

Relaciones esfuerzo-deformación en el análisis del proceso de rotura de rocas blandas

MERCEDES FERRER GIJON (*)
LUIS I. GONZALEZ DE VALLEJO (**)

RESUMEN. Las especiales características de las rocas blandas hacen necesaria la consideración de sus relaciones esfuerzo-deformación en el estudio de su comportamiento y de sus procesos de deformación. Las leyes de comportamiento para materiales frágiles y los criterios de rotura generalmente usados en el análisis de macizos rocosos competentes, no resultan apropiados ni válidos para la modelización y el análisis de estabilidad de macizos rocosos blandos.

En este trabajo se estudian las relaciones esfuerzo-deformación de las lutitas carboníferas de una explotación minera a cielo abierto. A partir de la realización de ensayos de laboratorio, de la medida de las deformaciones obtenidas en los mismos, y de la interpretación de las curvas esfuerzo-deformación, se deducen los modelos de comportamiento que han permitido establecer el criterio de rotura adecuado para analizar la estabilidad del macizo rocoso investigado.

STRESS-STRAIN RELATIONSHIPS IN THE ANALYSIS OF THE FAILURE PROCESS OF WEAK ROCK MASSES

ABSTRACT. The special characteristics of weak rocks make necessary the consideration of the stress-strain relationship to carry out the study of their behaviour and deformational process, since these relations control the strength and behaviour of this type of materials. The use of failure criteria considering the failure beginning before the peak strength is reached, instead of those for brittle material, has shown appropriate for the correct study and modelling of weak rock masses.

In this paper, the study of the stress-strain relationships of carboniferous shales of an open pit slope is carried out. From the strain values measured in the laboratory and from the shapes of the stress-strain curves, different behaviour patterns can be deduced for the material, which have been used as failure criteria for the stability analysis of the slope.

INTRODUCCION

El estudio del comportamiento de macizos rocosos competentes, en los que las discontinuidades juegan un papel fundamental en los procesos de rotura, se ha basado generalmente en la utilización de criterios de rotura para materiales frágiles, asumiéndose un comportamiento elástico.

El uso de este tipo de consideraciones no es apropiado para la investigación de rocas blandas, en cuanto que éstas no presentan comportamientos frágiles y el inicio de la rotura no tiene lugar al alcanzarse la máxima resistencia del material. Además, sus mecanismos de rotura no están básicamente controlados por las discontinuidades del macizo rocoso.

La investigación aquí presentada parte de la observación de todo el proceso de deformación y rotura de un talud minero lutítico a lo largo de varios meses, el cual, al alcanzar una determinada profundidad, sufrió una serie de procesos de plastificación y rotura que dieron lugar a su destrucción total.

Al analizar el proceso de rotura con métodos convencionales de equilibrio límite y caracterizar a los materiales con ensayos de laboratorio asumiendo mecanismos de rotura de macizos rocosos fracturados, se obtuvieron resultados que indicaron una condición estable para el talud, con factores de seguridad siempre superiores a 2.0. Los análisis no pudieron modelizar el comportamiento real observado y no permitieron reproducir los mecanismos y modelos de rotura.

Estos resultados dieron lugar a un estudio detallado del comportamiento del macizo rocoso blando, basado esencialmente en las relaciones esfuerzo-deformación de las lutitas. La investigación fue enfocada principal-

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

(**) Facultad de CC. Geológicas U.C.M.

mente hacia el análisis de las deformaciones en el comportamiento de las rocas blandas y su influencia en la resistencia, así como el papel de la matriz rocosa y la validez de los criterios de rotura convencionales para rocas blandas.

CASO ESTUDIADO

Se estudiaron los taludes de una corta minera carbonífera, situada en Peñarroya (Córdoba), que sufrieron un proceso de deformación lenta y progresiva a lo largo de más de un año.

El proceso observado de deformación y rotura del macizo rocoso mostró un comportamiento dúctil, princi-

palmente caracterizado por la lenta deformación del pie del talud (con flexión y pandeo de los estratos) hasta que el material quedó totalmente destruido (figura 1).

Los materiales que constituían el macizo rocoso excavado eran lutitas carboníferas, formando el flanco invertido de un sinclinal fracturado y fallado, con dirección y buzamiento de los estratos (45°) paralelos al talud. La caracterización y clasificación de los materiales lutíticos, a partir de ensayos de laboratorio y de medidas efectuadas in situ y en sondeos, dio como resultado que se trataba de un macizo rocoso de baja resistencia y calidad, influyendo los bajos valores resistentes del material y la estructura y condiciones geológicas

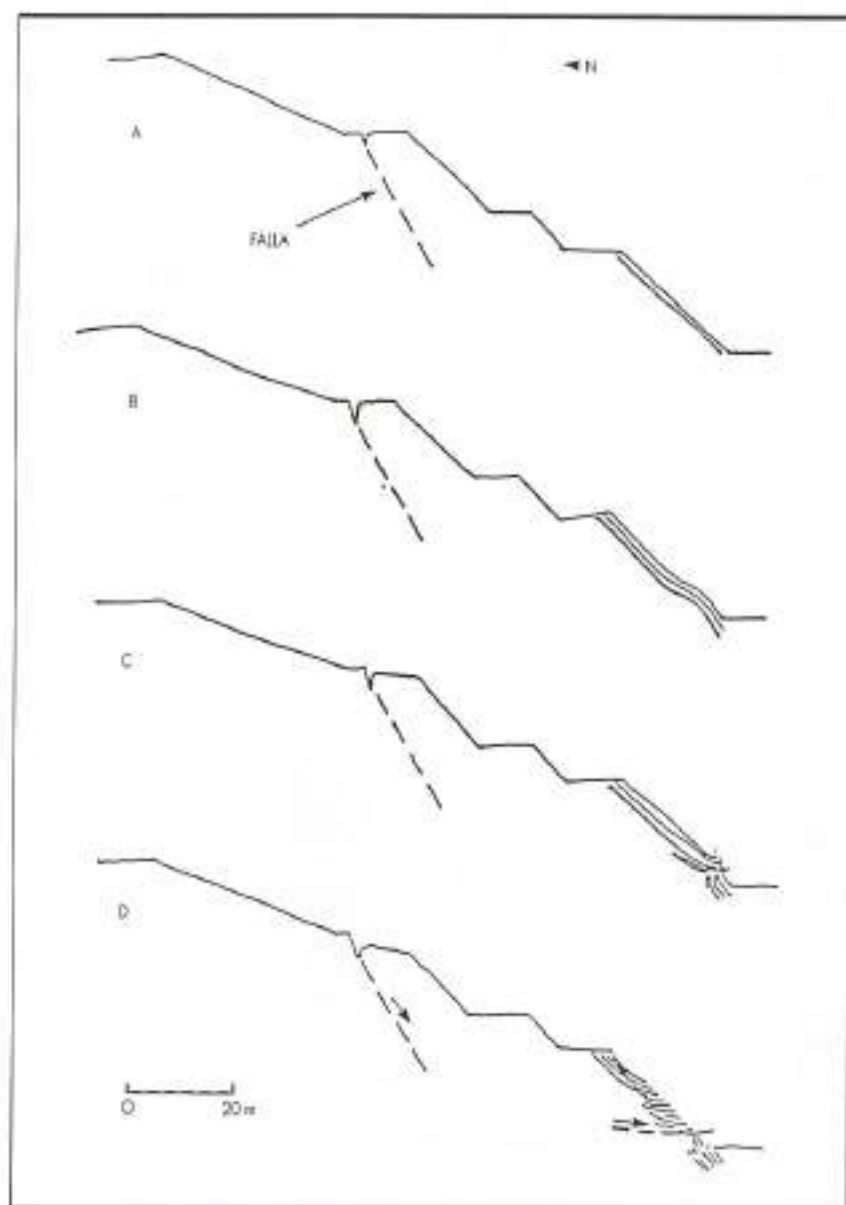


FIGURA 1. Esquema representativo de las diferentes fases de la evolución del proceso de deformación del talud, mostrando la deformación dúctil en la zona de pre.

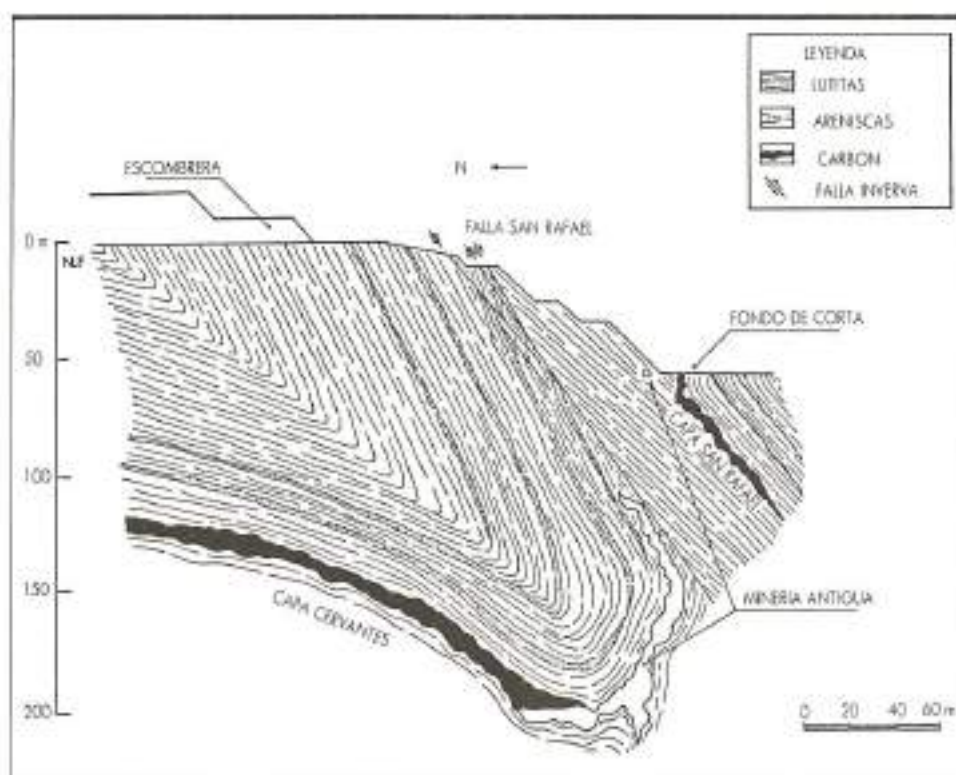


FIGURA 2. Modelo geológico del macizo rocoso analizado.

que afectaban al macizo. Los valores resistentes obtenidos para las lutitas fueron comparados con datos bibliográficos para materiales similares, deduciéndose que estaban en el mismo rango de magnitudes, sin encontrar variaciones importantes en los valores característicos.

Después de la toma de datos y medidas de campo, la realización de sondeos y la caracterización de los materiales en el laboratorio, fueron establecidos los modelos geológico, hidrogeológico y geomecánico para llevar a cabo el análisis del comportamiento del macizo rocoso (figura 2).

Los datos obtenidos de los sondeos, junto con las medidas y observaciones de campo, permitieron deducir el modelo de rotura; se trataba de una rotura curva con una gran grieta de tracción (coincidiendo ésta con una importante falla detectada en la parte superior del talud), y con salida de la superficie de rotura al pie del talud.

Aunque en la parte superior del talud la superficie de rotura coincidía con la falla, a partir de un punto esta superficie se separaba de la falla y salía hacia el exterior (hacia el pie del talud), no estando condicionada por ninguna familia de discontinuidades ni zonas de debilidad, sino atravesando la matriz rocosa con dirección casi perpendicular a los planos de estratificación.

Los análisis de equilibrio límite (realizados con los métodos de Janbu, Bishop y Spencer mediante la utilización del programa STABL) indicaron como más ines-

table la rotura circular; sin embargo, los análisis a posteriori dieron valores para la cohesión y la fricción de la matriz rocosa muy por debajo de los proporcionados por los ensayos de laboratorio (Ferrer, 1990), y anormalmente bajos para corresponder a roca intacta. En los análisis realizados introduciendo los datos obtenidos de laboratorio, los resultados siempre mostraban factores de seguridad superiores o iguales a 2.0.

A partir de estos resultados, y puesto que el problema no pudo ser resuelto, se llevó a cabo el estudio detallado de la deformación y del comportamiento del material, con la finalidad de modelizar el proceso observado.

El principal problema a resolver lo planteaba la ley de comportamiento del material y el criterio de rotura a utilizar. Mientras que el estudio de macizos rocosos competentes se aborda trabajando con la resistencia de pico de las discontinuidades, para las rocas débiles la rotura puede ser generada a través de la matriz rocosa o roca intacta, cuyo proceso deformacional responde a comportamientos dúctiles o plásticos, que no son considerados por los métodos convencionales de análisis de la estabilidad (Elliot y Brown, 1985).

ESTUDIO DE LAS RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACION EN ENSAYOS DE LABORATORIO

Con la finalidad de estudiar las relaciones esfuerzo-deformación de la roca intacta (o matriz rocosa) y sus

parámetros de deformacionales, fueron llevados a cabo una serie de ensayos de compresión uniaxial con una prensa rígida servo-controlada; este tipo de máquina permitió el registro completo de las curvas σ - ϵ , incluyendo la región post-pico, debido a la relación rigidez probeta/rigidez máquina (Wawersick y Fairhurst, 1970; Brady y Brown, 1985).

A partir de la forma de las curvas obtenidas, éstas fueron clasificadas en tres grupos:

- Curvas que denotan un comportamiento frágil, con una rotura de pico marcada.
- Curvas con pico marcado, sin rotura pre-pico, y con una región post-pico desarrollada (comportamiento frágil-dúctil).
- Curvas que muestran una rotura pre-pico y un importante desarrollo de la región post-pico (comportamiento dúctil).

En la figura 3 se han representado estos tres tipos de curvas, con los valores medios de tensiones y deformaciones de cada grupo. En las figuras 4 y 5 se han recogido los valores de las tensiones y de las deformaciones, incluyendo los valores correspondientes al pico, al límite de elasticidad y los residuales; los valores del ángulo entre la dirección de aplicación de la carga y los planos de estratificación o pizarrosidad de las probetas se representan también en la figura 5.

Con respecto a los valores de la resistencia de pico (tabla 1), éstos no acusan ninguna diferencia notable entre los tres diferentes modelos de comportamiento obtenidos, siendo todos ellos del mismo orden, entre 2 y 5 MPa (los ensayos uniaxiales con prensa convencional aportan valores para σ_c entre 25 y 50 MPa para la roca intacta; Ferrer, 1990); los valores correspondientes al

(MPa)	σ_c	σ_y	σ_r
1.º Grupo	4,35	3,82	2,10
2.º Grupo	3,10	2,78	0,83
3.º Grupo	3,00	2,51	1,04

TABLA 1. Valores medios de la resistencia obtenidos en los ensayos con prensa rígida servo-controlada.

σ_c = Resistencia de pico.
 σ_y = Resistencia al límite de elasticidad.
 σ_r = Resistencia residual.

límite de elasticidad varían entre 1,8 y 4 MPa, estando el valor medio 0,42 MPa por debajo de la resistencia de pico media.

Sin embargo, a partir de la representación de los valores de las deformaciones axiales (figura 5), puede observarse una clara diferenciación en los tres grupos, correspondientes a las probetas numeradas 1 a 4, 5 a 11 y 12 a 19. Los valores de las deformaciones (tabla 2) indican el diferente comportamiento de las probetas que mostraban los distintos modelos de curvas obtenidos.

Con respecto a la relación dirección de aplicación de la carga-planos de estratificación de las probetas, para el 1.º grupo, con comportamientos «frágiles», éstos varían entre 38° y 45° (excepto para una probeta con 65°); para el 2.º grupo, con comportamiento «frágil-dúctil», la mayoría de los valores varía entre 60° y 70°, y para el 3.º grupo, con comportamientos «dúctiles», los valores se encuentran entre 76° y 90°.

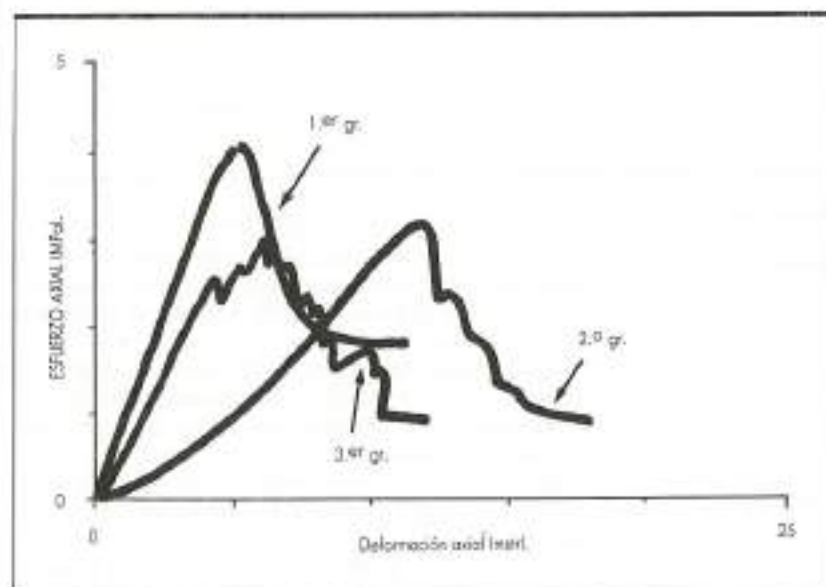


FIGURA 3. Modelos representativos de las curvas obtenidas en los ensayos y correspondientes a comportamiento frágil (1.º grupo), frágil-dúctil (2.º grupo) y dúctil (3.º grupo).

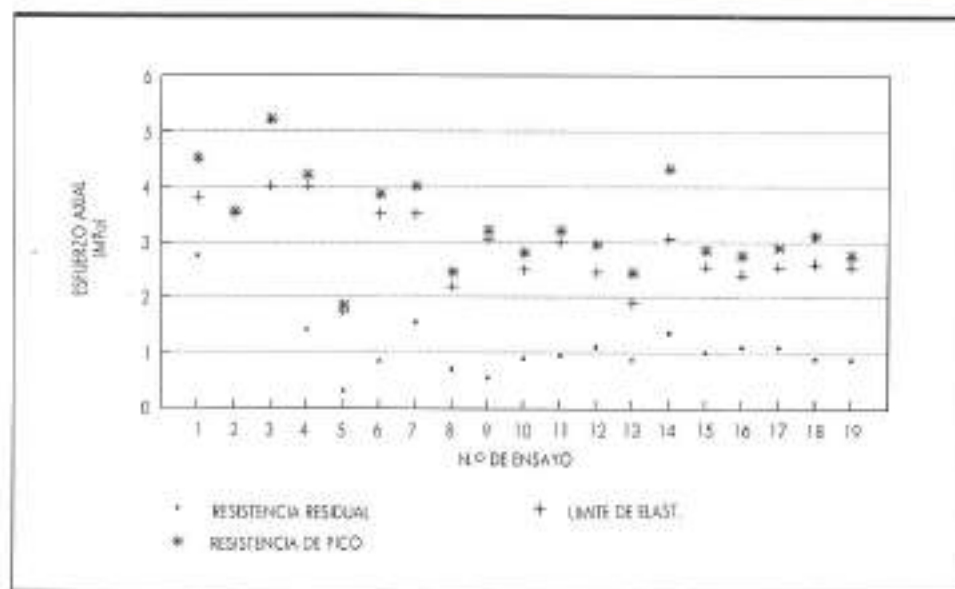


FIGURA 4. Esfuerzos axiales medidos en las probetas ensayadas.

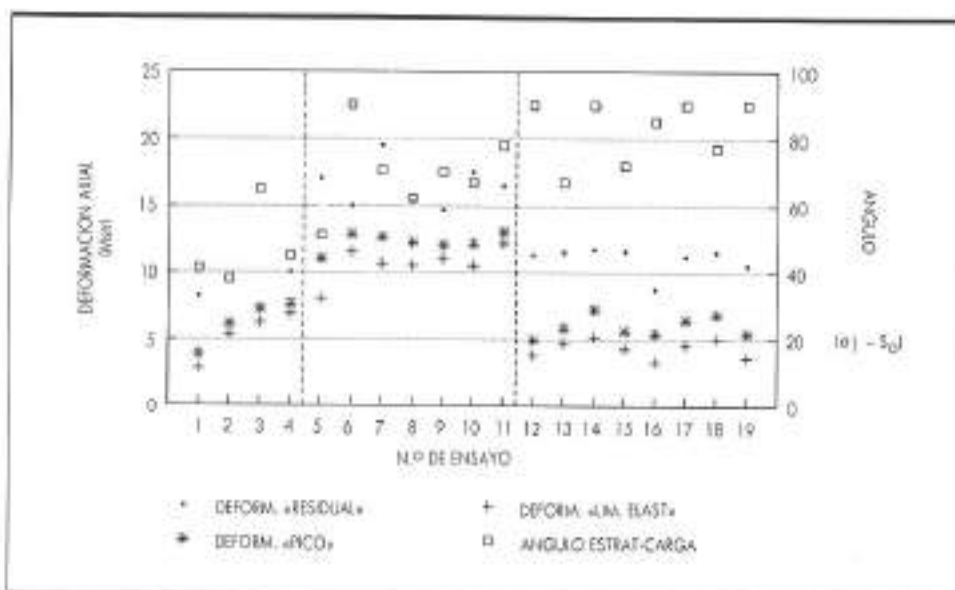


FIGURA 5. Deformaciones axiales medidas en las probetas ensayadas.

(mm)	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
1.º Grupo	6,20	5,29	9,11
2.º Grupo	12,24	10,61	16,8
2.º Grupo	5,93	4,31	11,0

TABLA 2. Valores medios de las deformaciones obtenidos en los ensayos con prensa rígida servo-controlada.

(mm) = milímetros.

ϵ_x = Deformación correspondiente a la resistencia de pico.

ϵ_y = Deformación correspondiente al límite elástico.

ϵ_z = Deformación correspondiente a la resistencia residual.

Estos resultados muestran la incidencia de las deformaciones en los diferentes comportamientos de las probetas ensayadas, no acusando los valores de resistencia ningún criterio diferenciador con respecto al comportamiento del material.

Los modelos de rotura de las probetas (figura 6) también muestran los diferentes comportamientos de deformacionales; las probetas con planos de estratificación perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga presentan los comportamientos más plásticos, quedando el material totalmente disgregado tras los ensayos.

Dado que los resultados obtenidos en los ensayos mostraban deformaciones plásticas para las probetas

ensayadas con ángulos carga-estratificación cercanos a 90° , y puesto que en campo se observó este mismo comportamiento con respecto a la superficie de rotura generada a través de la matriz rocosa, el criterio de rotura adoptado fue considerar que la rotura se alcanza cuando el material no puede soportar las cargas aplicadas sin sufrir deformación permanente, es decir, la rotura comienza al alcanzarse el límite de elasticidad.

Con respecto a los módulos de deformación obtenidos en los ensayos (tabla 3), éstos no indican diferencias importantes entre los grupos que rompieron a favor de planos de estratificación o a través de la matriz rocosa; los valores son considerablemente menores que los obtenidos a partir de ensayos con máquinas convencionales (blandas).

Sin embargo, al relacionar los valores del módulo de Young, E , con la resistencia de pico, σ_c (figura 7), se

obtienen de nuevo las mismas agrupaciones, correspondientes a los grupos definidos a partir de la forma de las curvas tensión-deformación axial de las probetas.

	E (MPa)	ν
1.º Grupo	840	0,24
2.º Grupo	320	0,31
3.º Grupo	711	0,20

TABLA 3. Valores medios de los parámetros deformacionales obtenidos en los ensayos de laboratorio.

E = Módulo de Young.
 ν = Relación de Poisson.

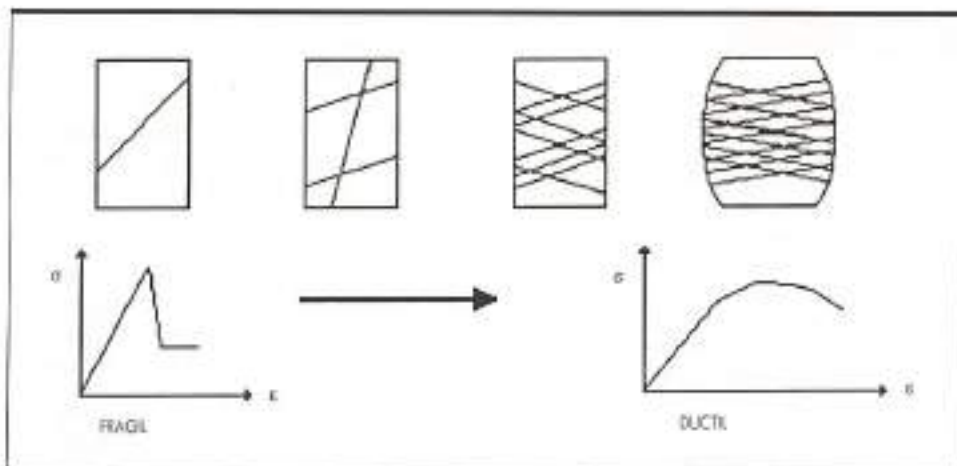


FIGURA 6. Diferentes modelos de rotura obtenidos para las probetas ensayadas.

