

PROCEDIMIENTO GRÁFICO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORRECCIÓN DEL *SMR* A TRAVÉS DE LA PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA

R. Tomás (1), J. Delgado (2), A. Cuenca (3)

(1) Universidad de Alicante, España
Escuela Politécnica Superior de Alicante, Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía
roberto.tomas@ua.es

(2) Universidad de Alicante, España
Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias de la Tierra y Medioambiente
Jose.delgado@ua.es

(2) Generalitat Valenciana, España
Laboratorio de Carreteras, Alicante
cuenca_art@gva.es

RESUMEN

El *Slope Mass Rating* (*SMR*, Romana, 1985) constituye una clasificación geomecánica de uso muy extendido para la caracterización de taludes en roca. