

## ALTERABILIDAD DE PIZARRAS Y SU INCIDENCIA GEOTECNICA EN EXPLOTACIONES MINERAS A CIELO ABIERTO

L. GONZALEZ DE VALLEJO

Dr. En Geología Económica. E.N. Adaro. Madrid.

C.S. OTEO MAZO

Dr. Ing. de C.C. y P. Lab. de Carreteras y Geotécnica (CDX)

### RESUMEN

La apertura de excavaciones mineras a cielo abierto en pizarras viene afectando a materiales de diferente estado y composición. La alteración que la excavación supone libera diversos mecanismos de meteorización. En estos casos es necesario prever el comportamiento evolutivo del material (desde el punto de vista de la meteorización tanto para establecer el diseño de detalle de la excavación (pendiente de bancos, anchura de bermas, drenaje, etc), como del propio talud general, cuando la meteorización es muy acentuada. En esta comunicación se presenta la experiencia obtenida en varias explotaciones mineras en que ha habido que estudiar estos problemas, con el condicionante de que deben utilizarse ensayos y criterios sencillos con la máxima aplicabilidad posible. Se presta atención especial a los mecanismos de actuación rápida, por su incidencia en los procesos mineros extractivos a corto plazo.

### INTRODUCCION

El incremento de las operaciones mineras de superficie para explotaciones de carbón, ha precisado de estudios geotécnicos de creciente importancia, en consonancia con las situaciones creadas por cortas de gran extensión y profundidad. Los métodos más usados de explotación implican, en unos casos, la apertura de frentes y taludes que son posteriormente rellenados con los propios estériles en una operación cíclica. Este procedimiento denominado minería de transferencia, permite mantener los taludes operativos durante cortos plazos de tiempo. Sin embargo, se observa en determinados sectores de las cortas, y con variable importancia, los efectos de una rápida degradación de los materiales rocosos, pizarras en su mayoría con pérdidas de sus propiedades, y transformación a materiales de comportamiento más cercano al de una roca muy débil e incluso un suelo.

Estos fenómenos se manifiestan con mayor intensidad en las explotaciones cuyos métodos implican la permanencia prolongada, e incluso definitiva, de los taludes. Los problemas más característicos que genera esta rápida meteorización de las pizarras, pueden resumirse en los siguientes:

- Roturas generalmente superficiales, que suelen afectar a taludes de banco, y reblandecimiento en las bermas de las pistas de paso.
- Degradación progresiva de taludes finales, con aparición de fenómenos de inestabilidad, y riesgo de roturas de mayor alcance.

Los problemas citados han planteado la necesidad de estudiar con detalle las causas que producen esta rápida alteración, la delimitación de los sectores potencialmente más alterados, sus propiedades geotécnicas y su modelo geomecánico al de comportamiento. Estos estudios se han llevado a cabo en varias cortas situadas en distintas cuencas carboníferas de la geografía española, cuyos resultados se presentan a continuación.

### COMPOSICION Y FABRICA DE LAS PIZARRAS

En las distintas cuencas carboníferas estudiadas, (Cuenca del Guadiato-Córdoba, y Fuertollano-Ciudad Real), los materiales encontrados, son esencialmente pizarras lutíticas, entre las que se intercalan pizarras areniscosas e incluso alguna arenisca.

Estos materiales constituyen el principal estéril en el que se sitúa el carbón, encontrándose a la vez pizarras más o menos carbonosas.

Las series presentan un gran espesor y continuidad. Como materiales menos frecuentes se pueden citar las rocas ígneas (párfidos), conglomerados y calizas, si bien no constituyen más que una parte minoritaria del conjunto del estéril.

Los estudios de lámina delgada han puesto de manifiesto la siguiente composición de las pizarras. Para fracciones mayores de dos micras se observa un predominio del cuarzo con valores comprendidos entre el 30 y 40%. También se observan intercalaciones de carbón en láminas y nódulos, y presencia de micas y feldespato potásico.

La fracción menor de dos micras (arcillas) ha sido estudiada por Rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se aprecia un claro predominio de caolinita e illita y, en menores cantidades, cloritas y feldespatos. La presencia de feldespatos y caolín indica que las pizarras son potencialmente meteorizables, puesto que parte de los feldespatos se habrán ya transformado en caolín.

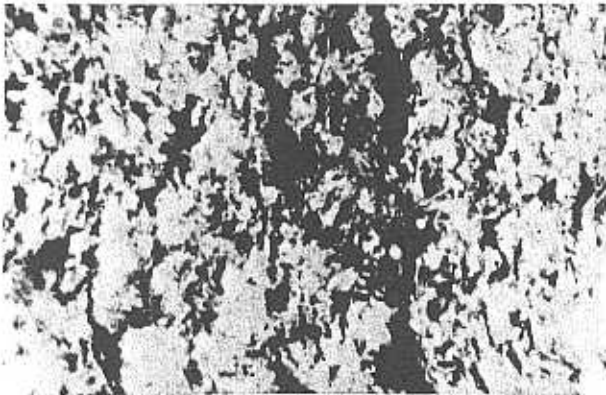


Foto 1.- Alternancia de minerales arcillosos y capas de carbón con la textura inicial y parcialmente deformada por efecto de metamorfismo incipiente (microscopía óptica, luz normal x 100)

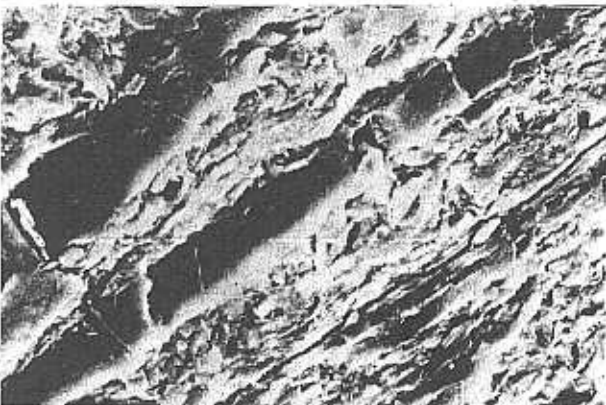


Foto 3.- Superficies de despegue e intercalaciones de carbón (SEM x 640).

Estos componentes, tanto en las fracciones mayores de dos micras como en las menores, varían según

la naturaleza litológica de las muestras. Así, en las pizarras lutíticas el cuarzo representa un 30-40% frente a las arcillas con un 25-35%. Sin embargo, en las pizarras areniscosas el cuarzo alcanza el 40%, y las micas otro 40%, mientras que las arcillas no sobrepasan el 20%.

La fábrica (microfábrica) ha sido estudiada por microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM). Se ha detectado una marcada laminación con granos de cuarzo orientados en el sentido de la misma (foto 1), así como alternancia de minerales arcillosos y capas de carbón, con la textura inicial deformada por efecto del metamorfismo incipiente. Asimismo se han encontrado neoformaciones de minerales de aspecto laminar especialmente en las proximidades de las vetas de carbón.

Estas mismas observaciones se han comprobado al microscopio electrónico (Foto 2), pudiéndose observar en la foto 3 un aspecto de la fábrica en el que se observan superficies de despegue. En las observaciones de detalles se ven igualmente superficies de despegue coincidiendo con las intercalaciones de carbón (Foto 4).

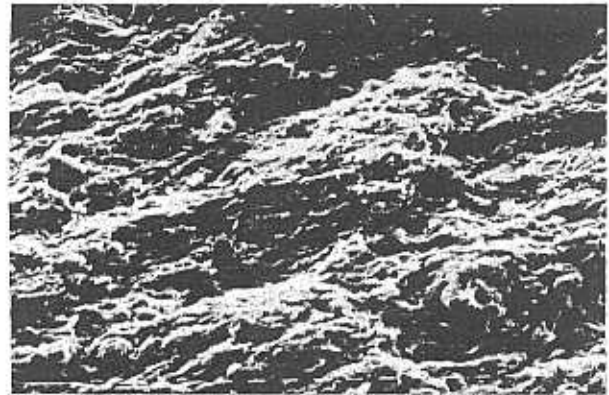


Foto 2.- Aspecto general de la fábrica (SEM x 320)

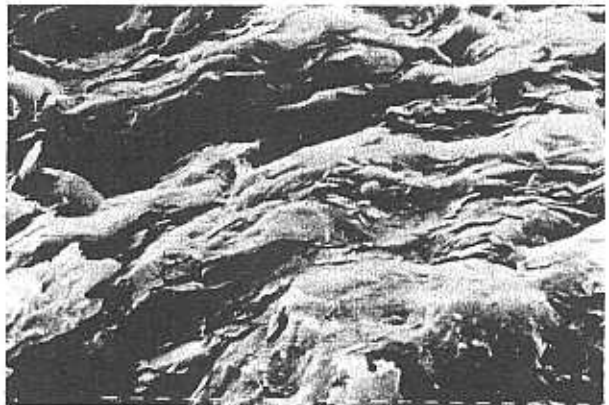


Foto 4.- Detalle de la fábrica representada en la foto 3 con superficies de despegue coincidiendo con intercalaciones de carbón (SEM x 2.500)

La presencia de intercalaciones de carbón origina

una fuerte anisotropía mecánica, que se favorece en el contacto con la neoformación de silicatos laminares, dando superficies fácilmente exfoliables, con un desigual comportamiento frente a la meteorización, así como fenómenos de rápida oxidación de dichos minerales carbonosos, con rápido detrimento de su resistencia.

#### CONDICIONES TECTONICAS

La estructura general de las cuencas estudiadas corresponde a sinclinales fuertemente fallados. En el caso de Peñarroya, además, se reconocen fallas de gran longitud con numerosas fracturas asociadas y cabalgamientos importantes. En ambos casos los materiales están muy tectonizados con mayor intensidad en las zonas limítrofes a las fallas o cabalgamientos. Los buzamientos varían entre 20 y 60 grados en Peñarroya, con valores mucho más suaves e incluso subhorizontales en Puertollano.

La orogenia hercínica ha sido la principal responsable de las deformaciones y roturas existentes en las regiones estudiadas. No se conoce directamente el estado actual de tensiones aunque puede suponerse que existen tensiones de tipo residual, en particular en la zona de Peñarroya, al haber sido sometida esta región a importantes esfuerzos tectónicos.

Por otra parte, las evidencias indirectas de minas subterráneas apoyan esta hipótesis. Recientemente en Peñarroya se han determinado las tensiones absolutas en galerías mineras situadas muy cerca de las cortas estudiadas, y se ha encontrado que las tensiones horizontales son del orden de 2 y 3 veces superiores a las teóricas, en relación con la que deberían tener si solo actuara el efecto de Poisson (Campos de Orellana, 1982).

#### CONDICIONES GEOMECHANICAS

La investigación de propiedades geomecánicas fue precedida de una detallada observación visual de afloramientos, taludes naturales y de explotación, y testigos de sondeos, con el objeto de observar el aspecto de los materiales y sus cambios de comportamiento.

Los datos a continuación presentados, que proceden de varias cortas actualmente en explotación y otras en proyecto, reúnen la causística más significativa y generalizable, dentro de la lógica dispersión de propiedades que toda investigación geotécnica conlleva. No obstante, como elementos comunes están los materiales litológica y mineralógicamente muy semejantes, y de la misma edad geológica.

Por otro lado se ha partido de un número muy alto de ensayos y determinaciones, estadísticamente suficientes para marcar las tendencias más destacadas, dentro de los valores medios más constantes.

En primer lugar se presenta un recubrimiento cuaternario de pocos metros de espesor, y un primer nivel de pizarras muy meteorizadas, prácticamente un suelo con tonalidades pardo amarillentas.

Este primer nivel muy alterado suele tener de 5 a 10 m de potencia y sobre él se desarrollan frecuentes fenómenos de inestabilidad, con típicas roturas circulares, agrietamientos en cabecera y reblandecimientos con el paso de maquinaria.

Debajo de este nivel meteorizado aparecen las pizarras estudiadas. Son ripables, aunque se empleen explosivos como medida complementaria para facilitar y aumentar el ritmo de extracción. En corte fresco son lustrosas y se presentan inalteradas, con tonalidades gris oscuras. Sin embargo, es notorio que al cabo de unos días de su apertura se inicia un rápido y denso cuarteo, con fisuras, que se abren progresivamente, dando lugar a una rápida degradación, y en último lugar a un suelo arcilloso aterronado (Foto 5). Esta rápida meteorización afecta con distinto grado a los diferentes sectores de las cortas y da lugar a los problemas enunciados en el apartado de Introducción.



Foto 5.- Rápida meteorización en las pizarras situadas en los frentes de los taludes.

Para homogeneizar criterios, en este estudio se han elegido los resultados procedentes de pizarras lutíticas en estado fresco, excepto cuando se indique lo contrario. La resistencia media de estas pizarras oscila entre 200 y 300 Kp/cm<sup>2</sup> y su densidad es del orden de 2,5 t/m<sup>3</sup>.

En la Fig. 1 se presenta la variación de distintos índices de fracturación, en función de la profundidad. Estos índices indican el grado de fracturación relativa, siempre referidos a los valores medios más constantes, determinados en sondeos (RQD y velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) medidas con técnicas geofísicas de down hole), así como la relación entre la citada  $V_p$  y la velocidad sónica de ondas p en testigos.

Los resultados encontrados señalan la presencia de una primera capa más alterada, de unos 20 m de profundidad máxima, en donde el RQD es bajo, menor del 25% -generalmente-,  $V_p$  del orden de 1.100 m/seg, y la valoración  $V_p$  campo/ $V_p$  laboratorio de 0,5 correspondiente a un material muy fracturado.

Por otro lado, se observa que el RQD generalmente aumenta con la profundidad, mientras que los índices dinámicos varían en función del estado de fracturación de la masa rocosa, o del estado de tectonización del área investigada.

Dado que las investigaciones se han orientado hacia el cálculo de taludes, la propiedad más importante a determinar ha sido la resistencia de corte a través de los planos de discontinuidad de las pizarras. Para ello se efectuaron numerosos ensayos de rozamiento y corte directo en diaclasas naturales, e inducidas. Las muestras ensayadas han procedido de testigos

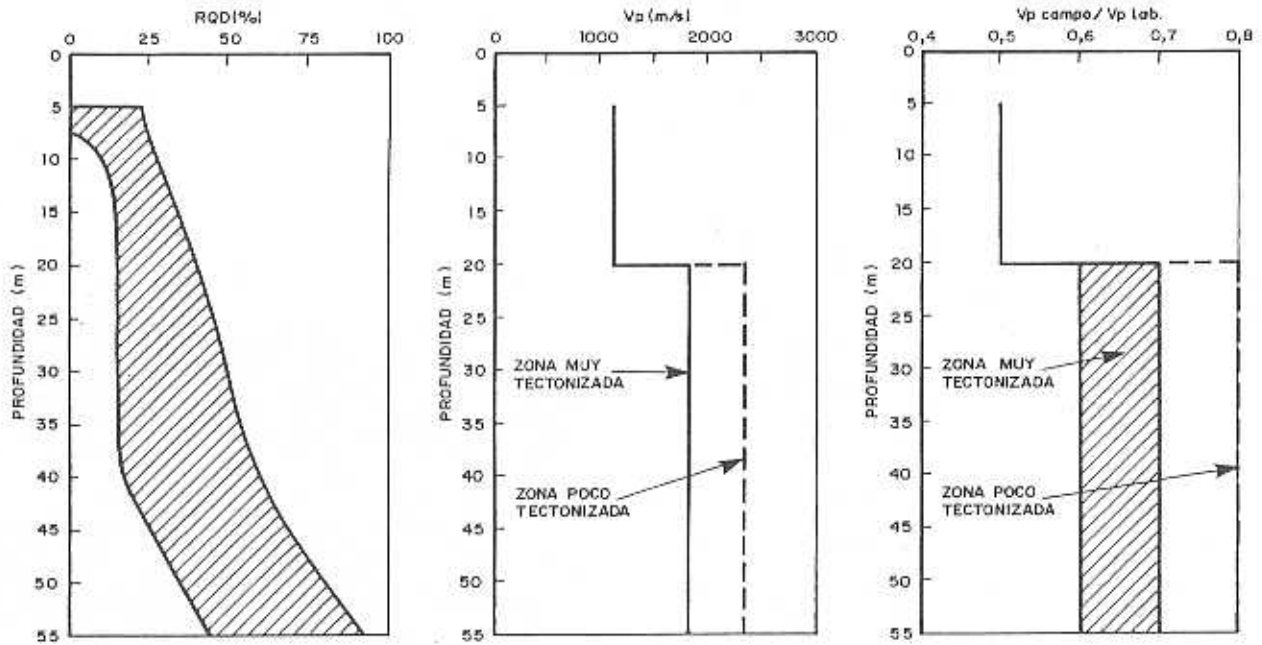


Fig. 1.- Indices de fraturación de pizarras (zona Peñarroya y Puertollano) en función de la profundidad y grado de tectonización.

de sondeos tomados a profundidades de hasta 250 m y muestras en bloque procedentes de los frentes de excavación.

Estas muestras se han extraído preservando al máximo su estado natural. Sin embargo también se tomaron muestras de taludes en estado de degradación y se remoldearon para efectuar sobre ellas ensayos de corte directo, con el fin de simular la resistencia que puedan tener las pizarras en estado alterado.

Los resultados obtenidos se representan en la Fig. 2 y aunque se han eliminado los más dispersos, de todas formas se acusa bastante variación en los mismos. A partir de ellos se han asignado distintos valores de cohesión y rozamiento internos, en función del grado de tectonización, así como del estado de meteorización potencial de las muestras, según se describe a continuación.

Los ensayos de meteorización y durabilidad aplicados a pizarras han sido estudiados y revisados recientemente por Uriel y Capera (1976). De acuerdo con dichos autores se ha evluado la resistencia a la meteorización por medio de ensayos de sequedad-humedad-desmoronamiento, ataque a la acción de los sulfatos y durabilidad (slake durability test SDT). Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto la marcada influencia del grado de tectonización, permitiendo efectuar una clasificación en función de dicho grado.

Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto la marcada influencia del grado de tectonización, permitiendo efectuar una clasificación en función de dicho grado.

Las zonas poco tectonizadas (RQD superior al 60%) han dado una buena respuesta frente a la meteorización, con pérdidas en peso menores del 13%, después de dos

ciclos de humedad-sequedad-desmoronamiento, pudiendo clasificarias como de durabilidad alta a muy alta. Estos resultados han sido muy homogéneos y son aplicables a las pizarras lutíticas con fracciones arcí-

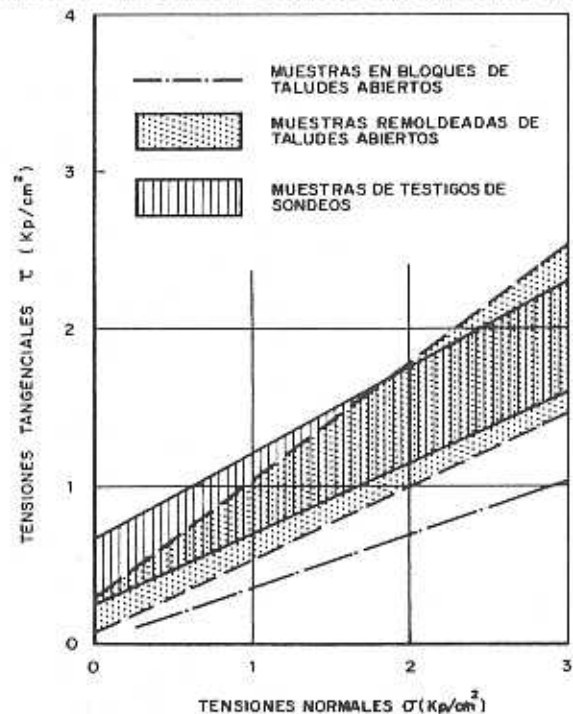


Fig. 2.- Resistencia al corte de pizarras en Peñarroya y Puertollano.

llosas mayores del 25%. Las pizarras areniscosas con contenidos en arcillas menores del 15% no fueron incluidas en estos ensayos.

Sin embargo, los ensayos realizados sobre las muestras procedentes de áreas muy tectonizadas, han dado unos resultados que indican una resistencia baja frente a la meteorización. Las pérdidas en peso por ataque a la acción de los sulfatos fueron igualmente altas (superiores al 70% y hasta el 95%, después de 5 ciclos), desmoronándose al cabo de varios ciclos de humedad-sequedad. La influencia del número de ciclos en el resultado del ensayo SDT es significativo según se puede observar en la Fig. 3, considerándose como más representativo el correspondiente a 5 ciclos.

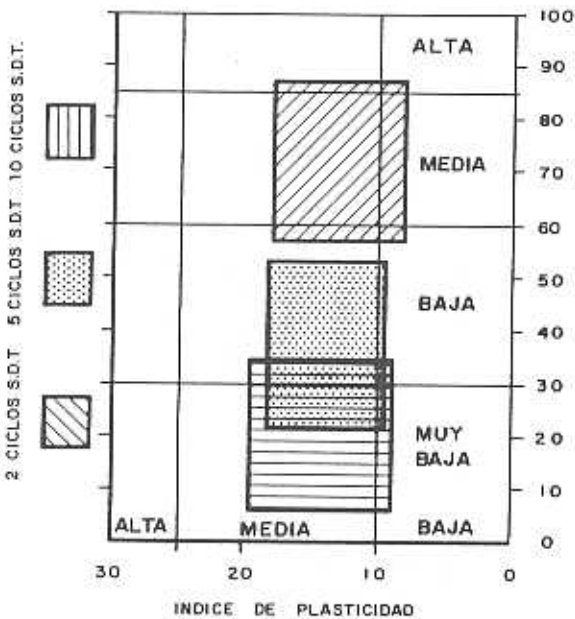


Fig. 3.- Resistencia a la meteorización de pizarras (Peñarroya)

En la fig. 4 se han representado los resultados obtenidos en Puertollano en el ensayo SDT, mostrando la distribución de resistencia a la meteorización después de 2 y 5 ciclos. Después de 2, la distribución es uniforme. Hay materiales de todos los tipos. Sin embargo, los 5 ciclos ponen de manifiesto que la mayoría de las muestras son de resistencia muy baja.

DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados del estudio de propiedades geológicas y geotécnicas previamente considerados, permiten llegar a establecer distintos tipos de criterios para la identificación de zonas o sectores de diferente grado de meteorización potencial, cuestión prioritaria para la evaluación posterior de las propiedades geotécnicas y su comportamiento durante la vida de la explotación.

Los procesos de meteorización, integrados en el contexto minero y su incidencia geotécnica, se muestran en la Fig. 5. Dicha figura presenta un modelo conceptual del citado proceso conducente a una sectorización geomecánica.

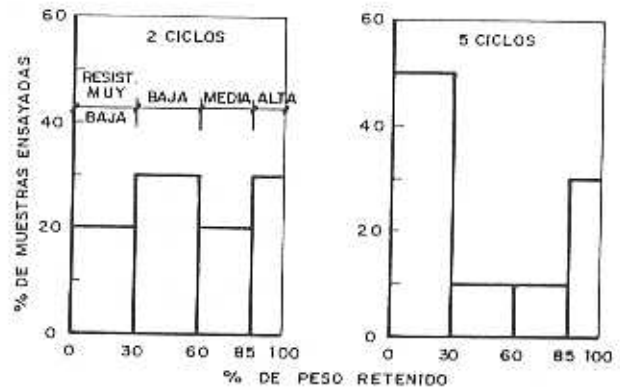


Fig. 4.- Distribución de la resistencia a la alteración, según el S.D.T. (Pizarras y areniscas de Peñarroya).

La identificación de zonas o sectores potencialmente meteorizables puede evaluarse de acuerdo con una serie de criterios de selección, sobre los cuales actúan diversos factores condicionantes. Dichos criterios de selección y sus factores condicionantes son los siguientes:

Criterios de selección

- a) La composición mineralógica y la fábrica ha constituido un criterio básico para determinar el grado de meteorización potencial de las pizarras y en particular los siguientes elementos:
  - La cantidad relativa y tipo de mineral de arcilla, junto con la presencia de otros minerales en coexistencia como feldespatos y caolín.
  - La orientación de minerales y asociaciones de partículas, su grado de exfoliación, presencia de inclusiones y bandas carbonosas, fisuras y despegues, como factores de anisotropía mecánica.
  - La presencia de minerales carbonosos que dan lugar a fenómenos de rápida oxidación, con la consiguiente formación de zonas de debilidad estructural.
- b) La tectonización y sus relaciones estructurales como fallamientos, cabalgamientos, contactos mecánicos, zonas de charnela, etc, ha sido otro factor básico para la selección de áreas o sectores de distinto grado de meteorización potencial. A lo largo de este trabajo se han presentado distintos resultados que demuestran la clara relación existente entre este factor y la meteorización potencial. Los ensayos de durabilidad, resistencia al corte, e índices de fracturación apoyan esta hipótesis.
- c) Las tensiones residuales en relación directa con las condiciones tectónicas, constituyen un factor contribuyente al proceso de rápida degradación y, por consiguiente, a la meteorización potencial. La liberación de tensiones está directamente relacionada con este factor, que, como bien es sabido, contribuye significativamente a la meteorización.

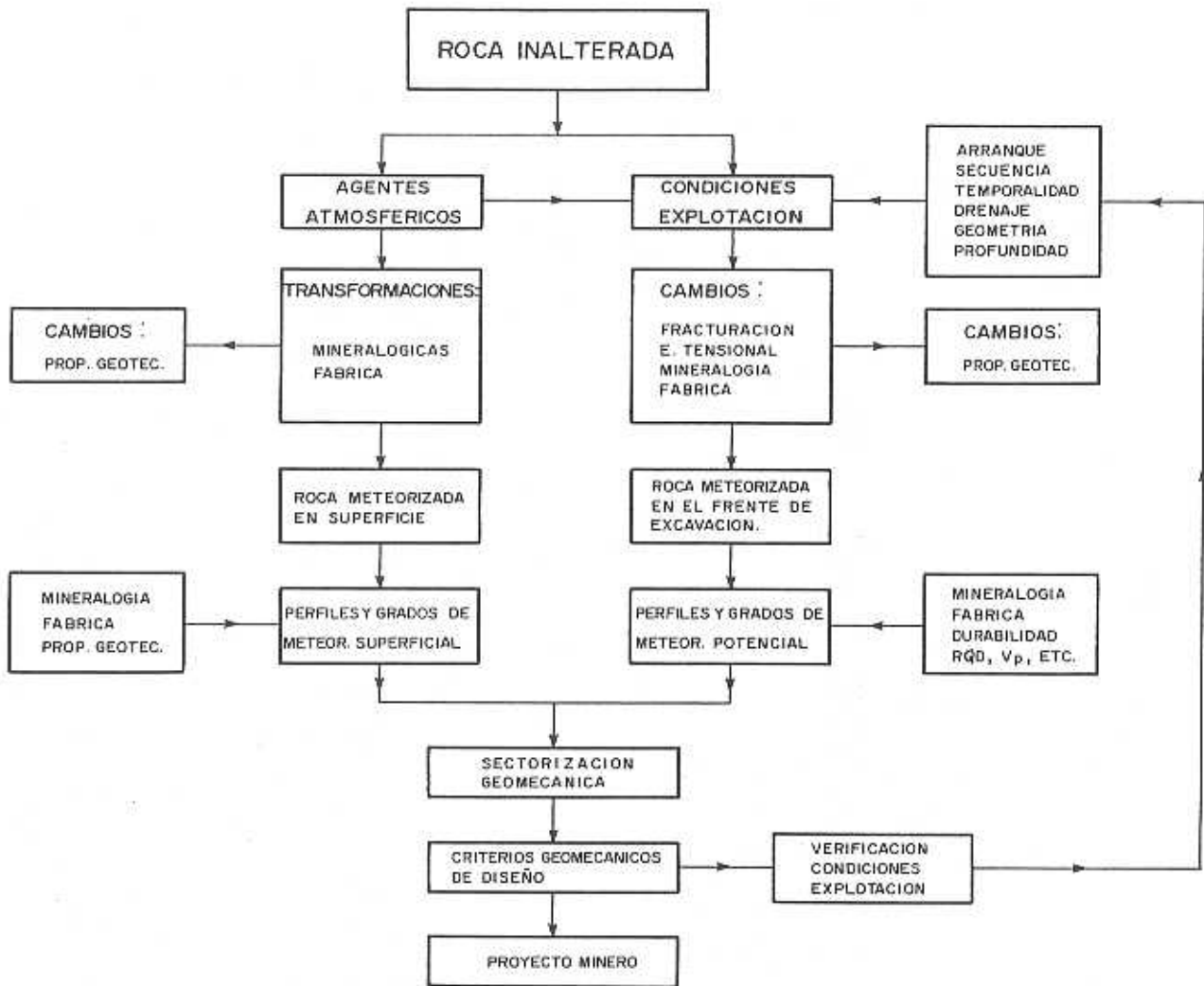


Fig. 5.- Incidencia de los procesos de meteorización, en relación con el diseño de cortas mineras

Factores condicionantes

a) Las condiciones de explotación pueden actuar significativamente sobre el proceso de meteorización, en particular:

- El arranque, en función del tipo de voladura o ripado.
- La decompresión creada por la excavación, su geometría y creación de zonas de tracción, así como la profundidad de la corta.
- La secuencia de la excavación y su temporalidad, en función del tipo de minería. Al ser éste un factor esencialmente temporal su incidencia sobre la meteorización potencial es máxima.
- Los cambios producidos en la red de flujo y las medidas de drenaje.

b) Las condiciones climáticas controlan la acción de los agentes atmosféricos. En particular, la orien-

tación relativa de los taludes dando lugar a frentes con mayores diferencias térmicas y de humedad, por ejemplo los taludes situados al Sur.

De acuerdo con la Fig. 5, y una vez realizada la sectorización geomecánica según los criterios y factores previamente citados, se puede proceder a asignar parámetros geomecánicos a cada uno de los sectores anteriormente establecidos. Con la asignación de tales parámetros se puede adoptar el modelo geotécnico adecuado para los cálculos de estabilidad y la integración en el proyecto minero. Esta es una tarea crucial y que exige no sólo el apoyo de una completa investigación, sino un apreciable grado de subjetividad.

En el cuadro 1 se muestra un ejemplo de caracterización geomecánica aplicado a las pizarras aquí estudiadas. En dicho cuadro puede observarse como a partir del estado de tectonización y fracturación, es posible predecir el comportamiento ante la meteorización potencial y atribuir propiedades geotécnicas. De la misma forma, se aportan criterios en función del grado de alteración presente en la muestra.

CUADRO 1. PROPIEDADES GEOMECAICAS DE PIZARRAS EN FUNCION DEL GRADO DE ALTERACION Y/O TECTONIZACION

Grado de alteración Grado de tectonización	RQD %	$v_p$ m/s	$\frac{v_p \text{ campo}}{v_p \text{ Lab.}}$	$c$ t/m <sup>2</sup>	$\phi$ grados	Durabilidad % Pérdida en peso (b)	Grado Meteorización Potencial
Muy Alteradas (V-VI) (a) Intensamente Tectonizado Zonas de Falla	< 15	600- -1100	< 0,5	0- 2	18-23	> 70	Alto
Semialteradas (III-IV) Muy Tectonizado Muy fracturado	15-30	1100- -1800	0,5 -0,65	2- 5	23-28	40 - 70	Medio
Poco Alteradas (II) Moderada- mente tec- tonizado Mediamente fracturado	15-30	1800- -2300	0,65-0,8	5-10	28-30	15 - 40	Bajo
Inalteradas (I) Poco tec- tonizada Poco frac- turado	> 60	2300	> 0,8	10	30	< 15	Muy bajo

(a) Grados de meteorización según Geol. Soc. London (1970)

(b) Ensayo Slake Durability Test sometido a 5 ciclos

**CONCLUSIONES**

La meteorización en las pizarras es un fenómeno - que no sólo afecta a los niveles más superficiales, sino que en función de las condiciones de explotación y el tipo de minería desarrollado, puede afectar significativamente a los materiales presentes durante la excavación, modificando sus propiedades geotécnicas y dando lugar a problemas de estabilidad y mantenimiento. Si bien no condiciona la estabilidad general de taludes finales, sí puede contribuir al deterioro de la misma. Sin embargo, afecta directamente a la estabilidad de los taludes y bermas de bancos, creando importantes problemas de mantenimiento.

Los resultados obtenidos en la investigación previamente discutida, permiten llegar a predecir el grado de meteorización potencial al que podrían verse sometidos los materiales durante la explotación. Por ello, se han establecido los siguientes criterios:

- Composición mineralógica, especialmente la fracción arcilla y la presencia de minerales índice.
- La naturaleza de la fábrica, su anisotropía, comportamiento mecánico y transformaciones en la misma, en particular los fenómenos de rápida oxidación.
- La tectonización y grado de fracturación asociada.
- Como factor contribuyente se destaca el estado de tensiones residuales en relación con la decompresión creada por la excavación, su forma y profundidad.

Las condiciones de explotación pueden actuar acelerando los procesos de meteorización, en función del tipo de minería, temporalidad de los taludes, sistema de arranque, cambios en la red de flujo y medidas de drenaje y, por consiguiente, es posible que a través del conocimiento geotécnico se pueda actuar sobre dichas condiciones optimizando el diseño minero.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Profesor Dr. S. Leguey Jiménez de la Universidad Autónoma de Madrid, su valiosa colaboración en los estudios mineralógicos y de fábrica. Asimismo agradecen a ENCASUR las facilidades dadas para la publicación de parte de los datos aquí incluidos.

**REFERENCIAS**

- CAMPOS DE ORELLANA, A. (1982). "Investigación Geomecánica en Galerías Mineras de Peñarroya". Trabajo en curso.
- URIEL, S. y DAPENA, J.E. (1976). "Índice para cuantificar la alterabilidad de las rocas". Memorias del Simposio Nacional sobre Rocas Blandas. Madrid.
- DAPENA, J.E.; ESCARIO, V.; URIEL, S. y MARTIN VILLANAS, J. (1978). "The influence of weathering on the characteristics of shales". Proceeds. of III Congress of the I.A.E.G. Tomo 1º. Madrid.