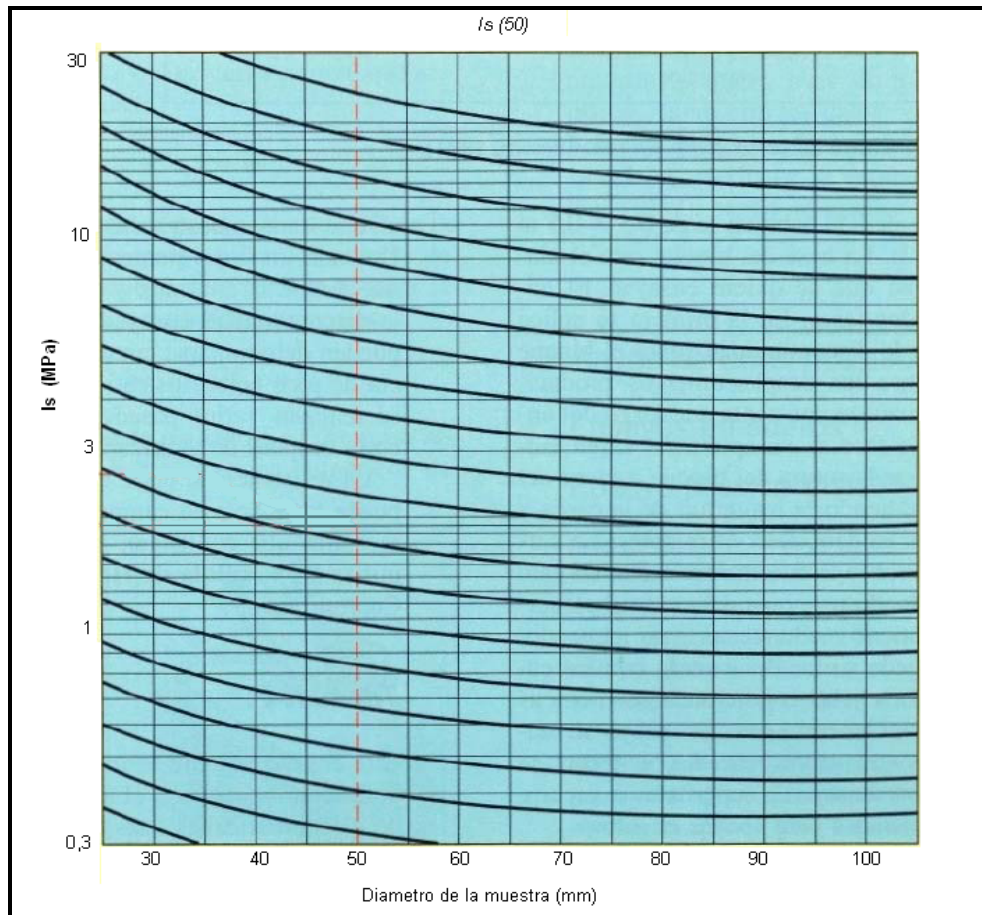


Figura 3.19. Ábaco de corrección del índice I_s (50)

Fuente: ISRM (1981)

3.6.2. Ensayo de corte en discontinuidades

Este ensayo se utiliza para determinar la resistencia al corte pico y residual en discontinuidades, en función de los esfuerzos normales aplicados sobre el plano. Consiste en aplicar esfuerzos tangenciales en una muestra hasta provocar el

desplazamiento relativo entre sus planos de discontinuidad. La carga normal aplicada (σ_n) permanece constante a lo largo del ensayo. A partir de los datos del ensayo y desplazamientos producidos se obtienen los parámetros resistentes c y ϕ de la discontinuidad, tanto los valores pico como los residuales.

El bloque o núcleo de roca a ensayar debe obtenerse por métodos que eviten en lo posible la perturbación de la muestra y su tamaño debe ser tal que permitan su acomodo en el molde de montaje y un encapsulamiento adecuado.

Se recomienda el uso de muestras preferiblemente cuadradas con un área de corte mínima de 2.500 mm^2 y una altura de 40 mm. Para el caso de núcleos, se sugiere utilizar aquellos provenientes de perforaciones de diámetro NX o 54 mm, con una longitud igual o superior que el diámetro.

3.6.2.1. Tratamiento de la muestra

Para este ensayo se emplea una caja de corte desmontable en dos mitades. Se coloca la muestra en el molde inferior de manera que la superficie de la discontinuidad quede centrada, orientada horizontalmente y sobresalga unos 5 mm por encima del molde.

Se vierte en el molde el material de encapsulamiento, hasta alcanzar su tope y esperar el fraguado. El espesor de empotramiento de cada parte de la muestra en el material de encapsulamiento será por lo menos el 20 % de la longitud del bloque ensayado y nunca menor de 10 mm.

Para preparar el molde para la segunda mitad de la muestra, se agrega arena de grano fino tratando de cubrir la discontinuidad, dejando aproximadamente 1 cm de espesor. Todo esto a fin de que ésta se encuentre libre de obstáculos al momento de realizar el ensayo.

Colocar el molde con la primera parte de la muestra en forma invertida (ya fija) sobre el segundo molde, de manera que la porción de muestra restante quede embebida en el material de encapsulamiento según las mismas indicaciones especificadas para la primera porción

Esperar el fraguado, desmontar cuidadosamente las muestras de los moldes, identificarlas e indicar la dirección de corte en el material de fijación.

3.6.2.2. Procedimiento

Colocar la muestra en la base inferior de la caja de corte, orientada según la indicación correspondiente y cubrir con la parte superior. Colocar los dispositivos para aplicación de la carga (cables, mangueras hidráulicas).

Colocar los flexímetros para medición de las deformaciones normal, de corte y lateral.

Aplicar la carga normal hasta el valor especificado para el ensayo y registrar el desplazamiento normal. Las muestras húmedas o con relleno en el plano de corte deberán ser sometidas a una etapa de consolidación, la cual se considerará completa cuando la variación en el desplazamiento normal sea inferior de 0,05 mm en 10 min.

Aplicar carga de corte en forma continua, con un incremento de esfuerzos constante (del orden de 0,25 kg/cm²) registrando los desplazamientos para cada incremento, hasta alcanzar la resistencia pico. (Deben tomarse por lo menos 10 lecturas antes de la rotura). La velocidad de aplicación de la carga debe ser tal que permita realizar las lecturas cómodamente y no debe ser superior a 0,1 mm/min en esta etapa. Esta velocidad puede ser incrementada a unos 0,5 mm/min entre lecturas, siempre que el valor de la resistencia pueda ser adecuadamente registrado.

Luego de alcanzar la resistencia pico, las lecturas pueden ser tomadas en incrementos que pueden variar entre 0,5 y 5 mm de desplazamiento de corte, seleccionando el valor más conveniente para la definición adecuada de la curva esfuerzo-desplazamiento. La velocidad de los desplazamientos de corte, en esta fase del ensayo, será de 0,5 a 1 mm/min.

Si se desea establecer la resistencia residual, se continuará con las lecturas hasta alcanzar por lo menos 1 cm de desplazamiento de corte. En este intervalo se registrarán 4 mediciones, las cuales no deben mostrar una variación mayor a 5 % en el valor de resistencia cortante, para satisfacer la condición residual.

Habiendo establecido la resistencia residual, el esfuerzo normal puede ser incrementado o reducido y puede continuarse el corte para obtener los valores de resistencia residual para diferentes esfuerzos normales. Para alcanzar el desplazamiento necesario, pudiera ser necesario tener que invertir la dirección de corte o regresar la muestra a su posición inicial, sin embargo esta práctica no es conveniente. Es recomendable el uso de muestras diferentes para la determinación de las resistencia pico y residual, para cada esfuerzo normal aplicado.

Una vez finalizado el ensayo, retirar los flexímetros, descargar los gatos y desmontar la caja de corte.

Retirar la muestra, exponer el plano de corte y describirlo detalladamente.

Determinar el área de la superficie de corte tomando sus dimensiones con una aproximación de 0,1 mm.

Se recomienda realizar por lo menos cinco ensayos para la misma discontinuidad, ensayando cada muestra a un esfuerzo normal diferente, pero constante.

Para calcular el esfuerzo normal y de corte, para cada una de las lecturas efectuadas, se utilizan las siguientes expresiones:

$$\sigma_n = \frac{P_n}{A} \quad \text{y} \quad \tau = \frac{P_c}{A}$$

Donde:

P_n = Fuerza normal aplicada, en kg o N

P_c = Fuerza de corte aplicada, en kg o N

A = Área de superficie de corte, en cm^2 o mm^2

Luego graficar para cada muestra la curva esfuerzo de corte vs desplazamiento de corte, indicando el esfuerzo normal aplicado y los valores de resistencia pico y residual.

CAPITULO IV

EVALUACION DE SOFTWARES

4.1. SOFTWARE AUTOCAD LAND DEVELOPMENT DESKTOP 2005 (LDD)

Es un programa que facilita la gestión de proyectos, el tratamiento de puntos topográficos, el diseño de alineaciones, la creación de superficies, obtención y dibujo de perfiles, el cálculo de volúmenes, herramientas de etiquetado y parcelación. La pantalla de inicio del programa se puede observar en la figura 4.1.

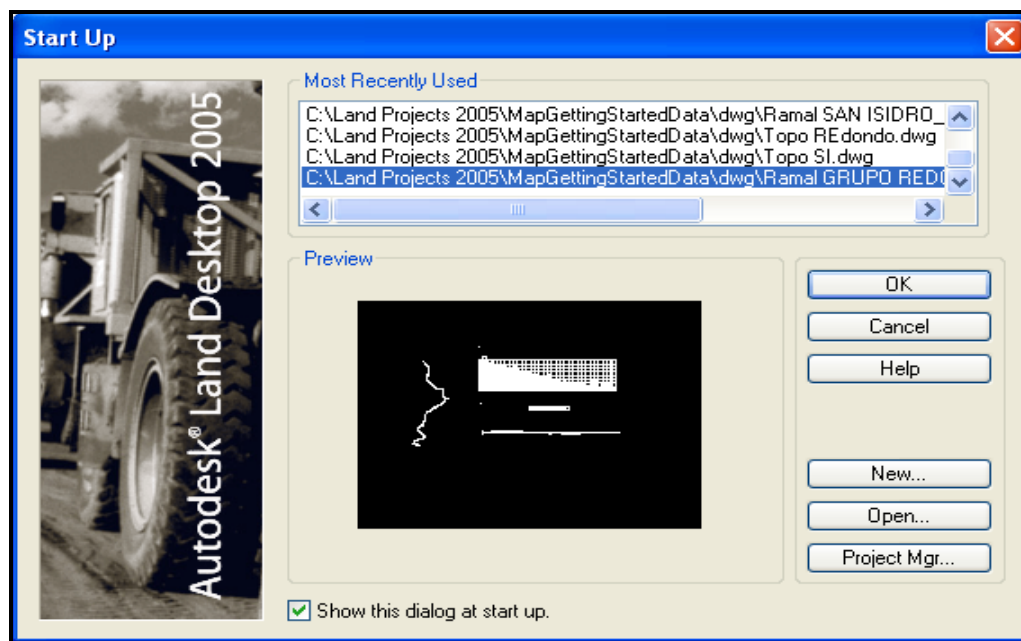


Figura 4.1 Pantalla de inicio del programa Land Development Desktop 2005.

Entre las funciones de Autocad Land Development Desktop 2005 destacan las presentaciones múltiples, los alineamientos multiusuario, la interfaz de Modelo de Objeto (OMI), los grosores de línea en pantalla, las órdenes de ajuste de pendiente para puntos y curvas de nivel, así como el soporte de un mismo entorno para el

diseño y el proyecto. Este programa permite reducir la cantidad de pasos que el usuario debe dar, facilitando su uso, agilizando su rendimiento, mejorando su productividad y permitiendo crear dibujos de la máxima calidad. Además, contiene órdenes de gestión de proyectos que facilitan la organización de archivos y de la información del plan para su transferencia. La solución completa de este paquete informático está compuesto por tres productos: Autocad Land Development Desktop 2005 (en adelante LDD), Autodesk Civil Design y Autodesk Survey. Todos ellos están desarrollados empleando la tecnología sobre Autocad MAP 3, por lo cual, el proceso para el desarrollo de un proyecto completo, de forma simplificada, consisten en procesar los datos de la libreta de campo con Survey, diseñar las alineaciones y crear el modelo digital con LDD, definir las superficies y los límites de cálculo con Civil Design para obtener los resultados de la cubicación. Es por esto, que se describe a continuación los cada uno de los módulos:

4.1.1. Autodesk Survey

Es un módulo de extensión para Autocad Land Development Desktop 2005, centrado en la entrada, reducción y análisis de información de puntos del terreno, cálculo de trabajos de campo, la compensación de poligonales y las herramientas de dibujo (Coordinate Geometry: COGO); que se puede descargar automáticamente desde estaciones totales del sector, instrumentos y receptores de sistemas de posicionamiento global GPS permitiendo funciones como la automatización de capacidades cartográficas del programa Autocad (Autodesk, 2005).

4.1.2. Autodesk Civil Design (CD)

Es un programa que amplía Autocad Land Development Desktop 2005 proporcionándole capacidades de diseño centradas en proyectos de ingeniería civil, desde la parte de transporte hasta medio ambiente, pasando por los servicios públicos e infraestructuras. Incluye funciones específicas como el nivelado de plataformas para instalaciones, el trazado de planos de carreteras (perfiles y secciones), el diseño y cálculo de rasantes, explanadas, perfiles longitudinales completos con peraltes y

acuerdos verticales, definición de secciones constructivas, cálculo y dibujo de perfiles transversales, modelos matemáticos de hidrología, redes de tuberías, redes de saneamiento y de alcantarillados, etc., que lo convierte en una solución única para muchos tipos de tareas de ingeniería (Autodesk, 2005).

4.1.3. Características del LDD

4.1.3.1. Gestión de proyectos

LDD dispone de un gestor de proyectos (Project Manager) que facilita la ordenación de la enorme cantidad de información y multitud de ficheros, que resulta de un proyecto. Mediante un asistente, se debe ir rellenando parámetros tales como: unidades de medida de distancias y ángulos, escalas de dibujo, sistema de coordenadas, proyección empleada, alturas de texto, etc.; es decir, en ocho pasos se tendrá configurado el proyecto, y estas medidas se podrán grabar para usarlos en trabajos futuros.

El Project Manager asimismo dispone de utilidades para copiar, borrar y renombrar proyectos, examinar los ficheros pertenecientes a cada uno, bloquear archivos para evitar modificaciones por otros usuarios, etc. Los diálogos de Autocad de crear nuevo dibujo y abrir dibujo pueden ser reemplazados por otros en los que se tiene en cuenta el proyecto (Autodesk, 2005).

4.1.3.2. Puntos Topográficos

El primer paso tras configurar el proyecto es importar los puntos. Inicialmente se debe decidir si se desea que los puntos se identifiquen por su número o por su código. La procedencia de los puntos puede ser de los resultados obtenidos por Survey, importando ficheros ASCII procedentes de otros programas, convirtiendo un dibujo existente, o incluso accediendo a una base de datos.

Para el caso más habitual, que será el de importar un fichero, se dispone de un gestor de formatos (Format Manager), que permite seleccionar una configuración ya establecida o bien definir una nueva, pudiendo trabajar con archivos encolumnados o

usando separadores de campos. Las opciones de importación, por otra parte, permiten especificar si se quiere que los puntos se numeren automáticamente, la acción de ejecutar cuando hay puntos repetidos, etc. Se puede personalizar completamente la apariencia de los puntos: tipos de marcador, color y tamaño de sus atributos, visibilidad, etc., tanto individualmente como de forma global.

Otra característica interesante que ofrece LDD es el gestor de grupos de puntos, que permite crear conjuntos de puntos que tengan alguna propiedad en común. Podemos crear grupos de relleno, puntos informativos, puntos a replantear, o bien separar distintas fases de evolución de un terreno. Estos grupos serán usados posteriormente en la creación del modelo digital y otras tareas.

Se han implementado multitud de comandos para la edición de la nube de puntos, tales como insertar, borrar, mover, trasladar, girar, renumerar, etc. También se emplean los comandos que Autocad para la edición, aunque en este caso se debe tener más precauciones para garantizar la correspondencia entre el dibujo y la base de datos.

LDD dispone igualmente de multitud de herramientas de creación de puntos: a partir de vértices de polilínea, a lo largo de alineaciones, interpolando puntos en superficie, por intersección inversa, etc.

4.1.3.3. Superficies

Según el manual de Autodesk (2005), una de las mejores cualidades de LDD es su gestor de superficies (Terrain Model Explorer). Con una apariencia muy similar al explorador de Windows, podemos definir varias superficies en un mismo proyecto, y calcular volúmenes entre ellas.

Una superficie se compone de grupos de puntos, ficheros de puntos, curvas de nivel, líneas de ruptura y líneas de contorno. Tras incluir los puntos importados anteriormente, se debe especificar cuáles son las líneas de rotura que serán procesadas. Estas líneas son muy importantes, ya que señalan los cambios de pendiente del terreno, de forma que éste se reproduce con la mayor fidelidad posible.

Existen multitud de métodos para definir las superficies: por punto o número de punto, por polilínea, por líneas de 3D, por fichero, etc.

Si se desea se puede especificar el contorno que delimita la superficie a crear, así como “islas” o agujeros en los que no se quiere representar, tales como edificaciones, etc. Es por esto, que se puede construir la superficie, al especificar los puntos que deseamos utilizar, las cotas mínimas y máximas válidas, si se quiere o no considerar líneas de ruptura o contorno, etc. Una vez completado el proceso, que es asombrosamente rápido, aparece a continuación en el explorador de Modelo de Terreno información estadística sobre la superficie. Donde se obtiene una vista rápida para después ejecutar una triangulación como líneas, caras 3D o malla de polícaras para su visualización.

Otro método diferente para crear una superficie es cuando se parte de curvas de nivel en 3D. En este caso, el explorador de modelos de terreno, y dentro del apartado Contours se elige añadir datos de curvas de nivel, seleccionando objetos. Los puntos son creados usando criterios de filtrado por distancia y ángulo, de forma que el resultado sea lo más fiel posible al terreno original sin crear un número excesivo de puntos. Con este propósito también es posible, una vez construida la superficie, minimizar los triángulos planos que hayan podido crearse.

4.1.3.4. Curvas de Nivel

Como se sabe, para este tipo de programas la generación de curvas de nivel es un paso opcional, ya que con el modelo digital el terreno queda completamente definido, permitiendo la obtención de perfiles, cálculo de volúmenes, etc. Sin embargo, para crearlas se debe elegir el estilo a usar en su representación mediante el Contour Style Manager, en el que se especifica el nivel de suavizado y método a emplear, los colores, capas y estilos de texto para las etiquetas, la situación de éstas, etc..

Una vez determinados todos los parámetros, se procede a crear las curvas, pudiendo controlar las cotas mínimas y máximas, los intervalos para las curvas normales y directoras, etc. Ahora se genera automática o manualmente las etiquetas de las curvas

de nivel, dibujándolas en los extremos de las curvas o bien en su interior. Por último, existen otras utilidades para ayudar al usuario a digitalizar curvas de nivel, localizar curvas con cota cero, cambiar elevaciones, etc.

4.1.3.5. Perfiles

Dentro de Autocad Land Development Desktop 2005 también se puede encontrar utilidades de cálculo y dibujo de perfiles longitudinales, aunque se necesita el módulo Civil Design si se quiere trabajar con rasantes y perfiles transversales.

Hay varias formas de obtener perfiles de una o varias superficies previamente creadas. La más fácil es crear una vista dinámica, que consiste en una ventana flotante e interactiva que representa el perfil del terreno a lo largo de un eje con tramos rectos que se han definido previamente.

Otra posibilidad es dibujar una serie de cortes, a los que se le deben asignar etiquetas, después procesarlos, y por último importarlos al dibujo, que representará el terreno natural con la distancia al origen en el eje de abscisas y la cota de ordenadas. Completaremos el dibujo con una rejilla con intervalos horizontal y vertical especificados por el usuario.

4.1.3.6. Volúmenes

LDD dispone de tres métodos para calcular el volumen entre dos superficies por: diferencia de mallas (grids), secciones o modelos digitales. En primer lugar se debe definir un estrato o pareja de superficies entre las que se va a calcular el movimiento de tierras, y a continuación se delimita la zona a procesar, que puede ser todo o parte de las superficies originales. Además, es necesario especificar las unidades empleadas en cálculo, capas, estilos de texto y dimensiones de la celda.

- **Método de la Cuadrícula (“Grid Method”)**

Este método de cálculo crea una superficie nueva, compuesta por una malla o cuadrícula rectangular que se genera de la intersección entre ambas superficies de trabajo. Este método utiliza la sumatoria del volumen prismoidal de todas las

cuadrículas. El método es el más exacto cuando el espaciado de cuadrículas es ideal (ver figura 4.2).

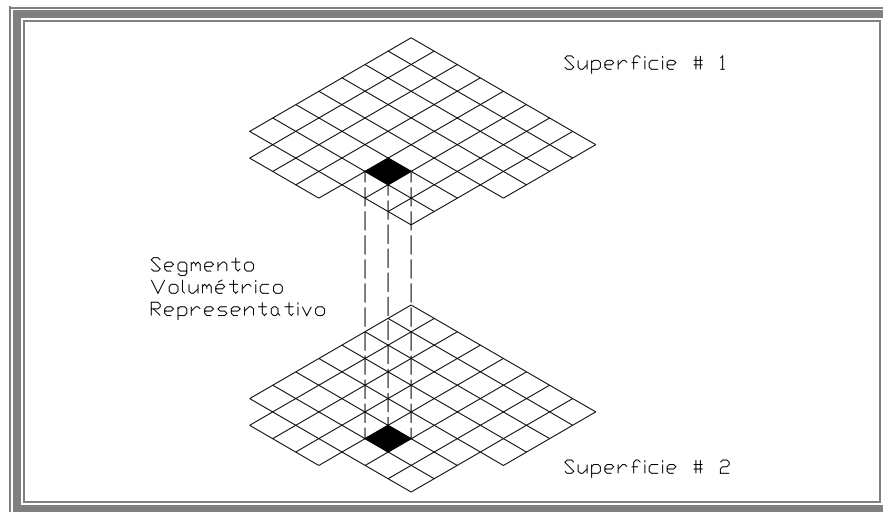


Figura 4.2 Método de la Cuadrícula

Fuente: León, 2004

El método de Cuadrícula divide el sitio en una serie de células de cuadrícula en filas y columnas que son determinadas por el mando del usuario en el sitio definido. Este método utiliza M y N (largo x ancho), tamaños definidos por el usuario para determinar las dimensiones de las células de la cuadrícula, se prueban las elevaciones en las esquinas (o nodos de cuadrícula) de cada célula de la superficie propuesta, esto divide la cara resultante en dos prismas triangulares. Si cualquier esquina de las células cae fuera de la superficie, entonces el área de célula entera es desechada y el programa dividirá las células en objetos prismoidales individuales.

- **Método de Volumen Compuesto (“Composite Volumen”)**

Este método de cálculo crea una superficie nueva, compuesta por una malla triangular, que se genera de la intersección entre ambas superficies de trabajo.

Cuando se calcula los volúmenes por este método, en vez de usar una cuadrícula, el método Compuesto triangula una nueva superficie basada en puntos de ambas superficies.

Este método usa los puntos de ambas superficies, así como cualquier posición (ubicación) donde los bordes de los triángulos entre las dos superficies se cruzan. El programa entonces calcula las nuevas elevaciones compuestas superficiales basadas en la diferencia entre las elevaciones de las dos superficies.

Este método es el más exacto de los tres según el manual del software, dando el volumen exacto entre dos superficies definidas.

4.1.3.7. Visualización

Otras operaciones que se realizan con superficies son: el dibujo de mapas de alturas y de pendientes como caras 3D, sólidos o policaras, pudiendo controlar los colores asignados a los diferentes rangos.

Por medio de Object Viewer se visualiza de forma interactiva y tridimensional un conjunto de objetos en una ventana independiente, pudiendo ampliar y reducir, alterar el punto de vista, cambiar a modo de perspectiva, generar sombras, renderizar, almacenar vistas, salvar como bitmap, etc.

Otras posibilidades de interés para determinados usuarios son el dibujo de la caída del agua desde un punto determinado, proyectar objetos, acotar puntos destacados, etc.

4.1.3.8. Alineaciones

Otro de los aspectos en los que Autocad Land Development Desktop 2005 ayudará a los diseñadores de obras lineales es el de las alineaciones. LDD incorpora una buena herramienta para los trabajos de diseño con alineaciones. Ofreciendo comandos para dibujar y encajar líneas, curvas y clotoides, y posteriormente convertirlas a un estado de alineaciones, que será procesado por Civil Design.

El dibujo de líneas contiene comandos para dibujar a partir de coordenadas, números de punto, distancia y ángulo, paralelas, tangentes, perpendiculares, etc. Para las curvas se dispone, por otra parte, de herramientas para crear curvas entre dos rectas, que pase por un punto, curva desde el extremo de un objeto, curva que mejor se adapte a un conjunto de puntos, etc.

Después de dibujar de forma independiente las líneas y curvas, se pueden enlazar para convertirlas en alineaciones, dándole además un nombre al conjunto y un punto kilométrico inicial. Tras este proceso se calculan automáticamente los peraltes según la normativa incluida en LDD. Después es posible acotar los puntos singulares y otros a intervalos constante, habiendo personalizado las etiquetas y parámetros de representación necesarios. Algunas herramientas más dentro de este grupo son la creación de paralelas simultáneas con respecto al eje y la creación de un fichero con datos de replanteo de puntos.

4.1.3.9. Parcelación

Otro de los grupos de comandos que se incluyen con LDD son los referidos a la gestión y acotación de parcelas. Para ello se aprovecha la funcionalidad de Autocad MAP 3 en cuanto a la topología de polígonos.

Para explotar estas posibilidades se debe dibujar previamente los contornos de las parcelas e invocar al gestor de parcelas, desde donde se importaran los datos de la geometría y etiquetado, mediante polilíneas o puntos. Desde este diálogo se puede igualmente definir los parámetros de capas y representación, y generar informes con áreas y perímetros de cada parcela, así como detalle de los ángulos y distancias de cada uno de sus lados.

4.1.3.10. Utilidades Adicionales

Autocad Land Development Desktop 2005 ofrece además un gran número de utilidades adicionales para etiquetado y terminación de planos, consulta y gestión de capas, bloques, etc. (menús Labels, Inquiry y Utilities).

4.2. PROGRAMA SLOPE/W

SLOPE/W es un componente de un completo paquete de productos geotécnicos denominado GeoStudio. Una de las más poderosas características de este enfoque integrado es que abre las puertas a los tipos de análisis del más amplio y más complejo espectro de problemas, incluyendo el uso de los elementos finitos

computarizado y destacando la presión de agua en el análisis de estabilidad. No solamente hace un enfoque integrado ampliando las posibilidades de análisis, sino que puede ayudar a superar algunas limitaciones de las fórmulas de equilibrio límite. Si bien, no es necesario utilizar esta avance destacado ya que SLOPE / W puede ser usado como un producto individual, sin duda hay un aumento de la capacidad del programa, utilizándolo como uno de los componentes de una gama completa de programas de software geotécnicos. La pantalla principal del programa se ve como la figura 4.3.

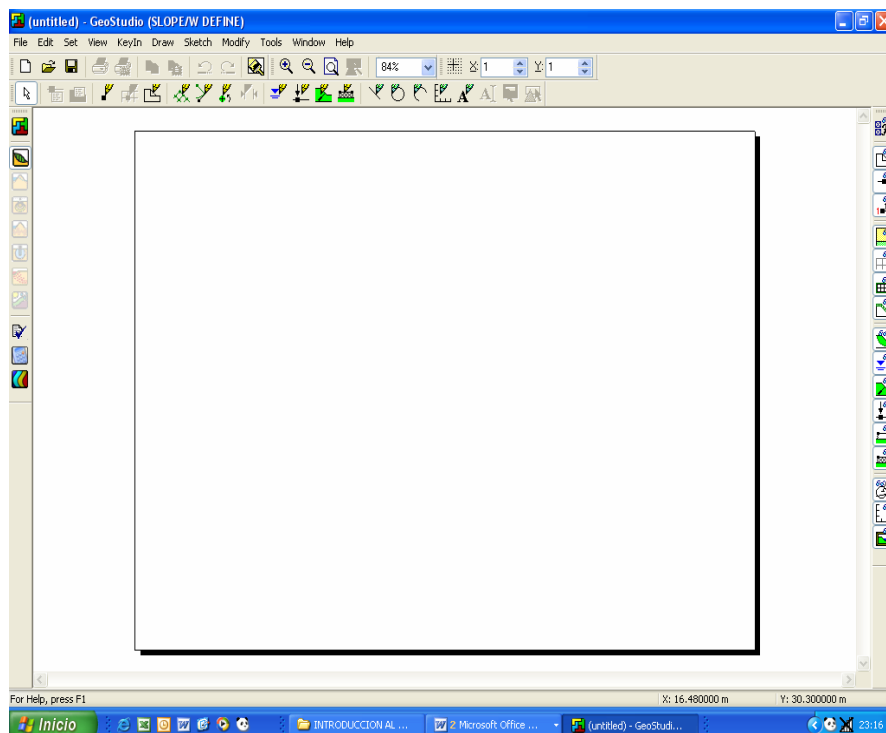


Figura 4.3 Pantalla principal del programa GEOSLOPE/W.

(Fuente: López, 2005)

4.2.1. Características del programa

El programa a cuyo uso nos vamos a introducir tiene fundamentalmente en su versión 2004 las siguientes características:

4.2.1.1. Métodos de cálculo

- Ordinario (Fellenius).
- Bishop simplificado.
- Janbu simplificado.
- Spencer.
- Morgentern-Price.
- Cuerpo de Ingenieros Americanos.(I y II)
- Lowe-Karafiath.
- Sarma.
- Método de equilibrio límite generalizado (GLE).
- Método de los elementos finitos.

4.2.1.2. Geometría y estratigrafía

La introducción de los condicionantes geométricos es muy versátil y se adapta prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones.
- Definición de grietas de tracción.
- Parcialmente sumergidos.

4.2.1.3. Superficie de deslizamiento

Dispone de distintos sistemas de modelización de las superficies de rotura:

- Malla de centros y límites de radios
- Superficies de rotura poligonales, con o sin centro
- Por bloques.

- Zonas de entrada salida acotando los posibles círculos de rotura.
- Búsqueda automática de superficies de rotura.
- Optimización de búsqueda de superficies de rotura.

4.2.1.4. Presión hidrostática

- Coeficiente de presión de agua, R_u
- Superficie piezométrica.
- Presión hidrostática para cada punto.
- Contornos de presiones hidrostáticas.

4.2.1.5. Propiedades de los suelos

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento.

- Tensiones totales y efectivas (σ y σ').
- Resistencia al corte sin drenaje ($\phi = 0$), $\tau = c$.
- Resistencia al corte cero (agua, $c = 0$ y $\phi = 0$).
- Materiales impenetrables (lechos rocosos).
- Criterios de rotura bilineales.
- Incrementos de la cohesión con la profundidad.
- Resistencia al corte anisótropa.
- Criterios de rotura específicos.
- Modelo de Hoek y Brown para taludes rocosos

4.2.1.6. Tipos de cargas

- Cargas superficiales

- Cargas lineales.
- Cargas sísmicas
- Anclajes y bulones (activos y pasivos)
- Suelo reforzado

CAPITULO V

RESULTADOS Y ANALISIS PARA EL DEPÓSITO DE ESCOMBRERAS

5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que define este trabajo es de Campo - Correlacional, ya que se requiere una búsqueda para recabar información de primera mano, es decir, en donde se encuentra la fuente (Cerro Riecito, Estado Falcón), con la finalidad de obtener información que no esta registrada y corroborar la que existe. Además, es correlacional, por que sé necesario plantear el grado de relación que existe entre las variables, dado que el manejo de dicho grado de relación va ha influir en determinar en mayor o menor medida la exactitud resultados.

5.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Indiscutiblemente la investigación es No Experimental - Longitudinal, ya que se plantea manipular todas las variables independientes posibles, pero no de una forma deliberada, con el fin de controlar los efectos de las dependientes.

5.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población esta representada por la mina de roca fosfática en el Cerro Riecito, Estado Falcón, y la muestra las perforaciones existentes que serán caracterizadas y que servirán para el diseño de las escombreras.

5.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA INVESTIGACIÓN

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos serán:

- Delimitar las coordenadas UTM de la zona de estudio: Definir el área a evaluar en un plano de coordenadas U.T.M.
- Elegir los posibles lugares donde se pudieran realizar las escombreras, mediante una evaluación de la topografía de la zona.
- Caracterización geomecánica tanto de los materiales a verter en las escombreras, como de los que componen los posibles sitios de emplazamiento, mediante análisis de campo y de laboratorio.
- Fijar los parámetros de diseños para la construcción de las escombreras, según las características geomecánicas de los materiales que las componen.
- Proponer un sistema de construcción de las escombreras que garantice la estabilidad y seguridad de los trabajadores, mediante la utilización de técnicas adecuadas.
- Proponer el diseño más recomendable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.
- Los instrumentos a utilizar para la recopilación de datos serán:
- Búsqueda e información dispersa, referente a factores que interviene en cada de las etapas de la investigación.
- Utilización de técnicas y herramientas topográficas con el fin de conocer el área disponible para las escombreras y el volumen de material que se puede depositar en las mismas.
- Aplicación de métodos informáticos y de una serie de cálculos analíticos.
- Ensayos de laboratorio de muestras tanto de los materiales a verter en las escombreras como de los materiales del emplazamiento.

5.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

En la explotación de roca fosfática llevada a cabo en la mina Riecito se generan cuatro tipos de estériles diferenciados por sus características litológicas, granulométricas, de resistencia, mineralógicas, geoquímicas, etc.

El primer estéril que se genera en las operaciones es la capa vegetal. Dicho material debe ser retirado para luego ser depositado en un lugar provisional, ya que posteriormente será utilizado en las labores de restauración de las escombreras.

Luego de retirada la capa vegetal, se procede a retirar el material de recubrimiento, que no es más que el material que se encuentra sobre el mineral. En el caso de la explotación de la mina de Riecito este material esta compuesto por roca caliza. Litológicamente, de acuerdo a estudios ejecutados en la zona, la secuencia esta conformada por un nivel inferior de calizas color crema, coherentes, uniformes, parcialmente recristalizadas y un nivel superior grueso, de margas calcáreas de color marrón, enriquecidas en sílice. El contacto entre ambas secuencias es aparentemente transicional, y no se visualizaron fallamientos en el área.

Luego de retirado el recubrimiento que se encuentra sobre el mineral, se procede a la explotación del mismo. En la fase de explotación del mineral se genera otro material estéril, que no es más que el mineral de bajo tenor. En la explotación minera de Riecito se considera material de bajo tenor toda roca fosfática cuyo porcentaje de fosfato este por debajo del 20%.

La presentación de los resultados se realizara siguiendo la misma secuencia en la que se ha presentado el informe. Esta secuencia nos lleva a presentar los resultados de la siguiente manera:

- Cuantificación de los materiales estériles.
- Caracterización geomecánica de los materiales estériles.
- Propiedades de los materiales estériles.
- Selección de las áreas optimas para la ubicación de las escombreras.

- Caracterización geomecánica del terreno de emplazamiento de las escombreras.
- Selección de los tipos de escombreras.
- Definición de los parámetros de diseño de las escombreras.
- Dimensionamiento de las escombreras.
- Calculo de estabilidad de las escombreras.
- Establecimiento de la red de drenaje de fondo.
- Especificación del método de vertido.
- Proposición de un plan racional de manejo de los equipos mineros.

5.5.1 Cuantificación de los materiales estériles

Para el cálculo del volumen de estéril que se genera por el retiro de la roca fosfática de bajo porcentaje de P_2O_5 , se utilizaron datos de estudios realizados anteriormente por la empresa. Por otro lado, para el cálculo del volumen de material estéril que se genera al retirar el recubrimiento (marga calcárea caliza química) y la capa vegetal se utilizo el software Autodesk Land Desktop. A continuación se presenta el procedimiento de cálculo para cada tipo de material estéril. Cabe destacar el hecho de que en el recubrimiento aparecen lentes de arcilla, pero ya que estos representan un volumen muy pequeño, los mismos podrán ser depositados convenientemente junto con los estériles de marga calcarea.

5.5.1.1. Volumen de capa vegetal

Para realizar el cálculo del volumen de capa vegetal se necesita saber tanto el área ocupada por esta, como el espesor de la misma. En primer lugar se sabe que el área que abarca el Bloque C de la mina de Riecito es de unos 100.000 m² aproximadamente, según datos suministrados por la empresa. Por otro lado se debe calcular el área del Bloque B, actualmente en explotación, a la que todavía no se le ha

retirado la capa vegetal. Por ultimo, se sabe por datos de trabajos realizados anteriormente que el espesor de la capa vegetal en la zona es de unos 10 cm aproximadamente.

Para obtener el área de capa vegetal existente en el bloque B se utilizo el software Autodesk Land Desktop, haciendo uso de la herramienta “area by points” (área por puntos) que se encuentra en el menú “Inquiry”, bordeando el área de la mina donde todavía no se ha retirado la capa vegetal. Esto dio como resultado un área de 87.542 m², que sumado a los 100.000 m² que abarca el Bloque C nos da un área total de capa vegetal de 187.542 m².

Tomando en cuenta los datos descritos anteriormente el volumen de capa vegetal nos queda:

$$\text{Volumen de capa vegetal} = \text{Área} * \text{Espesor promedio de capa vegetal}$$

$$\text{Volumen de capa vegetal} = 187.542 \text{ m}^2 * 0,10 \text{ m}$$

$$\text{Volumen de capa vegetal} = \mathbf{18.754,20 \text{ m}^3}$$

5.5.1.2. Volumen de recubrimiento (caliza)

Como ya se ha mencionado a lo largo de esta investigación, para la explotación de roca fosfática en el Cerro Riecito se dividió el yacimiento en tres bloques, A, B y C. Las reservas de roca fosfática del Bloque A ya se agotaron, y actualmente están en explotación las del Bloque B, y queda por explotar aproximadamente un 50% del área del mismo, por lo que aun queda por remover un volumen considerable de recubrimiento para poder llegar a la capa de roca fosfática. Por su parte las reservas del Bloque C del yacimiento se encuentran todavía en condiciones naturales, hasta que termine la explotación del Bloque B, por lo que tanto las reservas de roca fosfática como el volumen de recubrimiento es el mismo que se ha calculado de trabajos anteriores realizados en el yacimiento.

Para calcular el volumen de recubrimiento que queda en el bloque B se utilizo el software Autodesk Land Desktop. Este software calcula el volumen entre dos

superficies, en este caso tenemos la topografía y el tope de la capa de fosfato, calculando la diferencia de volumen que existe entre ambas, medidos desde la cota cero. El software nos permite modelar la topografía de un área o cualquier capa del subsuelo, bien sea el tope o base de alguna capa de mineral, mediante la generación de superficies. Para generar estas superficies se debe contar con puntos pertenecientes a las capas que se desean modelar, curvas de nivel digitalizadas de las capas o puntos obtenidos desde un dispositivo de recolección de datos satelitales.

En primer lugar se procedió a digitalizar el plano topográfico del Bloque B. Debido a que el plano topográfico de la zona se encontraba en papel se procedió a digitalizar manualmente el mismo. Para esto se dibujo una cuadrícula de 20 x 20 m en el plano escala 1:1000 (escala de dibujo). Luego se anotaron las coordenadas de cada punto de la cuadrícula que interceptaba a las curvas de nivel del plano, y su respectiva altura, dada por la curva de nivel correspondiente.

Todos estos puntos, un total de 1338 puntos, se cargaron en un archivo de texto, para poderlos introducir en el software A.L.D. (Autodesk Land Desktop). Con estos puntos se procedió a crear la superficie topográfica del terreno, para luego generar las curvas de nivel del mismo.

Luego se procedió a digitalizar el plano del tope de la capa de fosfato. Para esto se escaneo el plano y se guardo como un archivo de imagen, para luego introducirlo en el programa A.L.D. como una imagen. Luego se procedió a calcar las curvas de nivel del plano mediante la utilización de polilíneas a las cuales se le asigna la cota correspondiente a la curva de nivel. Este procedimiento se debe repetir con cada una de las curvas de nivel que conforman el plano. Después de haber digitalizado todas las curvas de nivel se debe ajustar la escala del plano digital a 1:1, mediante la herramienta “scale” del menú “modify”, ya que el programa trabaja en esta escala. Luego se debe referenciar el plano digitalizado mediante la fijación de un punto al cual se le conoce sus coordenadas este y oeste.

Después de obtenidas las curvas de nivel digitalizadas del plano se debe crear la superficie que modela las mismas, debido a que el programa solamente reconoce

superficies a la hora de calcular los volúmenes. Para esto se debe abrir el cuadro de dialogo “Terrain Model Explorer” que se encuentra en el menú “Terrain”. Se genera una nueva superficie que será llamada “Topefosfato”, que será construida mediante la herramienta “Build” y con la opción “Use Contour Data”, y seleccionando las curvas de nivel digitalizadas anteriormente.

Una vez que se tengan las superficies que modelan tanto la superficie topográfica del terreno como el tope de la capa de fosfato, se procede a regenerar las superficies, mediante la herramienta “Build”, pero esta vez utilizando una polilínea cerrada que representa los límites laterales del cálculo del volumen de recubrimiento, para lo cual se debe activar la opción “Apply Boundaries” y seleccionar la polilínea cerrada mencionada anteriormente. Estos límites laterales están representados hacia el este por la línea que separa los Bloques B y C, hacia el oeste por la línea que separa los bloques A y B, hacia el norte por el contacto geológico entre la caliza y el fosfato y hacia el sur por la línea que modela el límite de remoción de 4:1.

Por último se hace el cálculo del volumen de recubrimiento haciendo uso secuencial de las opciones que se encuentran en el bloque para el cálculo de volumen del menú “Terrain”, comenzando por la opción “Select Current Stratum”. El cálculo del volumen se realizara mediante dos métodos, a saber, “Grid Volumes” y “Composite Volumes”, y se tomara como resultado final de volumen de recubrimiento el promedio que resulte de ambos métodos.

Los resultados de volumen obtenidos mediante este procedimiento se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Reporte de volumen de recubrimiento (caliza)

Metodo de calculo	Volumen (m³)
Composite	2.148.387
Grid	2.073.403

Tomando los datos obtenidos mediante el programa A.L.D. y sacando un promedio de los mismos, obtenemos el siguiente resultado:

$$\text{Volumen de recubrimiento (Bloque B)} = (2.148.387 \text{ m}^3 + 2.073.403 \text{ m}^3) / 2$$

$$\text{Volumen de recubrimiento (Bloque B)} = 2.110.895 \text{ m}^3$$

Según un estudio realizado por James Spalding en el año 1997, las reservas recuperables de recubrimiento que existen en el Bloque C son de 4.829.000 m³, con lo cual nos queda un volumen total de recubrimiento de 6.939.895 m³. Se debe destacar el hecho de que no se utilizó el programa A.L.D. para realizar el cálculo de volumen del Bloque C debido a que en la actualidad no se cuenta con el número suficiente de perforaciones como para hacer un buen modelamiento del subsuelo del Bloque C.

Este volumen total de recubrimiento está constituido por roca caliza sin hacer distinción de la cantidad de cada uno de los dos tipos de caliza existentes en la zona. Según un estudio realizado por INGEOMIN en el año 2003, en el área de la mina existe una capa inferior de caliza química compacta de buena calidad y una capa superior de marga calcárea con alto contenido de sílice. En dicho estudio se infiere que la capa superior, marga calcárea, representa un 60% del total del volumen de material existente en la zona, el otro 40% está representado por la caliza química.

Aplicando los porcentajes descritos anteriormente al total de volumen de recubrimiento tenemos lo siguiente:

$$\text{Volumen de recubrimiento superior (marga calcárea)} = 4.163.937 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de recubrimiento inferior (caliza química)} = 2.775.958 \text{ m}^3$$

5.5.1.3. Volumen de roca fosfática de bajo porcentaje (< 20 %)

Según el estudio detallado realizado por ENADIMSA en el año de 1982, en el Bloque B de la mina de Riecito contaba con unas 700.000 tn de roca fosfática de bajo tenor, así mismo había aproximadamente unas 8.000.000 tn de roca fosfática de alto tenor. Hasta ahora no se ha realizado una explotación selectiva de la roca fosfática, debido a

que no se no se ha contado con los equipos y tecnología necesaria para hacerlo, pero según las exigencias de la planta de procesamiento de roca fosfática, de ahora en adelante se deberá realizar una separación debido a que esta roca de bajo porcentaje incide de manera negativa en el proceso de beneficio de la roca fosfática.

Debido a que no se cuenta con un reporte que refleje la cantidad de roca fosfática de bajo porcentaje que se ha extraído de la mina, se asumirá, tomando en cuenta que de las 8.000.000 tn de roca fosfática que se encontraban en el Bloque B actualmente quedan unas 3.500.000 tn, entonces de las 700.000 tn de roca fosfática de bajo porcentaje quedarán aproximadamente unas 300.000 tn en el Bloque B.

En los estudios de cálculo de reservas que se han realizado en el Bloque C, no se especifica la cantidad de roca fosfática de bajo porcentaje que hay en el mismo, y tampoco se cuenta con un número de perforaciones y de detalle que permita hacer dicho cálculo. Por lo tanto, solo queda asumir que hay un porcentaje de roca fosfática de bajo tenor que se corresponda con el que existe en el Bloque B.

Tomando en cuenta lo explicado anteriormente, se puede asumir que en el bloque C existen aproximadamente 300.000 tn de roca fosfática de bajo porcentaje, que sumadas a las 300.000 tn existentes en el Bloque B, nos da un aproximado de 600.000 tn de roca fosfática de bajo porcentaje de P_2O_5 . A partir de esto, y tomando en cuenta que la densidad de la roca fosfática es de $2,6 \text{ tn/m}^3$, se puede asumir que existe un volumen de roca fosfática de bajo porcentaje de aproximadamente 230.770 m^3 .

5.5.2. Caracterización geomecánica de los estériles

La caracterización geomecánica de los estériles a ser depositados en una escombrera se hace necesaria a la hora de diseñar la misma, ya que la geometría de la escombrera depende de los resultados de estos estudios. Uno de los parámetros geomecánicos más importantes es el ángulo de rozamiento interno de los estériles, ya que de este parámetro dependerá la inclinación final del talud de la escombrera, que incide

directamente en la capacidad de la misma. Este fenómeno se hace más notable cuanto mayor sea el tamaño de la escombrera.

En escombreras pequeñas la determinación de los parámetros geomecánicos puede hacerse empíricamente mediante la observación en campo y la utilización de tablas existentes. En escombreras de mediano tamaño la determinación de los parámetros geomecánicos se debe hacer mediante la realización de algunos ensayos sencillos que ayuden a determinar con cierto grado de exactitud los valores de dichos parámetros. Mientras que en escombreras de gran tamaño la determinación de los parámetros geomecánicos es más crítica, por lo que se hace necesaria la realización de una serie de ensayos de laboratorio más detallados.

En el caso de las escombreras de la mina de Riecito, los volúmenes a remover clasifican a las escombreras de pequeñas a medianas, lo que implica que la cantidad de ensayos a realizar es reducida.

Los ensayos de carga puntual fueron realizados sobre muestras provenientes de testigos de perforación de sondeos realizados en la zona en años anteriores. En este caso se utilizaron los sondeos ubicados en el bloque B, que se identifican por su nomenclatura como S – n° de sondeo (ejemplo S – 18); y los sondeos ubicados en el bloque C que se identifican como SN – n° sondeo (ejemplo SN – 2). Debido a que las muestras no presentan ningún tipo de discontinuidad se asume que las mismas presentan características anisotrópicas.

El ensayo de corte directo se realizó con la finalidad de determinar el ángulo de fricción interna de los estériles. En el ensayo de corte directo se parte del principio de que no existirá ningún tipo de cohesión entre los estériles, y el ángulo de fricción se calculará a partir de la resistencia de corte residual. La nomenclatura utilizada para estas muestras es la misma que para el caso de carga puntual, pero adicionalmente se le coloca la profundidad de la muestra al lado, ejemplo SN3 (15-22).

5.5.2.1. Caracterización geomecánica de la capa vegetal

Debido a que los volúmenes de capa vegetal a remover son muy pequeños, unos 18.754,20 m³, esta se puede almacenar en una zona que cubra una pequeña área, y se puede almacenar con el ángulo de reposo del material, ya que el depósito de esta pequeña cantidad de material no representa un problema de inestabilidad. Además, este tipo de materiales no se caracteriza geomecánicamente.

5.5.2.2. Caracterización geomecánica del recubrimiento (Caliza)

En el caso de la mina de Riecito la caracterización del estéril proveniente del recubrimiento se hizo mediante la realización de ensayos de laboratorio en testigos provenientes de perforaciones realizadas anteriormente en la zona. Estos testigos fueron clasificados de acuerdo al tipo de litología presente en cada uno, tomando como referencia las planillas de perforación facilitadas por la empresa. De esta manera se puede saber si la muestra a la cual se le realiza el ensayo pertenece a la marga calcárea o a la caliza química compacta.

5.5.2.2.1. Caracterización geomecánica de la marga calcárea.

Los resultados de los ensayos de carga puntual realizados sobre las muestras identificadas como marga calcárea fueron los siguientes (tabla 5.2):

Tabla 5.2 Resultados de ensayo de carga puntual en las muestras de marga calcárea

Perf.	Prof.(m)	Litología	Ensayo	W (mm)	D (mm)	A (mm ²)	P (N)	De ² (mm ⁴)	Is (MPa)	Factor	Is ₍₅₀₎ (MPa)
S - 23	12 - 14	Marga calc.	Axial	42,00	40,60	1705,20	3900	2171,13	1,80	0,97	1,74
S - 23	12 - 14	Marga calc.	Axial	41,80	38,60	1613,48	3300	2054,35	1,61	0,96	1,54
S - 23	12 - 14	Marga calc.	Axial	41,90	43,50	1822,65	4200	2320,67	1,81	0,98	1,78
S - 28	8 - 10	Marga calc.	Axial	42,00	17,00	714,00	3900	909,09	4,29	0,80	3,42
S - 28	8 - 10	Marga calc.	Axial	41,60	16,00	665,60	3600	847,47	4,25	0,78	3,33
SN - 5	15 - 18	Marga calc.	Axial	54,20	40,60	2200,52	3300	2801,79	1,18	1,03	1,21
SN - 1	20 - 21	Marga calc.	Axial	53,50	26,60	1423,10	3000	1811,95	1,66	0,93	1,54
SN - 1	20 - 21	Marga calc.	Axial	53,90	43,90	2366,21	9600	3012,75	3,19	1,04	3,32
SN - 1	12 - 15	Marga calc.	Axial	54,50	38,00	2071,00	6900	2636,88	2,62	1,01	2,65

El promedio resultante de los valores del índice de carga puntual es de (2,28 ± 0,80) MPa.

Se puede estimar el valor de resistencia a la compresión de la roca mediante la siguiente ecuación:

$$C_o = 23 I_{s(50)} \text{ (MPa)}$$

$$C_o = 23 * (2,28 \pm 0,80) \text{ MPa}$$

$$C_o = (52,44 \pm 18,4) \text{ MPa}$$

$$C_o = (524,40 \pm 184) \text{ kg/cm}^2$$

A partir de los resultados de resistencia a la compresión simple de la roca se puede hacer una clasificación de la misma, a continuación se presenta un cuadro resumen donde se especifica la calidad de la roca dependiendo del sistema de clasificación (tabla 5.3).

Tabla 5.3 Clasificación de la marga a partir de su resistencia a compresión simple

Sistema de clasificación	Calidad de la roca
ISRM (1981)	Dura
Geological Society of London (1970)	Dura
Bieniawski (1973)	Media

Según un estudio de sísmica de refracción sísmográfica realizado en la zona en el año de 1974, las velocidades de las ondas sísmicas de la marga calcárea de Riecito ubican a la misma dentro del límite del material desgarrable, presentando velocidades entre los 560 m/seg y 1500 m/seg. En la figura 5.1 mostrada a continuación se puede apreciar el grafico de ripabilidad de distintas rocas para maquinas tipo D 10R, y se verifica que una caliza con las velocidades sísmicas dadas anteriormente es fácilmente ripable. Luego se muestra la figura 5.2 se presenta el cuadro de

clasificación de rocas para su excavabilidad de Franklin, donde se deduce que el espaciamiento de las discontinuidades esta en el orden de los 0,02 m a 0,06 m.

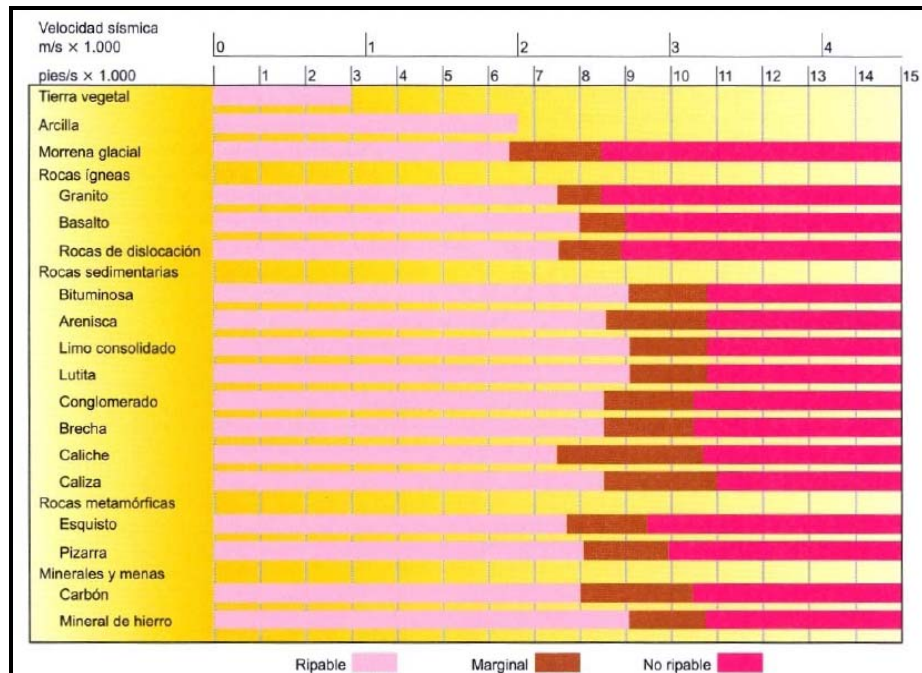


Figura 5.1 Ripabilidad de distintas rocas para maquinas ripadoras tipo D10R de Caterpillar (Gonzales de Vallejo, 2002)

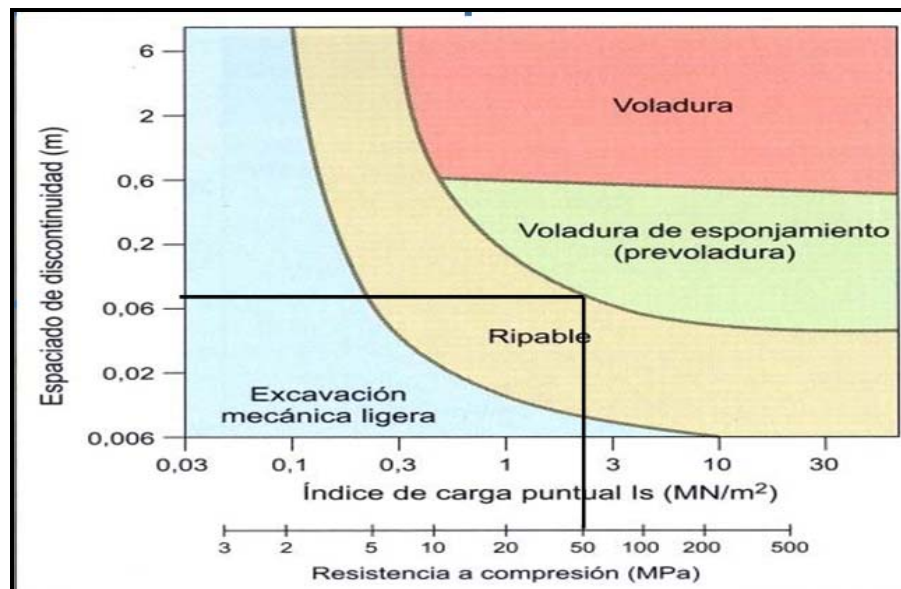


Figura 5.2 Clasificación de las rocas según su excavabilidad (Gonzales de Vallejo, 2002)

Para calcular el ángulo de fricción de los estériles de caliza química se realizó el ensayo de corte directo en roca. Para este ensayo se utilizaron muestras de perforaciones, en donde se pudiera observar algún tipo de discontinuidad, sobre las que se realizó el ensayo de corte a través de esta discontinuidad, obteniéndose así la resistencia pico. Después se aumento la carga vertical en dos oportunidades para calcular la resistencia residual. A partir de estos ensayos de cálculo de resistencia residual se determino el ángulo de fricción residual.

Los resultados de los ensayos de corte directo realizados sobre las muestras de marga calcárea fueron los siguientes (figuras 5.3, 5.4 y 5.5):

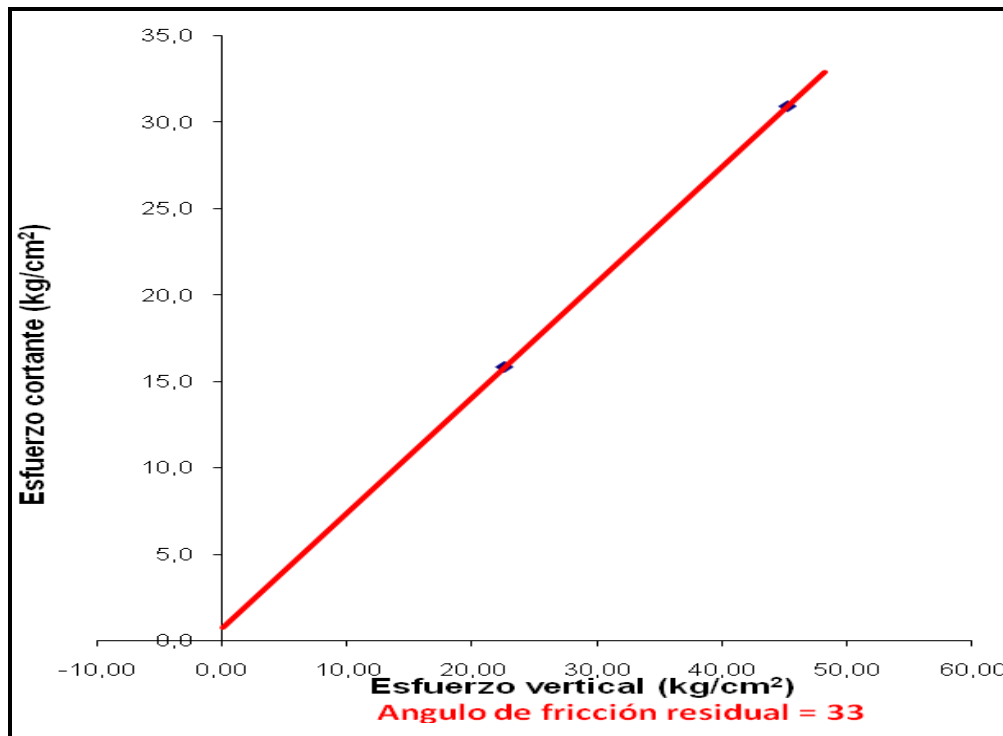


Figura 5.3 Resultado de ensayo de corte directo sobre la muestra SN3 (9 – 11)

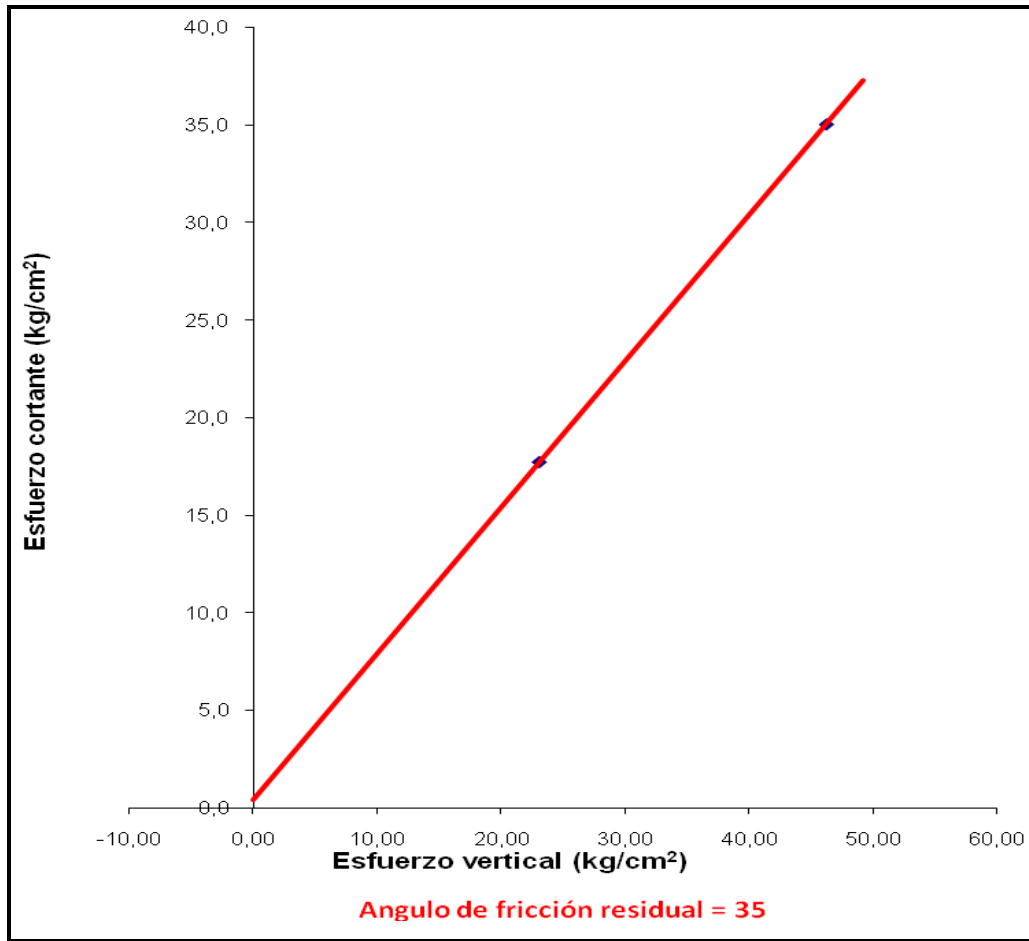


Figura 5.4 Resultado de ensayo de corte directo sobre la muestra SN5 (15 – 18)

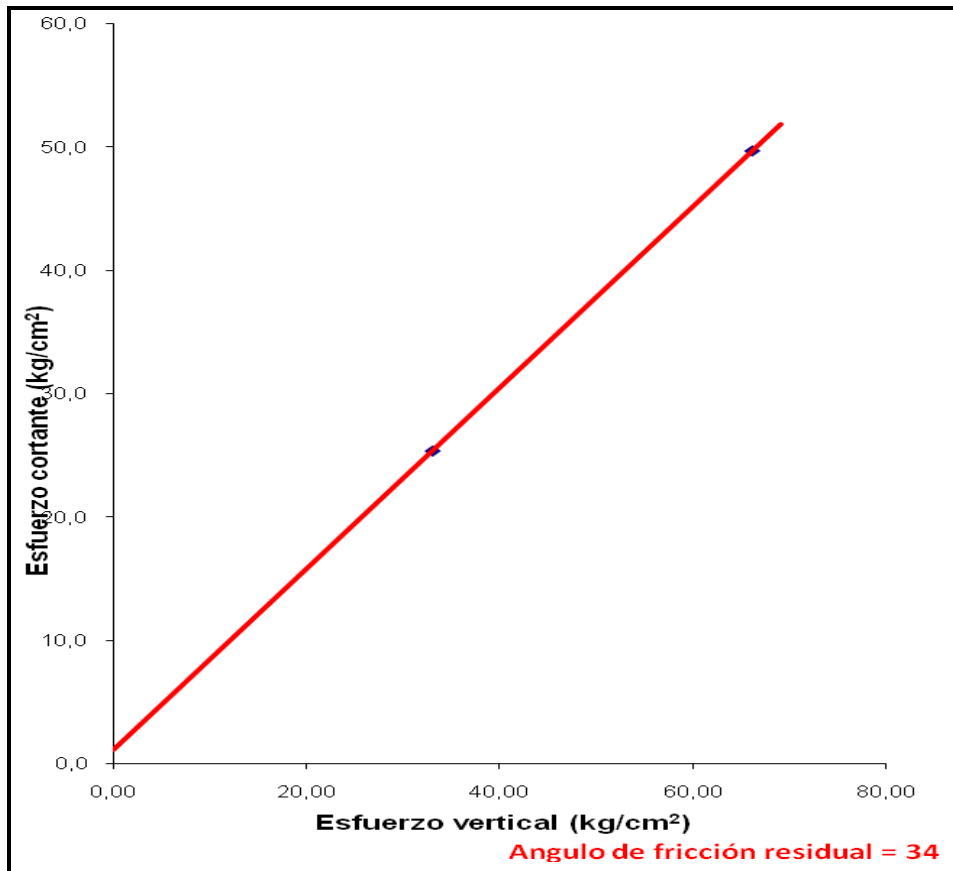


Figura 5.5 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN3 (32 – 35)

A partir de los resultados de los ensayos se tiene un ángulo de fricción residual de $(34 \pm 1)^\circ$. La cohesión es de $0,1 \text{ kg/cm}^2$.

También se puede aplicar la ecuación de Barton (1982) para estimar el ángulo de rozamiento interno efectivo de los estériles:

$$\Phi' = R \cdot \log(S/\sigma'_n) + \Phi_b$$

$R = 10$ (Roca de cantera con porosidad de 20%)

$S = 12,5$ (Para un tamaño de material $50\text{mm} < d_{50} < 300\text{mm}$, y $\sigma_c = 50 \text{ MPa}$)

$\Phi_b = 34^\circ$ (Ángulo de reposo del material)

$$\Phi' = 35^\circ \text{ (Para un } \sigma'_n = 10 \text{ MPa)}$$

Como conclusión se puede asumir que el ángulo de rozamiento es de 35° , debido a la similitud de los resultados y ya que los mismos se encuentran dentro del rango teórico que es de 35° a 40° .

5.5.2.2.2 Caracterización geomecánica de la caliza química

Para la caracterización geomecánica de la caliza química se utilizaron, al igual que para la marga calcárea, muestras provenientes de testigos de perforación realizados anteriormente en zonas del Bloque B y C de la mina. Para la identificación de las muestras se utilizó la misma nomenclatura que la utilizada en el caso de marga calcárea.

Para la determinación del índice de carga puntual corregido ($I_{s(50)}$) y de la resistencia a la compresión simple de la roca se realizó el ensayo de carga puntual sobre 33 muestras de roca, de las cuales fueron anulados 7 resultados por no cumplir con los modos de falla típicos descritos en la teoría.

Los resultados de los ensayos de carga puntual realizados sobre las muestras de caliza química, fueron los siguientes (tabla 5.4):

Tabla 5.4 Resultados de ensayo de carga puntual en las muestras de caliza química.

Perf.	Prof.(m)	Litología	Ensayo	W (mm)	D (mm)	A (mm ²)	P (N)	De ² (mm ²)	Is (MPa)	Factor	Is ₍₅₀₎ (MPa)
S - 18	12 - 15	Caliza Quim.	Axial	41,00	23,00	943,00	6600	1200,66	5,50	0,85	4,66
S - 18	12 - 15	Caliza Quim.	Axial	40,60	20,00	812,00	5700	1033,87	5,51	0,82	4,52
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Diametral		41,80		6000	1747,24	3,43	0,92	3,17
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Diametral		41,70		4200	1738,89	2,42	0,92	2,23
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Diametral		42,00		4500	1764,00	2,55	0,92	2,36
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Axial	41,90	22,00	921,80	4200	1173,67	3,58	0,84	3,02
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Axial	41,80	30,10	1258,18	4500	1601,96	2,81	0,90	2,54
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Axial	41,80	32,10	1341,78	6300	1708,41	3,69	0,92	3,38
S - 25	9 - 10,5	Caliza Quim.	Axial	41,90	25,00	1047,50	4500	1333,72	3,37	0,87	2,93
S - 27	10 - 12	Caliza Quim.	Diametral		41,90		4200	1755,61	2,39	0,92	2,21
S - 27	10 - 12	Caliza Quim.	Diametral		42,00		5400	1764,00	3,06	0,92	2,83
S - 27	10 - 12	Caliza Quim.	Diametral		41,60		6300	1730,56	3,64	0,92	3,35
S - 27	10 - 12	Caliza Quim.	Axial	42,00	29,00	1218,00	5100	1550,81	3,29	0,90	2,95
S - 27	10 - 12	Caliza Quim.	Axial	41,60	35,00	1456,00	6900	1853,84	3,72	0,93	3,48
S - 27	10 - 12	Caliza Quim.	Axial	41,80	32,00	1337,60	4500	1703,09	2,64	0,92	2,42
SN - 3	29 - 32	Caliza Quim.	Diametral		54,30		7800	2948,49	2,65	1,04	2,75
SN - 3	29 - 32	Caliza Quim.	Diametral		54,20		8700	2937,64	2,96	1,04	3,07
SN - 3	29 - 32	Caliza Quim.	Diametral		54,10		8400	2926,81	2,87	1,04	2,97
SN - 2	24 - 29	Caliza Quim.	Diametral		54,40		6300	2959,36	2,13	1,04	2,21
SN - 2	24 - 29	Caliza Quim.	Diametral		54,30		9300	2948,49	3,15	1,04	3,27
SN - 2	24 - 29	Caliza Quim.	Axial	54,40	35,00	1904,00	6300	2424,25	2,60	0,99	2,58
SN - 2	24 - 29	Caliza Quim.	Axial	54,30	40,00	2172,00	7800	2765,48	2,82	1,02	2,89
SN - 2	24 - 29	Caliza Quim.	Axial	54,30	52,90	2872,47	9800	3657,34	2,68	1,09	2,92
SN - 8	2 - 4	Caliza Quim.	Diametral		53,60		9600	2872,96	3,34	1,03	3,45
SN - 8	2 - 4	Caliza Quim.	Axial	53,60	35,00	1876,00	6600	2388,60	2,76	0,99	2,73
SN - 8	2 - 4	Caliza Quim.	Axial	53,60	46,00	2465,60	10800	3139,30	3,44	1,05	3,62

El promedio resultante de los valores del índice de carga puntual es de (3,02 ± 0,61) MPa.

Se puede estimar el valor de resistencia a la compresión de la roca mediante la siguiente ecuación:

$$C_o = 23 I_{s(50)} \text{ (MPa)}$$

$$C_o = 23 * (3,02 \pm 0,61) \text{ MPa}$$

$$C_o = (69,46 \pm 14) \text{ MPa}$$

$$C_o = (694,6 \pm 140) \text{ kg/cm}^2$$

A partir de los resultados de resistencia a la compresión simple de la roca se puede hacer una clasificación de la misma, a continuación se presenta un cuadro resumen

donde se especifica la calidad de la roca dependiendo del sistema de clasificación (tabla 5.5).

Tabla 5.5 Clasificación de la marga calcárea a partir de su resistencia a compresión simple

Sistema de clasificación	Calidad de la roca
ISRM (1981)	Dura
Geological Society of London (1970)	Dura
Bieniawski (1973)	Media

A partir del estudio de sismica de refracción realizado en la zona en el año de 1974, y tomando en cuenta la clasificación de Salcedo (1988) que trata sobre el tipo de remoción y excavación, se puede decir que la caliza química es una roca que se encuentra entre el limite de escarificabilidad difícil y escarificabilidad con voladura, lo que deja en evidencia de que se trata de una roca dura de muy buena calidad. Los valores obtenidos de velocidad de onda sísmica se encuentran entre 840 m/seg y 3000 m/seg, y según la figura 5.1 la caliza se encuentra entre material ripable y marginal. En la figura 5.6 se muestra la grafica de clasificación de rocas según su excavabilidad, donde se puede observar que esta roca tiene un espaciado de discontinuidades entre 0,06 m y 0,2 m aproximadamente.

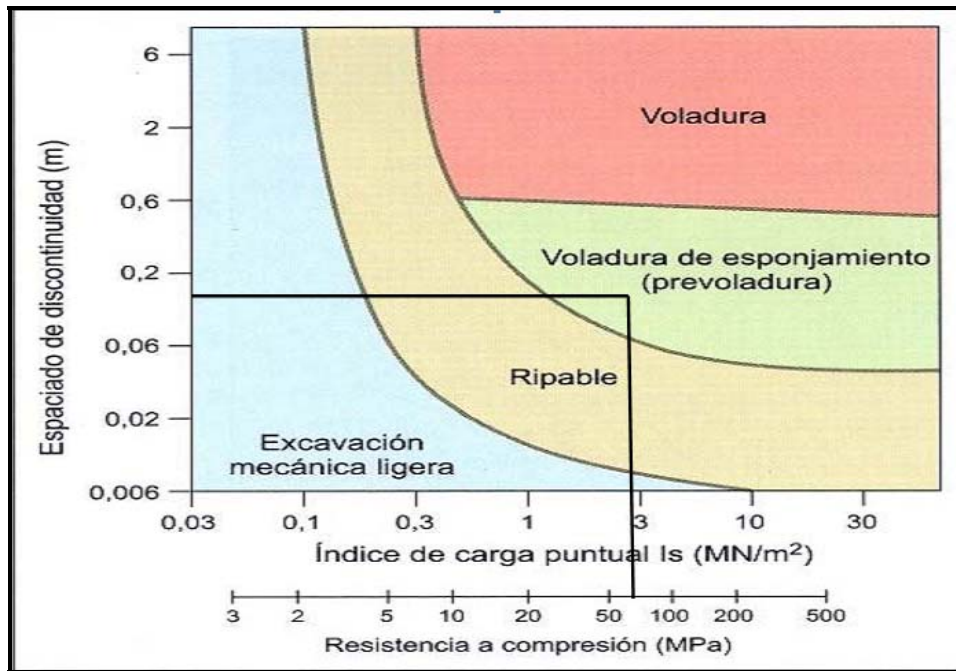


Figura 5.6 Clasificación de las rocas según su excavabilidad
 (González de Vallejo, 2002)

Para calcular el ángulo de fricción interno de la caliza química se realizó el ensayo de corte directo. Para este ensayo se utilizaron muestras de perforaciones, en donde se pudiera observar algún tipo de discontinuidad. Luego se realizó el ensayo de corte de la muestra a través de esta discontinuidad, obteniéndose la resistencia pico. Después se aumentó la carga vertical en dos oportunidades para calcular la resistencia residual. A partir de estos ensayos de cálculo de resistencia residual se determinó el ángulo de fricción residual.

Se realizaron tres ensayos sobre muestras pertenecientes a la capa de caliza química, y los resultados de los ensayos fueron los siguientes (figuras 5.7, 5.8 y 5.9):

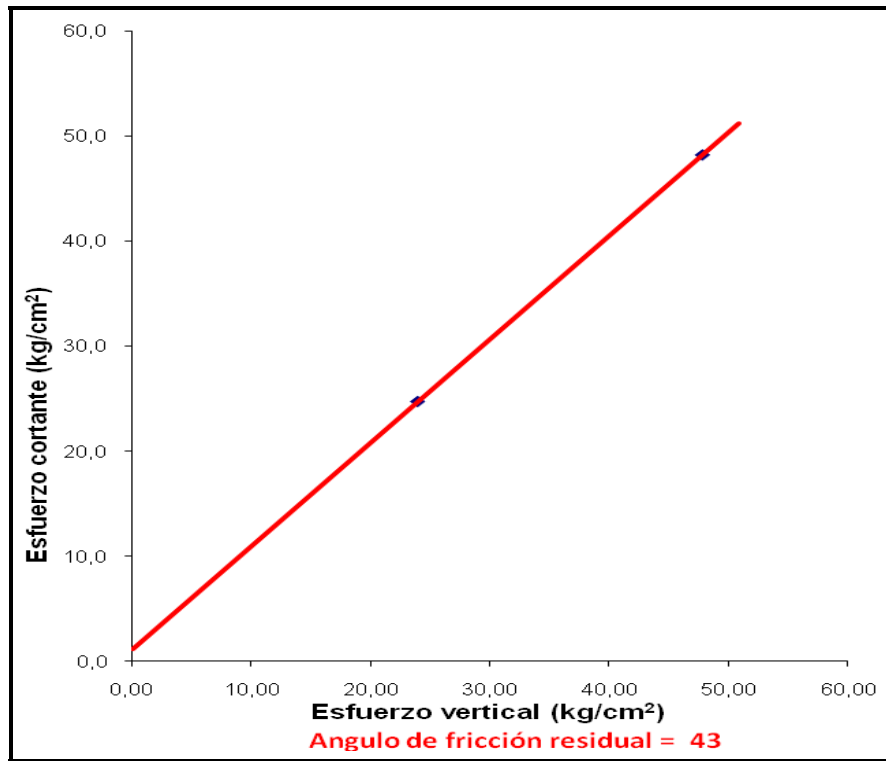


Figura 5.7 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN1 (20 – 21)

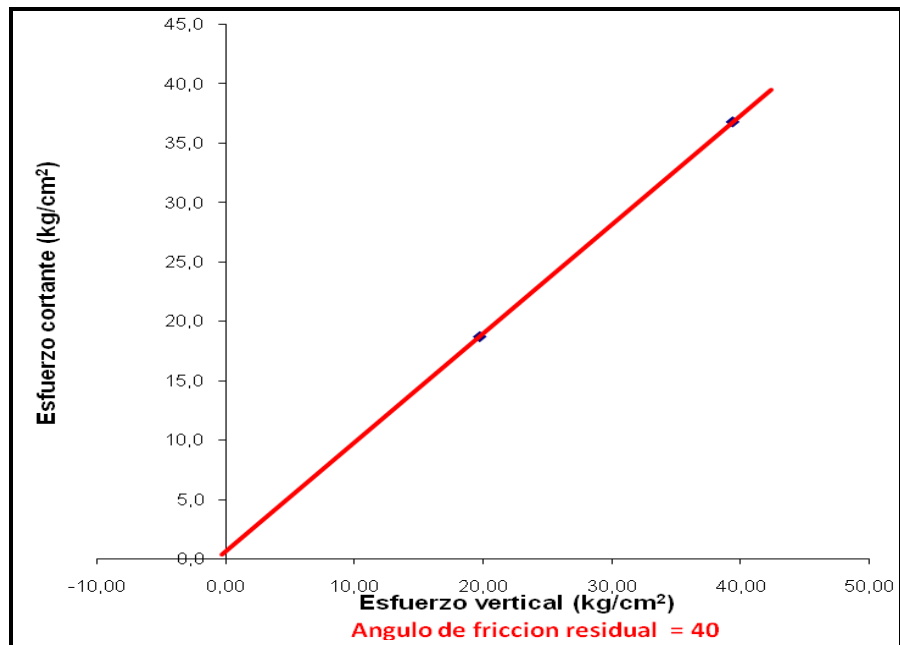


Figura 5.8 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN6 (7 – 11)

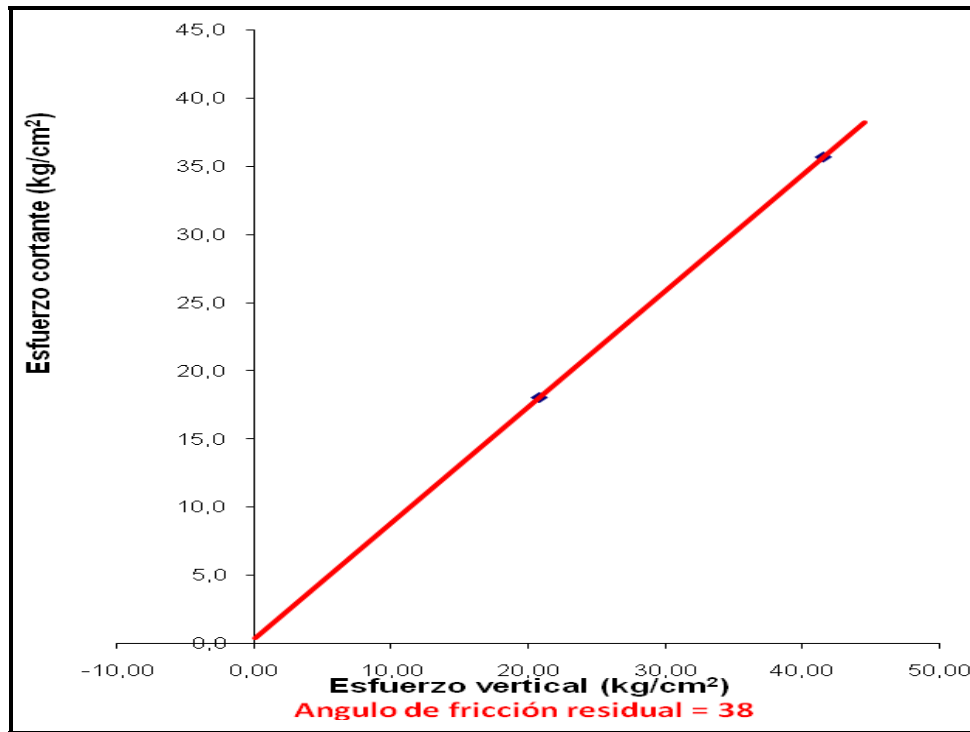


Figura 5.9 Resultado de ensayo de corte directo sobre muestra SN8 (29 – 32)

Los resultados arrojan un valor de ángulo de fricción residual de $(40,33 \pm 2,51)^\circ$. Por lo tanto, se concluye que los valores están dentro del rango de valores de 35° a 45° señalados en la teoría. Mientras que la cohesión es de $0,2 \text{ kg/cm}^2$.

5.5.3 Propiedades de los materiales estériles

5.5.3.1. Capa vegetal

Estos suelos se encuentran en la parte más alta del paisaje a 650 msnm; con relieve ondulado y con una topografía de plano inclinado con pendientes fuertes. Los suelos localizados en este sector tiene un incipiente desarrollo pedogenético, con un horizonte orgánico poco profundo y se clasifican dentro del orden de los Inceptisoles. Tienen un pH de 6, contenido de materia orgánica de 2,4%, fósforo mayor a 1000 ppm, alto porcentaje de calcio, poco potasio, y baja conductividad eléctrica.

La estructura es granular débil, con texturas gruesas de franco-arenosas en los primeros horizontes y de areno-francosa en el interior del perfil del suelo. Este suelo se desarrolló sobre la roca fosfatada y en algunos casos sobre la roca caliza fosilífera; es por ello que las propiedades químicas heredadas por estos suelos están íntimamente ligadas al material parental de los mismos. Los drenajes internos y externos son excelentes, con una alta permeabilidad.

5.5.3.2. Recubrimiento

5.5.3.2.1 Marga calcárea

Litológicamente se trata de una gruesa capa superior de margas calcáreas muy enriquecidas en sílice, en contacto transicional con las calizas químicas. La roca se caracteriza por su color marrón, pobre estratificación y poca coherencia. Los análisis químicos ejecutados sobre muestras representativas de margas mostraron un porcentaje muy alto de SiO₂, variando entre 29,27% y 41,39%; MgO entre 0,22% y 0,59%; Fe₂O₃ entre 0,73% y 1,26% y CO₃ entre 34,12% y 55,61%. De acuerdo a los análisis químicos se estima que el porcentaje de CaO puede variar entre 22,91 y 36,46%, lo cual clasifica a la roca como una marga calcárea silícea.

Según las observaciones de campo, la granulometría de este tipo de estériles es gruesa y muy uniforme. Cabe destacar el hecho de que al tratarse de una escombrera de tamaño medio a pequeño, basta con la observación visual para tener una idea de la granulometría de los estériles.

Para determinar la resistencia intacta de la roca, se realizó el ensayo de carga puntual sobre muestras provenientes de testigos de perforación, dando como resultado un índice de carga puntual corregido de $(2,28 \pm 0,80)$ MPa y una resistencia a la compresión simple de $(524,4 \pm 184)$ kg/cm². Para la resistencia al corte se realizaron ensayos de corte directo, tomando en cuenta los valores de resistencia residual, dando como resultado un ángulo de fricción residual de $(35 \pm 1)^\circ$.

Un estudio petrográfico realizado sobre muestras de perforaciones demuestra que se trata de calizas micríticas o calizas lodosas, fosilíferas, de color fresco marrón oscuro,

que meteoriza a marrón claro. Textualmente esta conformada por los aloquímicos que oscilan entre el 20% y 30% e incluye los intraclastos, pelets, fósiles y extraclastos.

Con respecto a la consolidación y asentamiento se puede decir que no se hizo ningún tipo de ensayo debido a que la naturaleza gruesa de los materiales estériles hace que los resultados del ensayo de compactación en laboratorio no sean representativos. En este tipo de caso se suele hacer una correlación con el factor de esponjamiento, que según estudios realizados anteriormente en la mina se ha calculado en 1.2.

Por ultimo, se puede mencionar en lo que se refiere a la geoquímica del material estéril que este tipo de materiales no presenta ningún tipo de contaminante, ya que según estudios anteriores la roca no se degrada químicamente.

5.5.3.2.2 Caliza química

Litológicamente se trata de unas calizas color crema, coherentes, uniformes, parcialmente recristalizadas que afloran en forma continua a lo largo de más de 500 metros con un rumbo generalizado este-oeste y un buzamiento de 14-18 grados hacia el sur. Químicamente la roca presenta un porcentaje de Fe_2O_3 variando entre 0.48% y 0.92%; sílice entre 0.32% y 6.21%; MgO entre 0.38% y 0.54%; CO_3 entre 55.61% y 57.42%. De acuerdo con estos análisis el porcentaje de CaO podría variar entre 38% y 40%, lo cual daría un porcentaje neto de caliza química variando entre 93.61% y 97.42%.

Según observaciones de campo este tipo de estériles presenta una granulometría más gruesa que la marga calcárea, debido a que esta roca es mas compacta.

La resistencia intacta de la roca fue determinada a partir del ensayo de carga puntual, realizado sobre muestras de testigos de perforación, lo cual dio como resultado un índice de carga puntual corregido de $(3,02 \pm 0,61)$ MPa y una resistencia a la compresión de $(694,6 \pm 140)$ kg/cm². Para la determinación de la resistencia al corte se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras de roca provenientes de testigos de perforación, asumiendo que no existe cohesión entre los estériles, lo cual dio como resultado un ángulo de fricción residual de $(40,33 \pm 2,51)^\circ$.

Según un estudio petrográfico realizado anteriormente, se trata de calizas micritas de aspecto homogéneo, de grano fino compuesta por los elementos ortoquímicos entre un 70% y 75%, que incluye los precipitados de carbonatos, micrita y esparita. Los componentes aloquímicos lo constituyen los intraclastos, fósiles y pelets, los cuales oscilan entre 5% y 10%, mientras que los componentes terrígenos lo constituyen los granos de cuarzo, hematina, pirita y mica detrítica las cuales varían entre un 15% y 20%.

No se realizaron ensayos de compactación debido a que por la naturaleza gruesa de los estériles, estos no suelen ser representativos. El factor de esponjamiento del material estéril es de 1.2.

Por último, se puede mencionar en lo que se refiere a la geoquímica del material estéril que este tipo de materiales no presenta ningún tipo de contaminante, ya que según estudios anteriores la roca no se degrada químicamente.

5.5.3.3. Roca fosfática de bajo porcentaje (< 20 %)

Litológicamente se trata de una marga fosfática arenácea, la cual se encuentra interestratificada entre dos horizontes de caliza. Es una roca fosfática, fosilífera, silícea, heterogénea, biodetrítica, consolidada, con fragmentos de bivalvos y gasterópodos. Los granos de cuarzo se presentan desde muy irregulares hasta perfectamente redondeados, lo cual acusa un largo transporte. La roca se presenta en varias tonalidades que van desde gris claro a marrón oscuro.

Según observaciones de campo esta roca presenta una granulometría uniforme y gruesa.

Debido a que los volúmenes de roca fosfática a ser depositados son muy pequeños no es necesario determinar los parámetros de resistencia de este tipo de roca. Las escombreras para este tipo de rocas serán construidas con el ángulo de reposo de los materiales, que según se pudo observar en campo es de unos 37°.

Según estudios petrográficos realizados anteriormente sobre muestras de roca fosfática, se trata de fosforitas cuarzosas a moderadamente cuarzosas, de aspecto

homogéneo, de color fresco marrón oscuro, poroso, heterogranular, algunas estratificadas y otras de aspecto masivo. En el análisis petrográfico se observa abundante colofano tanto isotrópico como anisotrópico, que varía entre el 55% y el 80%, con porosidad primaria y secundaria. Los análisis por difracción de rayos X indican que el fosfato presente en todas las muestras es el “Hidroxilapatito”.

Por último se puede agregar que la roca fosfática no representa un contaminante para el ecosistema debido a que esta no se degrada químicamente.

5.5.4. Elección del emplazamiento de la escombrera

En la mina de Riecito la explotación del mineral comienza con el retiro de la capa vegetal, luego se procede a extraer la roca fosfática. De esta forma queda al descubierto la caliza inferior a la capa de roca fosfática. En la actualidad existe una extensión de terreno de esta caliza inferior que está disponible para la construcción de las escombreras necesarias para la mina.

Cabe destacar el hecho de que esta es una buena opción para la construcción de las escombreras, ya que de esta manera las escombreras estarían situadas sobre una fundación sólida de roca caliza, libre de capa vegetal y suelo, que son elementos que pueden afectar la estabilidad de la misma. Por otro lado también se evitaría el problema que representa la circulación de agua a través de la escombrera, ya que este terreno está libre de agua de escorrentía y subterránea, que puedan afectar la estabilidad. Otro aspecto importante que mencionar es el hecho de que este terreno del que se habla posee una inclinación muy baja, en comparación con el resto de las áreas disponibles. Por último, se debe mencionar que este espacio no representa ningún tipo de peligro para las poblaciones aledañas, ya que estas se encuentran muy alejadas del mismo.

Para realizar una evaluación cualitativa del emplazamiento mencionado anteriormente, se utilizó el método del índice de calidad, el cual toma en cuenta factores como el nivel freático, la naturaleza del cimiento, la pendiente topográfica, el nivel de afectación del entorno y la alteración del drenaje. Mediante este método se le

da un valor a cada uno de estos factores, dependiendo de las características del emplazamiento. Por último se calcula el índice de calidad del emplazamiento que, según el valor obtenido, indica la calidad del emplazamiento, según una escala establecida de valores.

El valor del índice de calidad del emplazamiento, Q_e , se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$Q_e = \alpha \cdot (\beta \cdot \theta)^{(\delta + \eta)}$$

En donde el factor α , de alteración de la capacidad portante del terreno debido al nivel freático tiene un valor de $\alpha = 1$, que corresponde a un emplazamiento sin nivel freático o con nivel a profundidad superior a 5 m.

El factor de resistencia de la cimentación, β , que depende de la naturaleza del cimiento y de la potencia de la capa superior del terreno de apoyo asume un valor de $\beta = 1$, debido a que no hay ningún tipo de suelo que recubra la cimentación.

El factor topográfico o de pendiente, θ , que varía en función de si la implantación se efectúa en terraplén o en ladera y en función de la inclinación de la zona. A este factor se le designa un valor de $\theta = 0,95$ que corresponde a un emplazamiento de topografía tipo ladera con una inclinación entre 1° y 5° .

A el factor relativo al entorno humano y material a ser afectados, η , que considera el riesgo de ruina de distintos elementos si se produjera la destrucción de la escombrera, se le designa según las características del emplazamiento un valor de $\eta = 1$, correspondiente a un entorno deshabitado.

Por último a el factor de alteración de la red de drenaje, δ , se le designa un valor de $\delta = 1$, que se corresponde con la situación de alteración de la red de drenaje nula.

Una vez establecidos todos los valores de los factores que intervienen en la ecuación, se procede a calcular el valor de Q_e , donde es igual a:

$$Q_e = 0,90$$

Según el valor obtenido de Q_e , se tiene un emplazamiento óptimo para cualquier tipo de estructura y tolerable para estructuras de gran volumen. Lo que da una idea de que el lugar que se ha propuesto para el emplazamiento de las escombreras es idóneo. Sin embargo, para poder tomar una decisión más confiable se debe realizar el estudio de este emplazamiento.

5.5.5. Estudio del emplazamiento de la escombrera

El estudio del emplazamiento abarca todos los tipos de materiales que se encuentran en el lugar donde se situara la escombrera. Es decir, la capa vegetal, los suelos y el sustrato rocoso. En el caso particular del emplazamiento propuesto para las escombreras de la mina de Riecito, solamente se necesitara realizar el estudio del sustrato rocoso, debido a que dicho emplazamiento no posee capa vegetal ni suelo superficial, por el hecho de ser una zona donde ya se realizo la explotación del mineral y el sustrato rocoso a quedado al descubierto.

El sustrato rocoso del emplazamiento, en el caso particular considerado, posee las mismas características mecánicas del material estéril, debido a que la capa que suprayace al yacimiento de roca fosfática, es similar a la capa infrayacente. Aunque esta capa situada por debajo del yacimiento de roca fosfática esta compuesta en su totalidad por caliza química, a diferencia de la capa superior compuesta por caliza química y marga calcárea. La principal diferencia entre las características de los estériles y el emplazamiento es que cuando hablamos de estéril nos referimos a un material que ya ha sido extraído de sus condiciones naturales, mientras que el emplazamiento se trata del mismo material pero en condiciones in situ, o lo que es lo mismo como un sustrato rocoso.

5.5.5.1. Propiedades del emplazamiento

Litológicamente se trata de unas calizas color crema, coherentes, uniformes, parcialmente recristalizadas que afloran en forma continúa a lo largo de más de 500 metros con un rumbo generalizado este-oeste y un buzamiento de 14-18 grados hacia el sur. Químicamente la roca presenta un porcentaje de Fe_2O_3 variando entre 0.48% y

0.92%; sílice entre 0.32% y 6.21%; MgO entre 0.38% y 0.54%; CO₃ entre 55.61% y 57.42%. De acuerdo con estos análisis el porcentaje de CaO podría variar entre 38% y 40%, lo cual daría un porcentaje neto de caliza química variando entre 93.61% y 97.42%.

La resistencia intacta de la roca fue determinada a partir del ensayo de carga puntual, realizado sobre muestras de testigos de perforación, lo cual dio como resultado un índice de carga puntual corregido de 3,02 MPa y una resistencia a la compresión de $(694,6 \pm 140)$ kg/cm². La densidad de la roca es de 2,2 tn/m³ (21,58 kN/m³). Por último, se puede asumir un espaciamiento de las discontinuidades entre 0,06 m y 0,2 m; un RQD de 70 %, con condiciones de junta ligeramente rugosa con paredes de roca dura, y un macizo rocoso totalmente seco.

Según el estudio petrográfico, se trata de calizas micritas de aspecto homogéneo, de grano fino compuesta por los elementos ortoquímicos entre un 70% y 75%, que incluye los precipitados de carbonatos, micrita y esparita. Los componentes aloquímicos lo constituyen los intraclastos, fósiles y pelets, los cuales oscilan entre 5% y 10%, mientras que los componentes terrígenos lo constituyen los granos de cuarzo, hematina, pirita y mica detrítica las cuales varían entre un 15% y 20%.

En cuanto a la durabilidad del sustrato rocoso se puede mencionar que según observaciones de campo este tipo de roca presenta poca meteorización de la superficie.

En cuanto a la conductividad hidráulica del material, cabe destacar que no es necesario hacer ensayos de laboratorio para determinarla ya que el sustrato rocoso del lugar de emplazamiento no presenta señales de agua subterránea y debido a que se encuentra en la parte mas alta del relieve solamente presenta agua de escorrentía.

5.5.5.2. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Tomando en cuenta la clasificación geomecánica de Beniaski, que da una estimación de la calidad del macizo rocoso tomando en cuenta la resistencia compresiva de la

roca, el índice de calidad de la roca (RQD), el espaciamiento de juntas, la condición de las juntas y la persistencia de agua.

Como se mencionó anteriormente el macizo rocoso se trata de una caliza cuyas características y valorizaciones según la clasificación de Beniaski son las siguientes (tabla 5.6):

Tabla 5.6 Clasificación del macizo rocoso

PARAMETRO	DESCRIPCION	VALORACION
σ_{ci} (kg/cm ²)	(694,6 ± 140)	8
Separación (cm)	0,06 m – 0,2 m	10
RQD (%)	70	14
Condiciones de juntas	Ligeramente rugosa. Paredes de roca dura	20
Agua subterránea	Totalmente seco	10
RMR		62
Calidad del macizo rocoso		II (Buena)

Tomando en cuenta los resultados de la clasificación del macizo rocoso según Bieniawski, se puede concluir que el macizo rocoso es de calidad buena y por lo tanto es una base sólida y segura para la implantación de la escombrera. Además, esta clasificación se corresponde con los valores de ángulo de fricción y cohesión presentados en la teoría.

5.5.6. Análisis de estabilidad de las escombreras

Como se ha mencionado anteriormente en la explotación minera de Riecito se generan cuatro tipos de estériles, a saber, capa vegetal, marga calcárea, caliza química y roca fosfática de bajo tenor.

En primer lugar se aplicara el método INESTEC, descrito en la parte teórica de esta investigación, para obtener una clasificación del grado de inestabilidad de las escombreras. Esto se realizara solamente para las escombreras de marga calcárea y caliza química, ya que estas son las mas grandes y por ende las mas propensas a presentar inestabilidad. Este método consiste en dar un puntaje a cada una de los factores que afectan la estabilidad de una escombrera, dependiendo de las condiciones y de las características de diseño previstas para la construcción de la misma. Luego, se realiza una sumatoria de los puntajes individuales; a partir de esta sumatoria se establece la clase de estabilidad de la escombrera y se presentan una serie de recomendaciones de diseño y construcción para cada caso.

A continuación se presenta una tabla (tabla 5.7) que resume las características de las escombreras y los puntajes respectivos de cada una de ellas.

Tabla 5.7 Clasificación de la escombrera según índice INESTEC

Factores que afectan la estabilidad		Descripción de condiciones	Clasificación
Configuración de la escombrera	Altura	Media (50m-100m)	50
	Volumen	Medio (1 Mm ³ – 50 Mm ³)	50
	Talud de vertido	Inclinado (>35°)	100
Pendiente del terreno de apoyo		Suave (< 10°)	0

Grado de confinamiento	Moderadamente Confinada (escombrera exenta)	50
Tipo de cimiento	Competente (materiales resistentes, no sometidos a presiones de poro adversas)	0
Calidad del material vertido	Alta (estéril resistente y durable con menos de 10 % de finos)	0
Método de construcción	Favorable (terrazas de menos de 25 m, plataformas amplias, construcción ascendente, banqueado)	0
Condiciones piezométricas	Favorables (presiones piezométricas bajas, aparición improbable de superficies freáticas en la escombrera)	0
Ritmo de vertido	Medio (de 25 a 200 m ³ por metro lineal de cresta por día)	50
Sismicidad	Bajo (sismicidad baja)	0
Puntaje total		300

Según la clasificación de estabilidad de escombreras INESTEC se trata de una escombrera con clasificación de estabilidad tipo II. A continuación se presenta un cuadro resumen donde se indican las recomendaciones para la investigación, diseño y construcción de este tipo de escombrera (tabla 5.8)

Tabla 5.8 Clase de estabilidad de las escombreras y actuación recomendada

Clase de estabilidad de la escombrera	Riesgo de Rotura	Recomendaciones para la investigación, diseño y construcción	Clasificación de la estabilidad de la escombrera (INESTEC)
II	Bajo	Reconocimiento del emplazamiento general. Pueden requerirse perforaciones en el terreno y toma de muestras. Algunos ensayos de laboratorio. La estabilidad puede o no influir en el diseño. Se requiere análisis de estabilidad básico. Restricciones limitadas en la construcción. Inspección con instrumentos y visual rutinaria.	300 - 600

Para el análisis de estabilidad de las escombreras se utilizara el software GEO – SLOPE 2004, el cual permite realizar el cálculo de estabilidad mediante varios métodos de análisis, como Fellenius, Janbu, Morgentern-Price, Bishop simplificado, entre otros.

El análisis de estabilidad se realizara tomando como referencia la escombrera de marga calcárea, debido a que este tipo de material es el que representa mayor cantidad de volumen a depositar y es el que tiene las condiciones geomecánicas mas desfavorables.

En el caso de la marga calcárea, se extraerá un volumen in situ de unos 4.000.000 m³, que considerando un factor de esponjamiento de 1,3 y la compactación del estéril por acción de las operaciones de vertido, se puede asumir un aumento del volumen del 10%, con lo que da como resultado la cantidad de 4.400.000 m³ de marga calcárea.

Para depositar este volumen se dispondrá de una zona que abarca un área de 450 mx300 m situada en la parte central del yacimiento. Se construirá una escombrera exenta con una terraza inicial de 15 m de altura y una inclinación de talud de 1.5:1, que será la plataforma base, la cual va desde la cota 595 hasta la cota 610, luego se construirán 5 terrazas de 10 m de altura con bermas de 10 m y una pendiente de 1% hacia el interior de las mismas, con un ángulo de inclinación de talud de 1.3:1 y ángulo general de 2.3:1. Esta configuración de las escombreras está condicionada primordialmente por la obtención de la máxima capacidad de volumen, debido a que los espacios disponibles para la localización de las escombreras son limitados.

Tomando en cuenta los parámetros descritos anteriormente se tiene que la capacidad de almacenamiento de la escombrera de marga calcárea es de 3.135.000 m³, lo que deja un volumen de 1.250.000 m³ de estéril de marga calcárea por depositar, que serán almacenados en los espacios libres que se crearan en el Bloque C a medida que avance la explotación minera. Por otro lado, en el caso de la escombrera de caliza química, la capacidad de almacenamiento es de 2.440.000 m³, lo que deja un volumen de aproximadamente 400.000 m³ de estéril de caliza por depositar. A continuación se resumen las características de diseño de las escombreras de la Mina Riecito (tabla 5.9 y 5.10).

Tabla 5.9 Características de diseño de la escombrera de marga calcárea

Características	Descripción
Area de escombrera	118.360 m ²
Capacidad de almacenamiento	3.135.000 m ³
Numero de terrazas	6

Altura de las terrazas	Primera	Altura = 15 m Inclinación = 1.5:1
	Siguientes	Altura = 10 m Inclinación 1.3:1
Ancho de berma	10 m	
Inclinación de berma	1% hacia interior de escombrera	
Angulo general	2.3:1	
Cota inicial	595 msnm	
Cota final	660 msnm	

Tabla 5.10 Características de diseño de la escombrera de caliza

Características	Descripción	
Area de escombrera	85.670 m ²	
Capacidad de almacenamiento	2.440.000 m ³	
Numero de terrazas	8	
Altura de las terrazas	Primera	Altura = 15 m Inclinación = 1.5:1
	Siguientes	Altura = 10 m Inclinación = 1.3:1
Ancho de berma	10 m	
Inclinación de berma	1% hacia interior de escombrera	

Angulo general	2.3:1
Cota inicial	575 msnm
Cota final	660 msnm

Debido a que no se cuenta con un levantamiento topográfico que permita realizar un modelo digital de la topografía más allá del límite de explotación, no es posible realizar el diseño digital de la escombrera de roca fosfática de bajo tenor. Pero por reconocimiento del terreno en campo se sabe que existen zonas disponibles para el depósito de este material, además el volumen de este tipo de estéril es muy pequeño y la ubicación de un espacio para depositar el mismo no representa un problema.

Para llevar a cabo el análisis de estabilidad de la escombrera de marga se procedió a realizar análisis parciales y totales, es decir, se evaluara la estabilidad del talud en diferentes escalas. La marga calcárea posee una densidad suelta de 2 ton/m^3 (19.62 kN/m^3), un ángulo de fricción interno de 35° y una cohesión de 0 kg/cm^2 .

En la figura 5.10 se presenta la configuración geométrica del problema para el análisis de estabilidad parcial, donde se muestra las líneas a partir de las cuales se definen las superficies de deslizamiento (puntos 8, 9,10 y 11) y la malla de las superficies de deslizamiento (puntos 12, 13 y 14) que controla la localización de los centros de rotura. Mediante la resolución del problema a través del programa SLOPE/W se obtuvieron los siguientes resultados para la evaluación individual del talud (tabla 5.9):

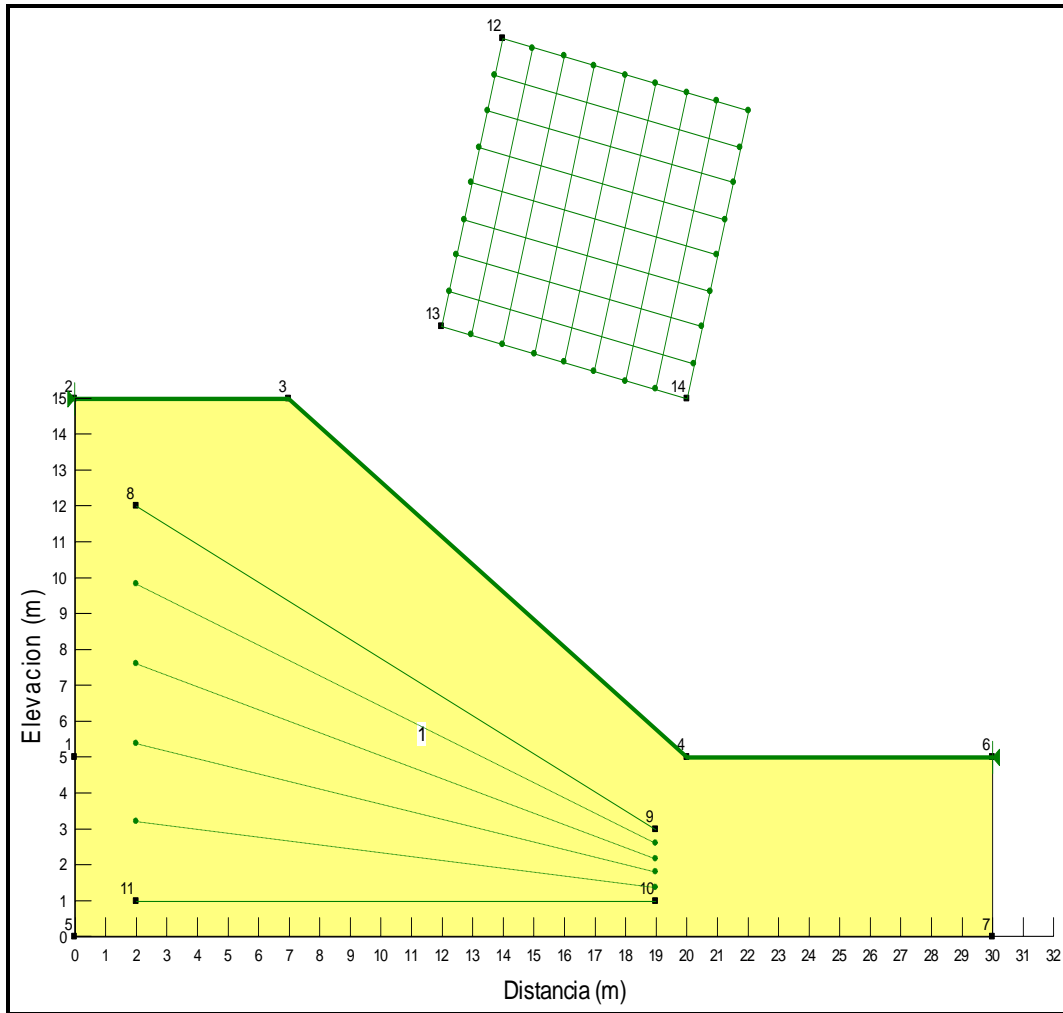


Figura 5.10 Configuración geométrica del talud de la escombrera de marga calcárea

Tabla 5.9 Resultado de factor de seguridad mínimo con programa SLOPE/W

Método de análisis	Factor de seguridad
Bishop	1,275
Morgenstern - Price	1,278

En la figura 5.11 se puede apreciar la superficie de deslizamiento crítica dada por el Método de Bishop, el cual da como resultado un factor de seguridad de 1,275.

También se pueden observar en esta figura los contornos de las líneas de igual factor de seguridad.

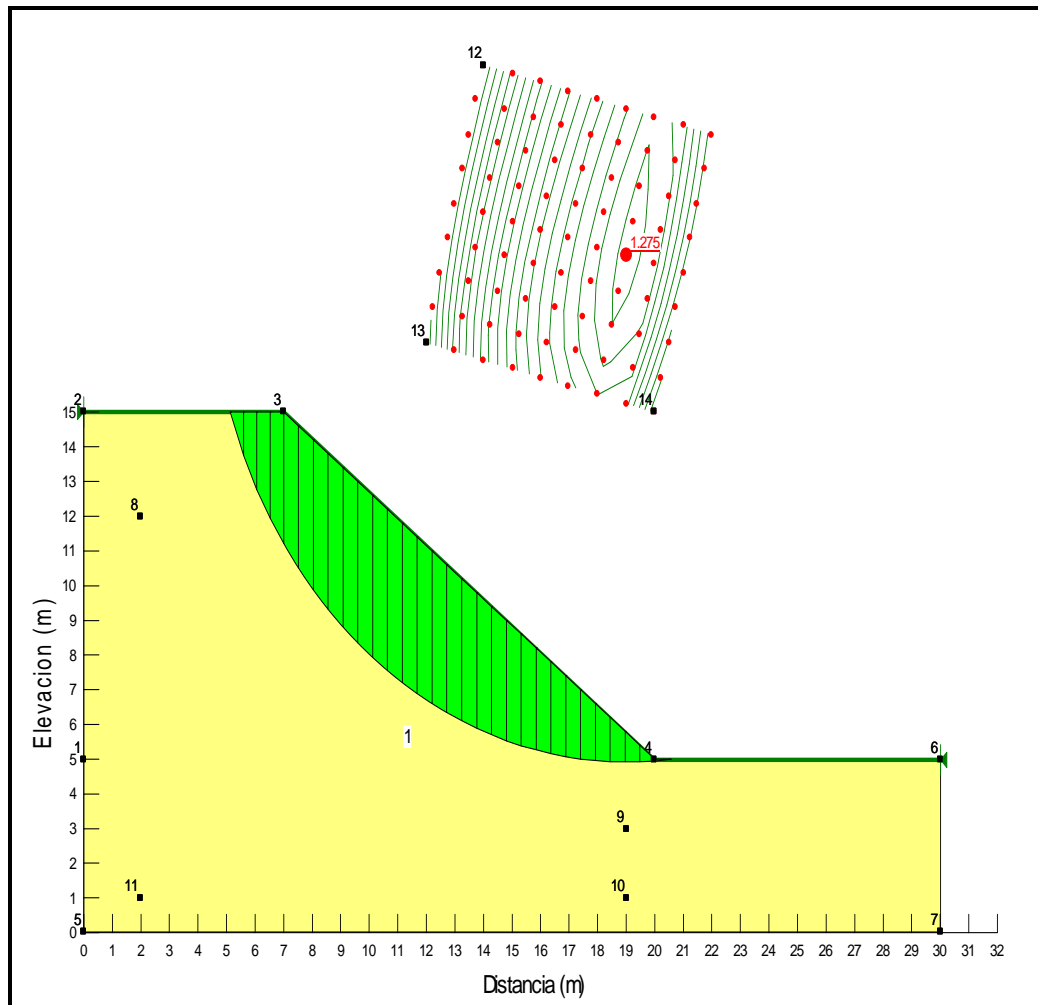


Figura 5.11 Superficie de deslizamiento parcial de la escombrera de marga calcárea

Por ultimo se hace el análisis de estabilidad total, que no es más que el análisis de la escombrera en su configuración geométrica final. En la figura 5.12 se muestra la configuración geométrica del problema, con las correspondientes líneas de radios y la malla de centros de las posibles superficies de deslizamiento. Y seguidamente se presenta la tabla 5.11 donde se muestran los factores de seguridad asociados a esta configuración geométrica, dados según la aplicación de diferentes métodos de cálculo de estabilidad.

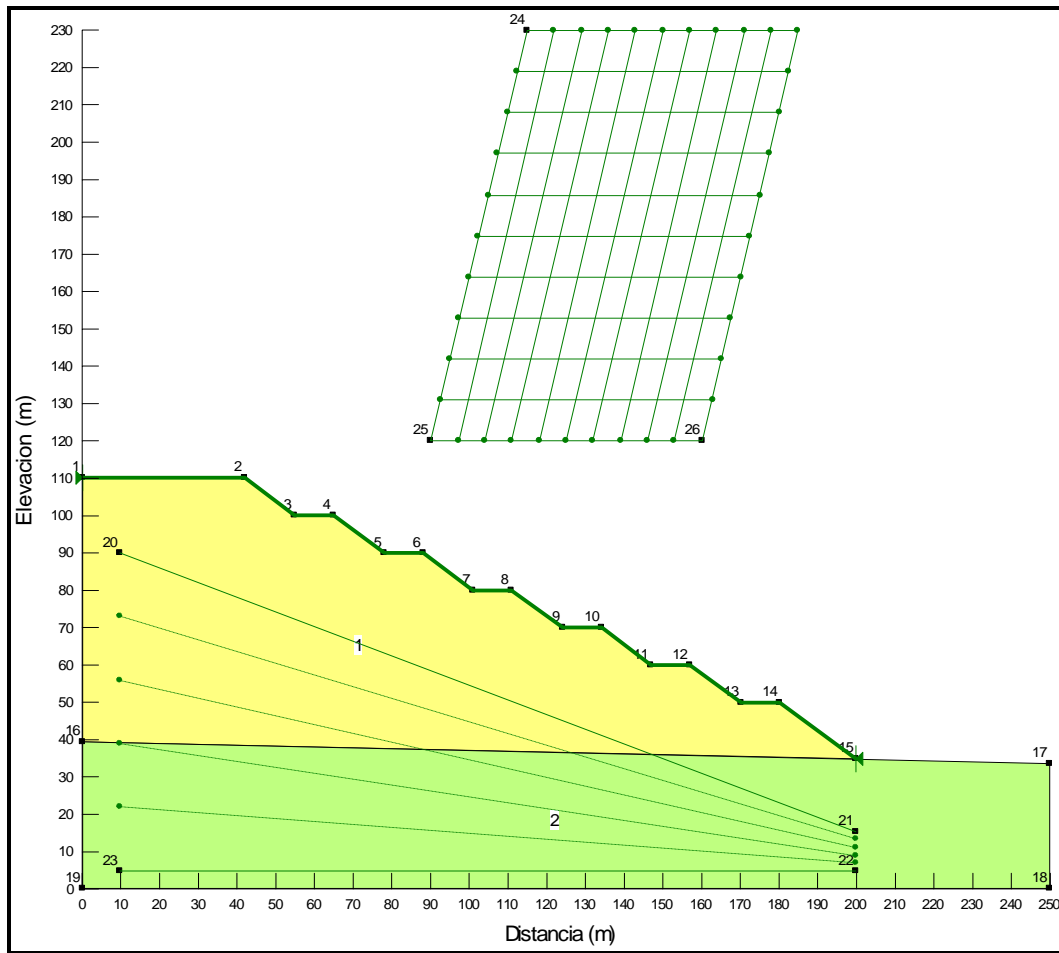


Figura 5.12 Configuración global del talud de la escombrera de marga calcárea

Tabla 5.11 Resultado de factor de seguridad mínimo con programa SLOPE/W

Método de análisis	Factor de seguridad
Bishop	1,881
Morgenstern – Price	1,880

En la figura 5.13 se puede apreciar la superficie de deslizamiento crítica para la escombrera de marga calcárea en su configuración final, dada por el Método de

Bishop, el cual arroja un factor de seguridad de 1,881. También se pueden observar en esta figura los contornos de las líneas de igual factor de seguridad.