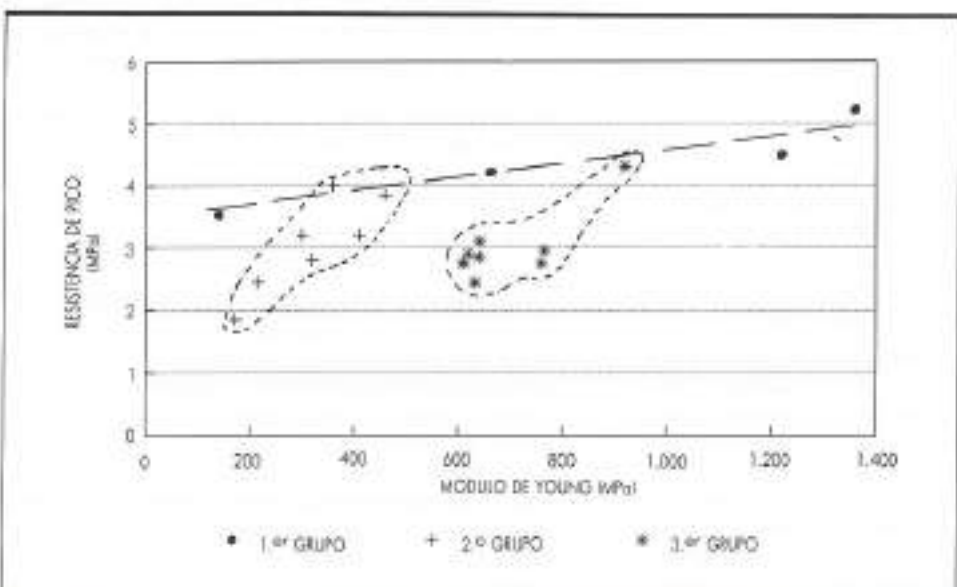


FIGURA 7. Relaciones entre los módulos de deformación y las resistencias de pico de las probetas.

Como resumen de los ensayos realizados, pueden destacarse los siguientes aspectos:

- El criterio más representativo para interpretar los resultados de los ensayos ha sido el análisis de la forma de las curvas tensión-deformación y los valores de las deformaciones axiales.
- Los valores de resistencia de la roca intacta han sido anormalmente bajos con respecto a los obtenidos en ensayos realizados con prensas convencionales.
- Se ha podido observar una transición entre comportamiento frágil y dúctil, que queda también reflejado en los modelos de rotura de las probetas.
- Las probetas que rompen a través de roca intacta (sin quedar condicionado su comportamiento por los planos de estratificación) sufren comportamientos más plásticos.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CONSIDERANDO LAS RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACION DEL MATERIAL

Una vez investigadas las relaciones esfuerzo-deformación de las lutitas, y a partir de las observaciones y medidas de campo realizadas, se llevó a cabo la modelización del macizo rocoso mediante el método de los elementos finitos y la utilización del programa ZSOIL (Zacc Services, Ltd., 1989). Este método permite la consideración de una ley de comportamiento elasto-plástica y de criterios de rotura plásticos, aspectos que, a su vez, permiten modelizar las relaciones esfuerzo-deformación del material, y que no son considerados por los métodos de análisis convencionales de equilibrio límite.

El criterio de rotura utilizado fue el de Drucker-Prager (1952), uno de los criterios de uso más extendido y adecuado en modelización de materiales rocosos.

Las modelizaciones y análisis de estabilidad fueron realizados, en un principio, considerando:

- Los parámetros obtenidos a partir de ensayos con prensas convencionales;
- Los parámetros deducidos de los análisis a posteriori por equilibrio límite, intentando reproducir en todos los pasos del análisis el proceso observado en el campo. En ambos casos no se obtuvieron modelos representativos, no siendo posible reproducir los mecanismos de deformación observados ni la superficie de rotura detectada.

Para conseguir la modelización del comportamiento del macizo rocoso, se llevaron a cabo los análisis a posteriori, introduciendo los valores de los módulos de deformación, E y ν , obtenidos en los ensayos realizados con prensa rígida. Después de ajustar los parámetros resistentes c y ϕ de las lutitas para todo el ámbito del macizo rocoso, se obtuvo el modelo representativo del proceso real observado, reproduciendo las diferentes fases o etapas de deformación desde el inicio de la inestabilidad,

especialmente aquellas que afectaban a las zonas de pie y cabecera del talud.

Los resultados obtenidos para el análisis a posteriori se indican en la tabla 4 (señalando la no convergencia de los cálculos efectuados, alcanzándose deformaciones plásticas generalizadas en el macizo rocoso) y, por tanto, según el criterio establecido, alcanzándose la rotura del material. En la tabla 4 se han representado los desplazamientos máximos obtenidos para cada escalón del análisis realizado.

Escalón (F.S.)	0,94 c	0,96 c	0,98 c	1,00 c	1,02 nc	1,04 n
Máx. Desplaz. (en $\times 10^{-2}$)	9,30	9,70	10,3	11,4	15,2	150

TABLA 4. Resultados obtenidos en el análisis a posteriori del macizo rocoso.

c = El límite de elasticidad no ha sido alcanzado.

nc = El límite de elasticidad ha sido alcanzado.

En la figura 8 se representan las mallas deformadas obtenidas del análisis, que reproducen el estado deformacional del macizo rocoso, correspondientes a los escalones en que se inicia la rotura (F.S. = 1,02) y posterior, con la aparición generalizada de desplazamientos plásticos. Las deformaciones modelizadas son representativas de las observaciones y medidas realizadas en campo. En las primeras fases de la inestabilidad, las deformaciones elásticas tienen lugar en la zona de cabecera, al tiempo que se incrementan los esfuerzos comprensivos en el interior del talud y en la zona de pie. Cuando se alcanzan las deformaciones plásticas generalizadas, los máximos desplazamientos afectan al pie del talud, implicando la plastificación del mismo; es en este escalón cuando comienza la inestabilidad generalizada.

La figura 9 representa los vectores de desplazamiento obtenidos para estos dos mismos escalones del análisis, mostrando la zona del macizo rocoso por la inestabilidad, el modelo y mecanismo de rotura y la localización de la superficie de rotura.

CONCLUSIONES

Con carácter general para los materiales estudiados, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las deformaciones juegan un papel fundamental en los procesos de deformación y rotura de macizos rocosos blandos.
- En macizos rocosos blandos, pueden tener lugar roturas a través de la roca intacta, sin control aparente de las discontinuidades.
- Las roturas a través de matriz rocosa blanda presentan comportamientos plásticos y resistencias de pico bajas (para los casos estudiados éstas resultan más bajas que las obtenidas para planos de estratificación).

- Los ensayos de resistencia uniaxial realizados con máquina rígida servocontrolada, han resultado adecuados para caracterizar y modelizar el comportamiento del macizo rocoso, mientras que los realizados con máquinas convencionales no han resultado representativos, obteniéndose resultados considerablemente más bajos para las ensayos realizados con prensa rígida.

Con respecto a la casuística estudiada, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

- El proceso de deformación plástica y rotura no ha podido ser modelizado mediante métodos de equilibrio límite.
- El criterio de rotura sugerido a partir de los ensayos

realizados, implica que la rotura del material comienza al alcanzarse las deformaciones plásticas, es decir, en el límite de elasticidad.

- Al aplicar este tipo de criterio de rotura y una ley de comportamiento plástico mediante el método de los elementos finitos, se han obtenido modelos representativos del comportamiento del macizo rocoso.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BRADY, B. H. G. y BROWN, E. T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Allen and Unwin, London. Cap. 4.
 DRUCKER, D. C. y PRAGER, W. (1952). *Soil Mechanics and Plastic Analysis of Limit Design*. *Q. J. of Applied Math.*, n.º 10: 157-165.

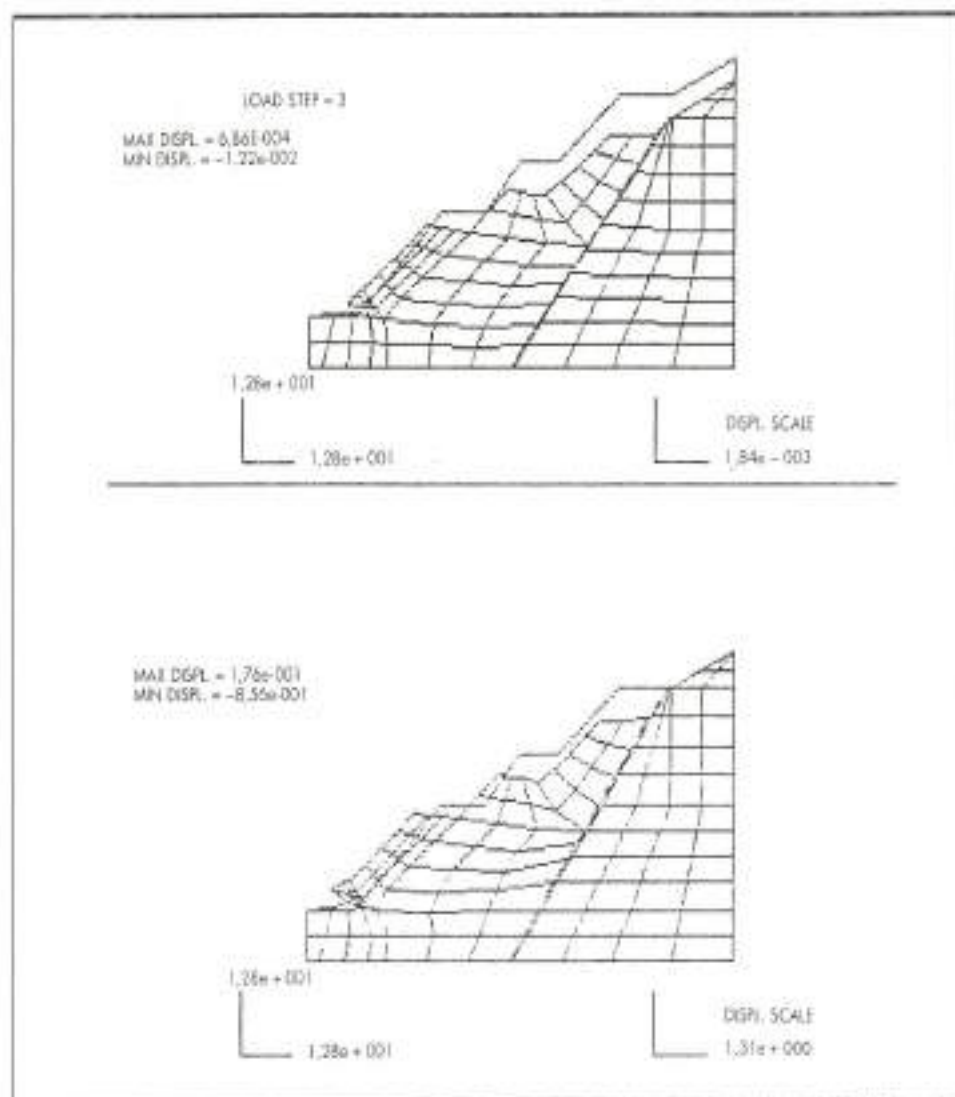


FIGURA 8. Mallas deformadas correspondientes a los escalones del análisis en que se inicia la rotura (F.S. = 1.021) y posterior, cuando las deformaciones plásticas se han generalizado en el macizo.

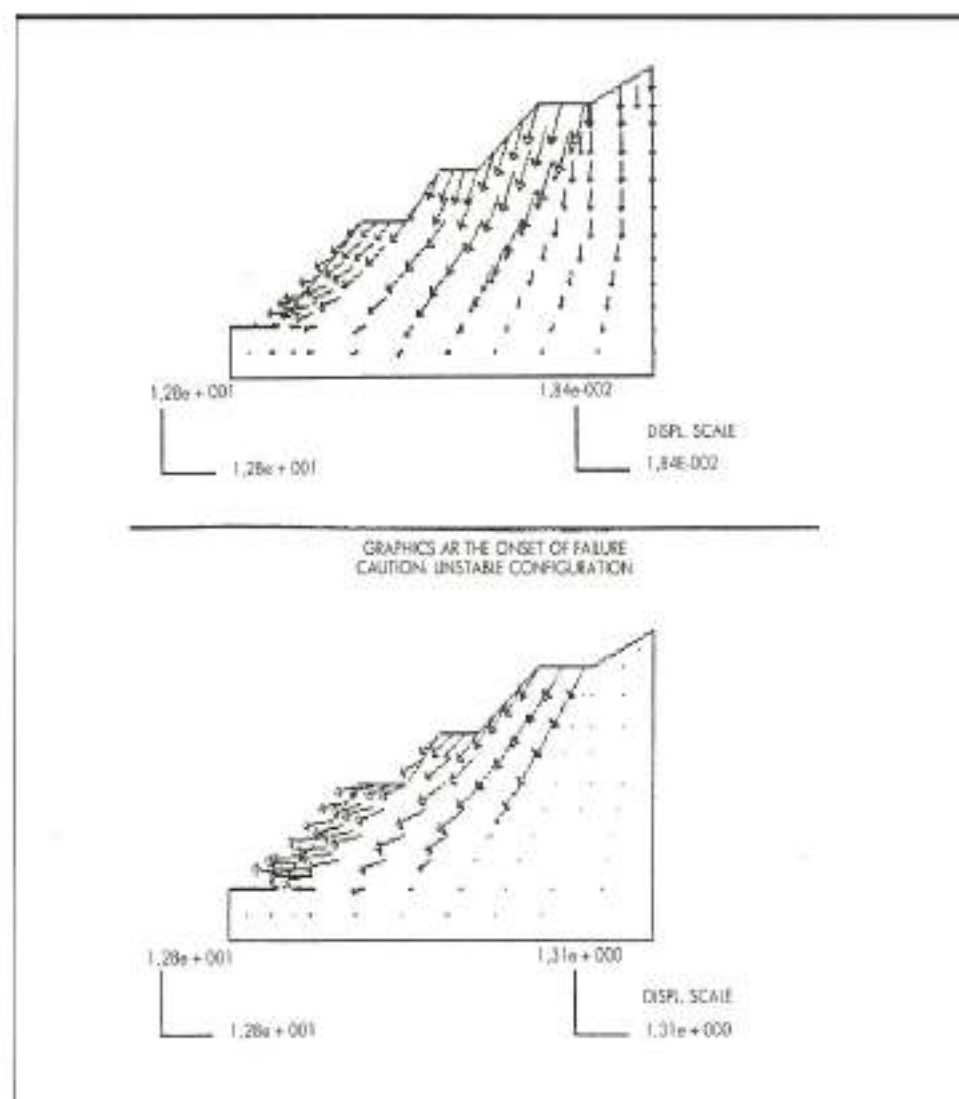


FIGURA 9. Vectores de los desplazamientos correspondientes a los escalares del análisis en que se inicia la rotura (F.S. = 1,02) y posterior.

ELLIOT, G. M. y BROWN, E. T. (1985). Further Developments of a Plasticity Approach to Yield in Porous Rock. *Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci.*, n.º 23: 535-546.

FERRER, M. (1990). Análisis del Proceso de Deformación y del Mecanismo de Rotura de Rocas Blandas en Taludes Mineros. Tesis Doctoral, UCM, Madrid. Inédita.

WAWERSICK, W. R. y FAIRHURST, C. (1970). A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments. *Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci.*, n.º 7: 561-575.

Zacc Services, Ltd. and Zei Engineering, Inc. (1989). *Z-Soil Pc, Soil Mechanics on Microcomputer Using Plasticity Theory*. Lausanne.



Pico GORKYO (Himalaya) 5.400 m.



Barcelona '92

Las cotas más altas

han sido cubiertas



CUBIERTAS
Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES

GEOTEXTILES

PEVSA



La tecnología,
la calidad, el servicio y
la asistencia técnica de
COMPOSAN
y **EXXON CHEMICAL**
respaldan una línea
de geotextiles que, con amplia
gama de soluciones, cubren
cualquier necesidad en el campo
de la obra civil.



COMPOSAN, S.A.

Carrera de San Jerónimo, 17 - 28014 MADRID
Telf. 429 51 59 - Télex 27 606 PEVSA - E
Fax: 429 34 30