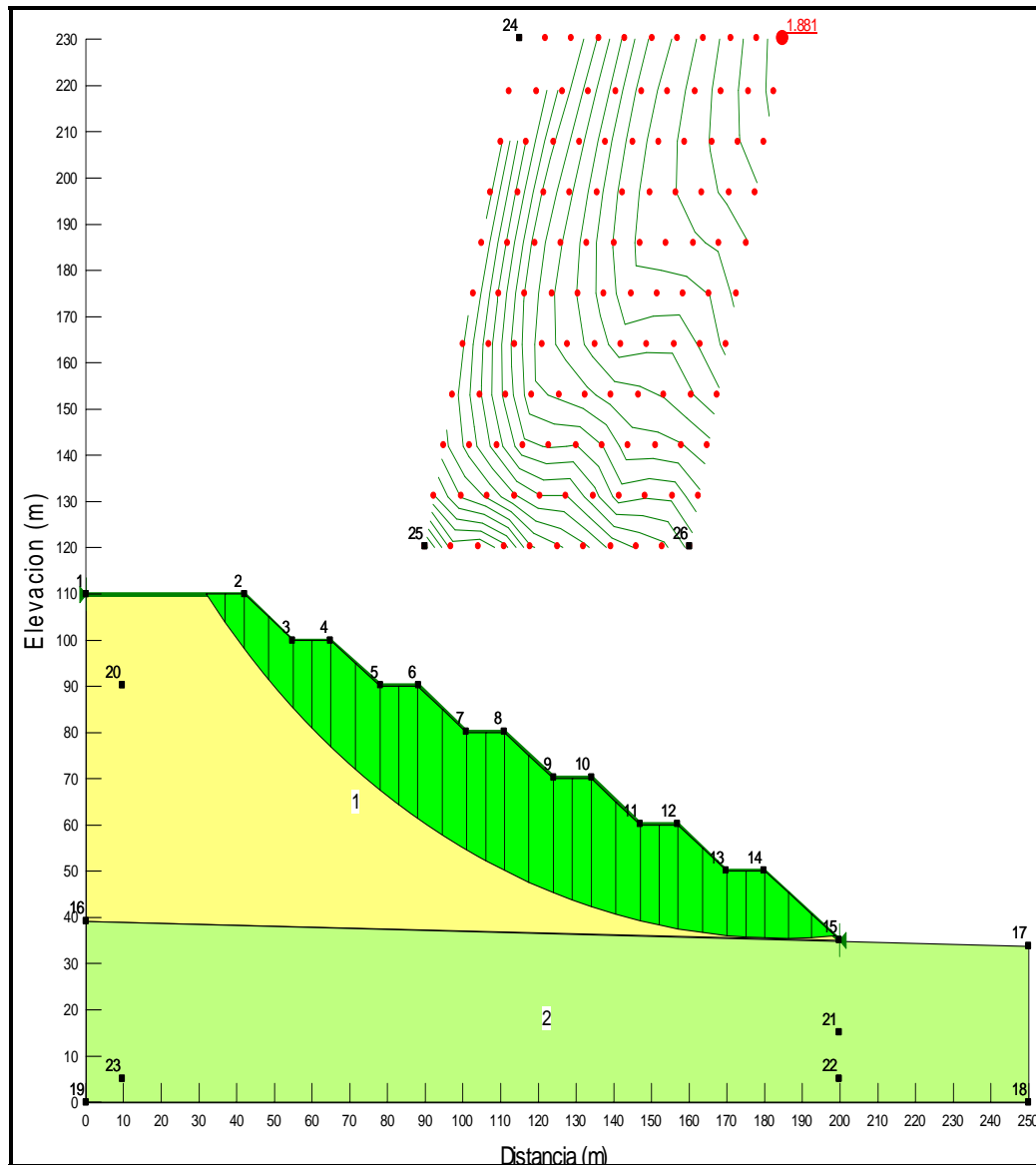


Figura 5.13 Superficie de deslizamiento global de la escombrera de margá calcárea

Tomando en cuenta los resultados obtenidos a través del análisis de estabilidad, y contrastando estos valores con los recomendados en la teoría, se puede deducir que la estabilidad de las escombreras es muy satisfactoria. Según la teoría, el factor de

seguridad recomendado para una escombrera sin riesgo para personas, instalaciones o servicios y una altura mayor a los 30 m es de 1,20. Según los análisis de estabilidad realizados, el mínimo factor de seguridad que se obtuvo fue de 1,275 y esta dado para el análisis de estabilidad parcial del talud de la escombrera de marga calcárea.

5.5.7. Especificaciones técnicas para la construcción de las escombreras

En este apartado se describe el sistema de drenaje de la escombrera y el método de vertido utilizado para su construcción. Cabe destacar que cada uno de estos aspectos ha sido propuesto tomando en cuenta la caracterización geotécnica del sustrato rocoso de la escombrera y la calidad de los estériles a depositar en la misma.

5.5.7.1. Sistema constructivo de las escombreras

Como ya se ha indicado anteriormente las escombreras de la mina Riecito estarán ubicadas directamente sobre un sustrato rocoso de buena calidad (tipo II según clasificación de Bieniawski). Por otro lado se tiene una pendiente máxima del terreno de implantación de 7%.

El tipo de secuencia a seguir para la construcción de la escombrera será el denominado como fases superpuestas y compactadas, ya que este tipo de construcción aporta una mayor estabilidad al disminuir los taludes finales y aumentar las propiedades resistentes de los estériles mediante la compactación, a la vez que se aumenta la capacidad de almacenamiento de la escombrera, pues se reduce el factor de esponjamiento.

Para construir una base de apoyo firme a las escombreras, se procederá a colocar un dren rocoso en la base de las mismas, constituido por bloques de roca dura estratégicamente colocados, el cual tendrá unos 50 cm de espesor (figura 5.14). En lo posible se tratara de construir este dren rocoso con los estériles de caliza, por ser estos de mejor calidad que los de marga calcárea. Este procedimiento contribuirá con la estabilidad de la escombrera, ya que este tipo de material servirá de filtro para el agua que circula a través de la misma. Esta situación es favorable para garantizar que no va

a aparecer una presión de poros en la estructura ya construida que desemboque en inestabilidades. Por otro lado, se evitara que se deposite material fino en el contacto de la escombrera con el terreno, que es un factor que incide negativamente en la estabilidad de la escombrera.

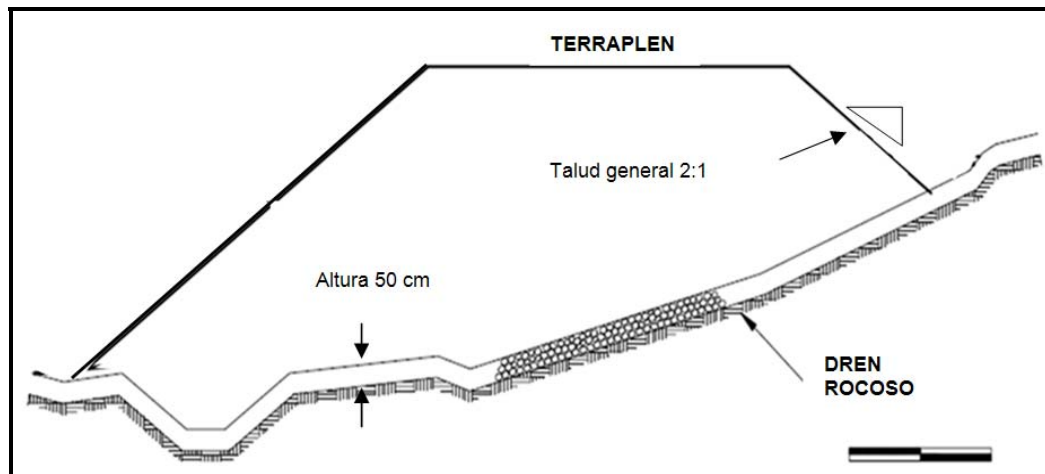


Figura 5.14 Diagrama de dren rocoso en la base de la escombrera

La colocación del material se realizara mediante camiones de volteo, debiéndose disponer de bulldozer u otro equipo adecuado para asegurar capas de espesor uniforme.

La construcción comenzara por el punto mas bajo del perfil transversal y seguirá por capas superpuestas hasta que se alcance todo en ancho del terraplén. Se colocara la siguiente capa de estéril solo cuando la capa precedente se encuentre debidamente compactada. El espesor de las capas compactadas se deberá encontrar entre 0,15 m y 0,50 m.

Para aprovechar al máximo el volumen disponible se procederá a construir en primer lugar la escombrera de marga calcárea, avanzando en sentido este-oeste (ascendente). La capacidad de almacenamiento de esta escombrera es de 3.135.000 m³. El estéril a depositar en la misma proviene del recubrimiento del mineral del Bloque B-este, que representa un volumen de 2.500.000 m³, y el resto proviene del recubrimiento del

Bloque C. En caso de que se tenga que extraer caliza química durante la remoción del recubrimiento del Bloque B-este, esta puede ser depositada en la escombrera de marga calcárea, por ser esta un material de mejor calidad, ya que la construcción de la escombrera de caliza química se iniciara una vez terminada la extracción del mineral del Bloque B-este. En la figura 5.15 se presenta la topografía actual de la mina y la proyección de la escombrera de marga en esta topografía.

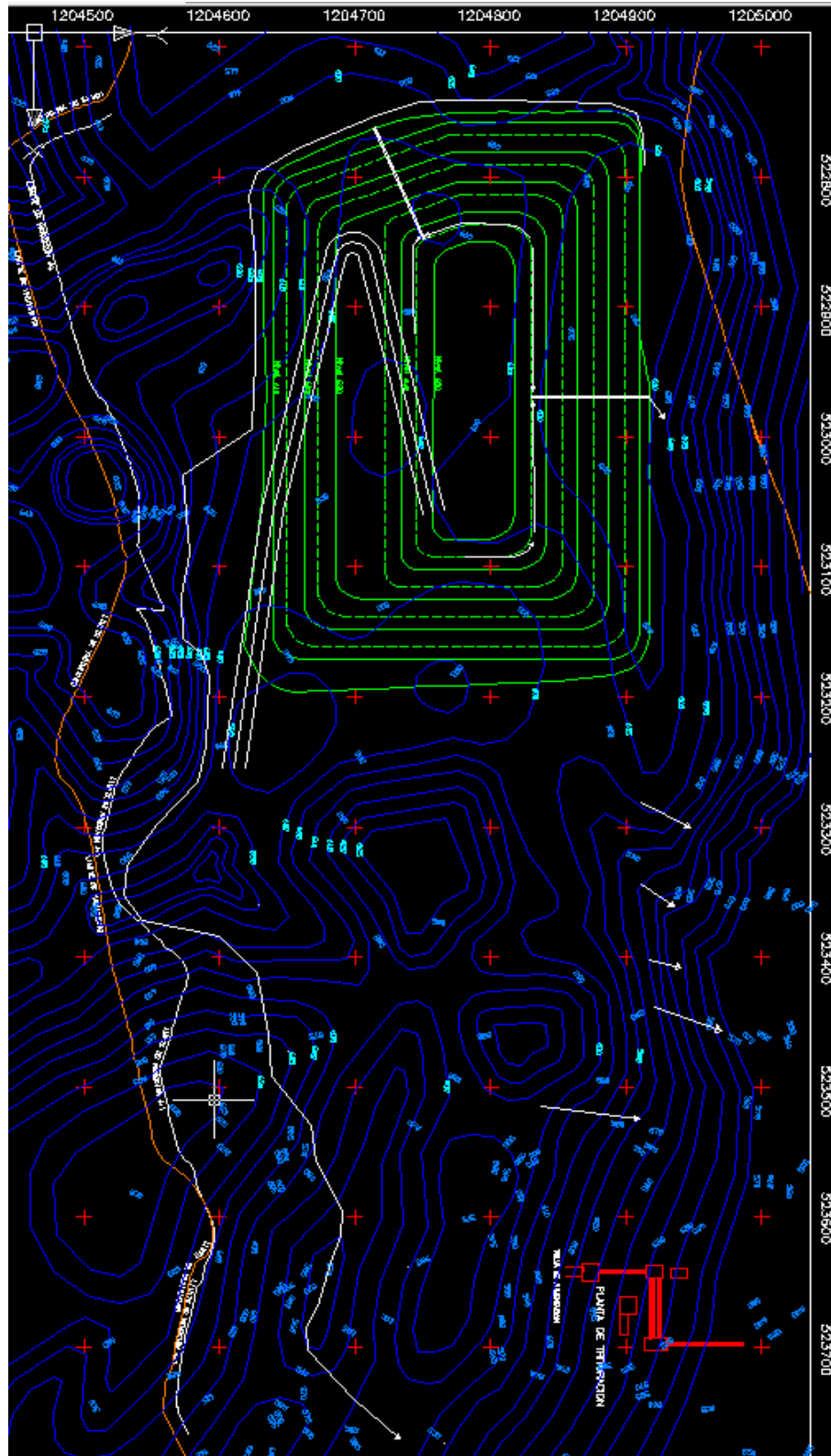


Figura 5.15 Topografía actual de la Mina de Riecito y proyección de la escombrera de marga

Una vez removido todo el mineral que se encuentra en el Bloque B-este, se comenzara la construcción de la escombrera de caliza química. La misma va desde el talud del pit final donde se encuentra la planta de trituración, hasta hacer contacto con el talud este de la escombrera de margas. Esta configuración se diseño con la finalidad de aprovechar al máximo el volumen disponible, ya que si se diseñaran las escombreras una al lado de la otra, no se utilizaría el volumen existente entre ambas. En la figura 5.16 se muestra la configuración de la escombrera de caliza química.

En la figura también se pueden apreciar las vías de acceso a las escombreras. Para la construcción de la escombrera de margas calcáreas se ha diseñado una vía continua que va desde la cota 590 hasta el último nivel de la escombrera. Mientras que para la escombrera de caliza química, se ha diseñado una vía que bordea la escombrera por los taludes este y sur, la cual comienza en la cota 570 y permitirá llegar hasta el nivel 620 de la misma. Luego, para acceder a los siguientes niveles de la escombrera de caliza química se tomara la misma vía construida para la escombrera de margas calcáreas, en cuyo caso se ha dejado una berma de unos 35 m en el nivel 630 que permitirá que los camiones puedan girar y dirigirse hacia la escombrera de caliza química.

Al construir la escombrera de caliza química de esta forma, el volumen de almacenamiento de la misma es de 2.440.000 m³. Como se puede ver en la figura anterior, al final de la construcción las dos escombreras quedaran unidas en una sola. En la figura 5.17 se presenta el perfil longitudinal de las escombreras al final de su construcción.

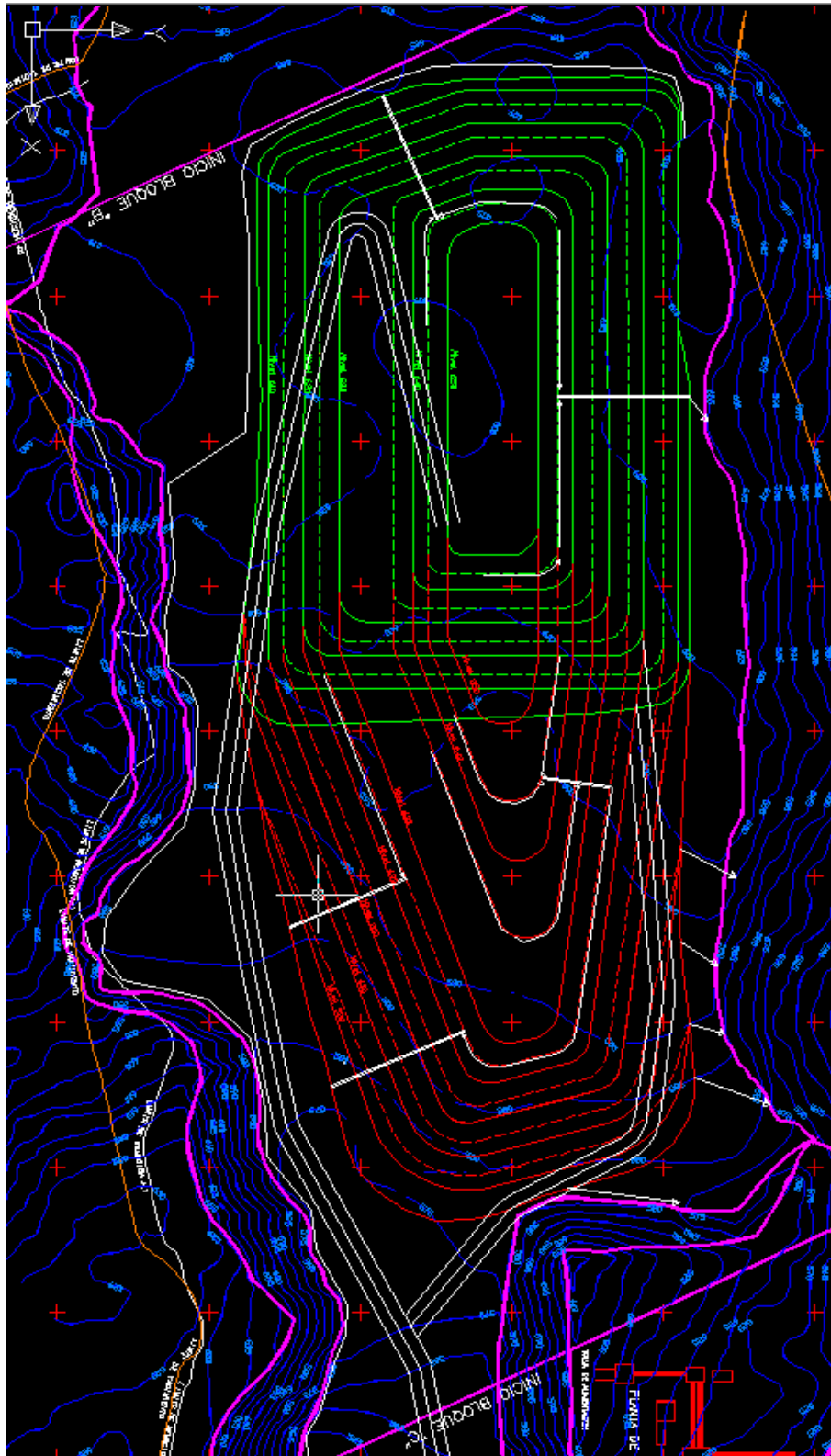


Figura 5.16 Proyección de las escombreras en el pit final de la mina

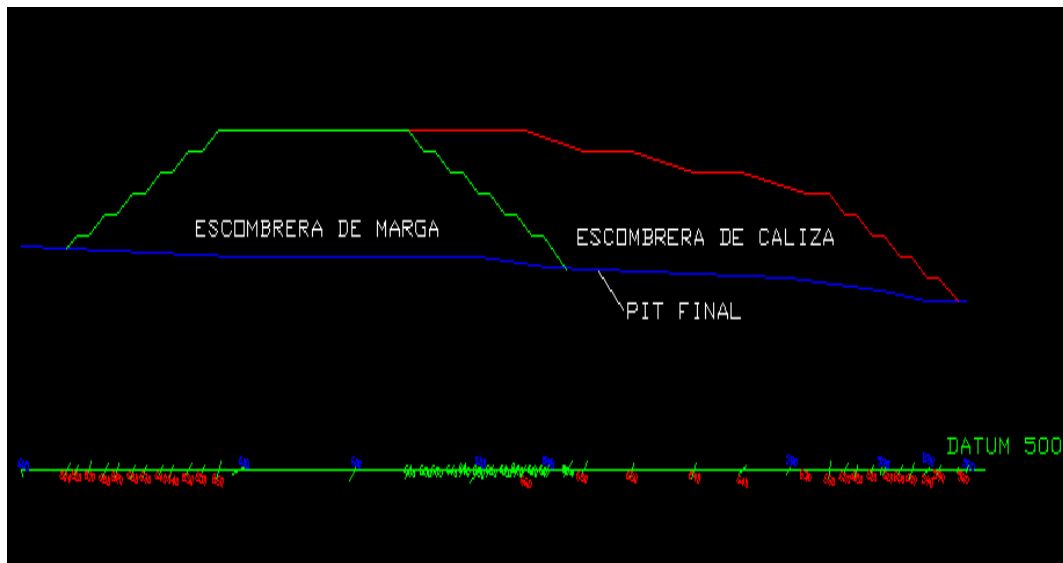


Figura 5.17 Perfil longitudinal de las escombreras al final de la construcción

Cabe destacar que esta configuración no representa un problema en caso de que se decida realizar el proyecto de aprovechamiento de la caliza y la marga existente en la zona, debido a que el material que presenta mejor calidad (caliza química) se encuentra sobre el material de menor calidad. De esta forma, en caso de que se decida remover primero la marga existente en la escombrera para ser utilizada como agregado para la construcción, se puede remover la caliza que se encuentra sobre esta y mezclarla sin que esto afecte la calidad de la marga, por lo que no es necesario realizar un remanejo del material.

5.5.7.2. Sistema de drenaje de la escombrera

En el sustrato rocoso no hay presencia de agua subterránea. Por lo que la única fuente de agua que afectara a las escombreras es la de escorrentía.

Para canalizar la evacuación de las aguas en el pie de las escombreras y en el pie de cada terraza, se prevé la construcción de un dren perimetral, el mismo evitara la erosión de la base de los taludes por acción de las aguas de escorrentía, al mismo tiempo que canaliza las aguas y las conduce a los sistemas de drenaje de la mina. En la figura 5.18 se presenta el diseño en perfil de este sistema.

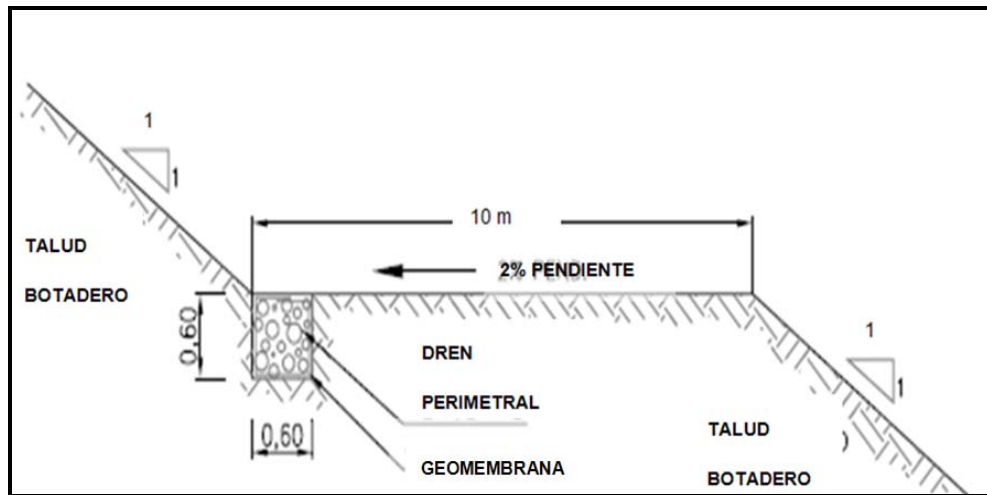
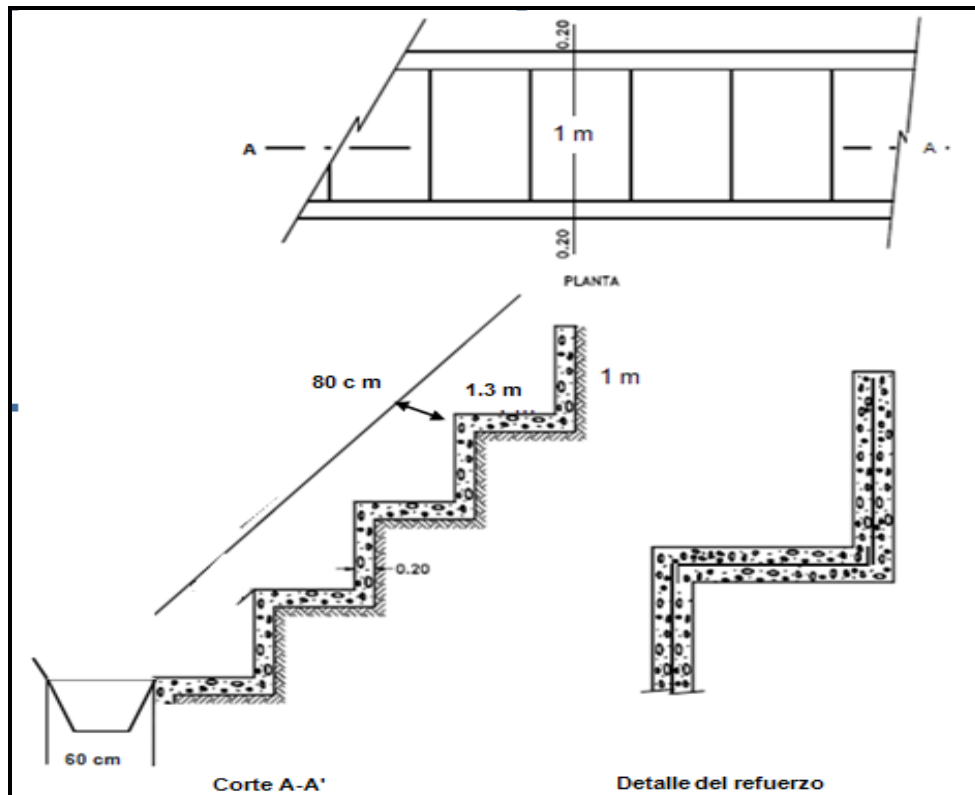


Figura 5.18 Perfil del dren perimetral en la base de las terrazas.

Para colectar y disipar las aguas de la escombrera se construirá un canal en gradería como el de la figura 5.19. Este sistema es muy eficiente para evitar que el agua produzca erosión en los taludes de la escombrera. Para canalizar el agua, esta se recolectará hacia las graderías a través de los drenes perimetrales con una pendiente no mayor al 1%. Por otro lado, se construirán cunetas de 1 m de ancho por 60 cm de profundidad, con una sección transversal trapezoidal, para llevar el agua desde el pie de cada talud hasta la gradería del siguiente.



5.19 Canal en gradera para la recolección y disipación de las aguas.

En el plano anexo se presenta el diseño de las escombreras, donde se señala la ubicación de las mismas, las obras de drenaje necesarias, las vías de acceso, y se muestra un perfil longitudinal de las escombreras.

5.5.8. Plan de manejo de equipos mineros

El plan de manejo de los equipos de la Mina Riecito debe hacerse de manera racional, debido a que la cantidad de equipos existentes hasta ahora son los necesarios para cumplir con la demanda de roca fosfática de 400.000 tn/año. Como ya se ha mencionado a lo largo de esta investigación está planteado un aumento de la producción de roca fosfática a 1.000.000 tn/año, lo que implica un aumento en la producción de estéril. Otro factor que incide en el incremento de la cantidad de estéril es el hecho de que la relación de remoción aumenta en el sentido de avance de la explotación.

En la actualidad la mina cuenta con 2 cargadores frontales CAT-988 B con capacidad de pala de 5,6 m³, 3 camiones roqueros CAT-773 B con tolvas de 50 tn y dos tractores Caterpillar (D-10 y D-8).

Según el Plan de Explotación de la Mina Riecito 2005 presentado por INGEOMIN, las producciones de la combinación pala-camión descrita anteriormente arroja los siguientes resultados (tabla 5.12):

Tabla 5.12 Productividad de los equipos de acarreo de la Mina Riecito

PARAMETRO	VALOR
Tiempo de ciclo (recorrido = 1000 m)	12 min
Viajes por camión	5 viajes/hora
Capacidad de camión	50 tn
Producción horaria por camión	250 tn/hora
Producción diaria por camión (90% efectividad)	2.025 tn/día
Producción mensual por camión (26 días)	52.650 tn/mes
Producción anual por camión (10 meses)	526.500 tn/año

Según estos cálculos se necesitarían dos camiones roqueros destinados a la carga de mineral para cumplir con la producción de 1.000.000 tn/año prevista en el futuro. De igual manera se requerirá de cuatro camiones para la carga de estéril, asumiendo una relación de remoción de 2:1. Tomando en cuenta que actualmente existen en la mina tres camiones, se prevé la necesidad de tres camiones adicionales.

Con respecto a los cargadores frontales, no se hace necesario el uso de un cargador adicional para el mineral, ya que el tiempo de carga de los camiones es de 5 minutos, mientras que el tiempo de viaje es de 7 minutos, por lo que queda una holgura de 2

minutos. Aunque, para la carga de estéril será necesario el uso de un cargador adicional, ya que habrá cuatro camiones destinados a la carga de mineral.

Actualmente existen en la mina 2 tractores, de los cuales uno es usado para la extracción de mineral y el otro es usado para la remoción de estéril, dependiendo de las metas de producción. Se prevé que con el aumento de producción deberá incorporarse unidades adicionales, debido a que los volúmenes de roca fosfática y estéril a remover aumentaran considerablemente, y con el aumento de la cantidad de camiones se deberá aumentar de manera proporcional el número de tractores, para que se pueda cumplir con los requerimientos de extracción de mineral, y de extendido y compactación de estéril.

CONCLUSIONES

Después de realizado el trabajo de investigación para el diseño de las escombreras de la mina de roca fosfática, Concesión Riecito, ubicada en el Municipio Jacura del Estado Falcón, se concluye lo siguiente:

- El volumen total de estéril a depositar en las escombreras es de 18.754,20 m³ de capa vegetal, 4.163.937 m³ de marga calcárea, 2.775.958 m³ de caliza química y 230.770 m³ de roca fosfática de bajo porcentaje, y un volumen muy pequeño proveniente de algunos lentes de arcilla. Tomando en cuenta el volumen de estéril a depositar, las escombreras se ubican en la categoría de medianas a pequeñas.
- ❖ La capa vegetal esta compuesta por suelos con un desarrollo pedogenético incipiente y se clasifican dentro del orden de los inceptisoles. Este tipo de material no se caracteriza geomecánicamente, y estos se depositaran con el ángulo de reposo natural.
- ❖ Los estériles generados por la marga calcárea tienen buena durabilidad, buena resistencia al corte y presentan una granulometría gruesa y uniforme, por lo cual se concluye que son de buena calidad. El ángulo de fricción es de 34° y la cohesión de 0,1 kg/cm².
- ❖ Los estériles generados por la caliza química tienen una alta durabilidad, alta resistencia al corte y presentan una granulometría muy gruesa y uniforme, por lo cual se clasifican como estériles de muy buena calidad. El ángulo de fricción de los estériles es de 40° y la cohesión de 0,2 kg/cm².
- ❖ Los estériles generados por la roca fosfática de bajo porcentaje tienen poca durabilidad, granulometría media y presentan un ángulo de reposo de 37°. Por lo cual se pueden clasificar como de calidad media.

- Las escombreras de marga calcárea y caliza química se ubicaran en un área disponible en la zona central del yacimiento, la cual quedara libre a medida que vaya avanzando la explotación de la roca fosfática. Este terreno es óptimo para cualquier tipo de estructura y tolerable para estructuras de gran volumen. Por otro lado, para el depósito de los estériles de roca fosfática de bajo porcentaje y de la capa vegetal, no se diseñaron las escombreras, ya que no se cuenta con información topográfica más amplia de la zona, y no están consideradas en esta tesis. Además de que los volúmenes a depositar de estos materiales es pequeño, por lo que localizar un espacio para su almacenamiento no representa mayor problema.
- Tomando en cuenta los resultados de la clasificación del macizo rocoso según Bieniawski, se puede concluir que el macizo rocoso es de calidad buena y por lo tanto es una base sólida y segura para la implantación de la escombrera.
- Se diseñaron dos escombreras de tipo trapezoidal, conformada por terrazas con una inclinación de talud de 1.3:1, altura de 10 m y berma de 10 m. La inclinación general de los taludes de las escombreras es de 2.3:1.
- La escombrera de marga calcárea tendrá una base de 118.360 m² de área, una altura de 55 m, comenzando en la cota 595 y terminando en la terraza 650, y tendrá una capacidad de almacenamiento de 2.900.000 m³, con lo cual queda un resto de 1.485.000 m³ de estéril de marga calcárea que serán depositados en las áreas libres que se crearan a medida que avance la explotación del Bloque C.
- La escombrera de caliza química se diseño con una base de 85.670 m² de área, altura de 75 m, comenzando en la cota 575 y finalizando en la terraza 650 de la escombrera, y tendrá una capacidad de almacenamiento de 2.240.000 m³, con lo cual queda un resto de 600.000 m³ de estéril que serán depositados en las áreas libres que se crearan a medida que avance la explotación del Bloque C.

- El análisis de estabilidad de los taludes de las escombreras, para los que se tomo las características geomecánicas de la marga calcárea por ser las más desfavorables, arrojó un factor de seguridad mínimo de 1,275. Este factor de seguridad esta por encima del factor de seguridad recomendado que es de 1,2 para este tipo de escombreras. Por lo cual se concluye que el diseño que se presenta es estable.
- Se construirá un dren de piedra picada de 50 cm de espesor en la base de cada una de las escombreras, para garantizar un apoyo firme y un buen sistema de drenaje de fondo que sirva de filtro para las aguas que circulan a través de las escombreras, al mismo tiempo que evita la aparición de una presión de poros adversa que cause inestabilidad en la estructura.
 - ❖ Se construirá un dren perimetral al pie de las escombreras y en la base de cada terraza que permita la recolección de las aguas de escorrentía, el cual evitara la erosión de la base de los taludes por efecto del agua, al mismo tiempo que la canaliza y la dirige a los sistemas de drenaje de la mina.
- Las escombreras se construirán mediante el sistema de fases superpuestas y compactadas, ya que este sistema ofrece mayor estabilidad al mejorar las propiedades resistentes de los estériles y reducir los taludes finales. Con este sistema también se aumenta la capacidad de almacenamiento al reducir el factor de esponjamiento. El espesor de las capas de estéril a ser compactadas no deberá ser mayor de 50 cm, de esta forma se garantiza una mejor compactación, y por ende una mayor resistencia de los estériles.
- Se prevé el requerimiento de unidades adicionales de equipos de remoción, carga y acarreo para poder cumplir con la meta de remoción de estériles, al aumentar la producción de roca fosfática a 1.000.000 tn/año prevista, ya que con la flota existente en la mina no se podrá cumplir con la misma.

RECOMENDACIONES

Una vez realizada la investigación del diseño de las escombreras de la Mina Riecito, se recomienda lo siguiente:

- Realizar un levantamiento topográfico de las zonas cercanas al límite de la explotación, para así tener un conocimiento mas detallado de las condiciones topográficas del terreno en esta zona y ubicar las escombreras de roca fosfática de bajo porcentaje y de capa vegetal.
- Depositar la roca fosfática de bajo porcentaje y capa vegetal con el ángulo de reposo de los materiales, debido a que los volúmenes a remover son pequeños.
- Extraer las reservas de roca fosfática que quedan actualmente en el Bloque B, para dejar libre el área que se destinara para la escombrera de marga calcárea.
- Utilizar los estériles provenientes de la caliza química para construir la base de las escombreras, ya que este tipo de estériles es el de mejor calidad. Esto garantiza un buen sistema de drenaje de fondo a las escombreras.
- Construir los drenes perimetrales de acuerdo a lo especificado en el diseño, para que se garantice el drenaje superficial de las escombreras.
- Realizar un estudio detallado acerca del requerimiento de equipos en la Mina de Riecito, tomando en cuenta el aumento de producción previsto.

BIBLIOGRAFIA

- Castillejo C., M. (1993). Análisis comparativo de los métodos de estabilidad de taludes y su control. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Castillo Q., Pedro E. (1995). Flotación de rocas fosfáticas de Riecito, Estado Falcón. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- CIEN (Comisión Interfiliales De Estratigrafía y Nomenclatura). Léxico Estratigráfico Electrónico de Venezuela. INTEVEP-PDVSA [edición electrónica]. Disponible: www.pdvsa.com/lexico. [Consulta, 2007 julio 14].
- CONTRERAS, Carlos E. (2001). Determinación de la altura crítica y ángulo de inclinación máximo de taludes de basura (relleno sanitario La Bonanza) Charallave, Estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. (1972). Evaluación de reservas de rocas fosfáticas en el Cerro Riecito, Estado Falcón. Tomo V. Caracas.
- De Marco Z., Pietro. (1995). Determinación de la resistencia mecánica de las rocas mediante ensayos de laboratorio. Trabajo de ascenso. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- De Marco Z., Pietro. (2004). Guía de estudios de la cátedra Mecánica de Rocas. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Fuenmayor G., Oswaldo E. (2001). Caracterización geomecánica de las rocas de la cantera perteneciente a la Corporación de Cemento Andino C.A. Ubicada en el Municipio Candelaria, Estado Trujillo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- González de Juana, C., Iturralde, J. y Picard, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas, Ediciones Foninves, Tomo I y II.

- González, F. (2002). Ingeniería Geológica. España: Pearson Educación - Prentice Hall. 744 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., y Corkum B. (2002) Hoek - Brown failure criterion. Ponencia presentada en el 15avo Simposio de mecánica de rocas de Canadá. Canadá.
- Ayala, C., Francisco, J. (2006). Manual de Ingeniería de Taludes, 1ª Edición 2ª reimpresión. Madrid: Graficas Monterreina. 456 p.
- Ayala, F. y otros. (2004) Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España: 359 p.
- Gómez, J. (1995) Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España: 604 p.
- INGEOMIN. (2005) Plan anual de explotación de la Mina de Riecito 2005. Caracas, INGEOMIN: 2005.
- JARAMILLO, Jorge. Guía para el diseño y operación de rellenos sanitarios manuales [Artículo en línea]. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/>. [Consulta: 2007, Agosto 24].
- Donaire, M. (2000). Guía para el diseño y construcción de escombreras [Libro en línea]. Junta de Andalucía. Disponible en: www.juntadeandalucia.es. [Consulta: 2007, Junio 5].
- León, Luis. (2002). Manual del curso Autodesk Land Desktop. Caracas.
- López, Germán. (2004). Introducción al uso del programa SLOPE/W. Universidad de Córdoba. Disponible en: http://rocasysuelos.iespana.es/docencia_archivos/ [Consulta: 2007, Diciembre 08].
- Eaton, Tim. (2007). Diseño y operación de grandes botaderos [Libro en línea]. Ministerio de Energía y Minas de British Columbia. Disponible: www.edumine.com. [Consulta: 2008, Febrero 15].

- Montes, J. y Pimentel, L. (1974). Determinación del grado de escarificabilidad de algunos yacimientos minerales por medios geofísicos. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar.
- Spalding, James. (1997). Venezuela Riecito phosphate deposit reserves & mine plan review report. Morón.
- SIEA. Informe geotécnico del botadero DXIII. Estudio de estabilidad de taludes [Artículo en línea]. Disponible en www.e-seia.cl. [Consulta: 2008, Febrero 5].
- Suarez, D., Jaime. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda. Publicaciones UIS. 541 p.

ANEXOS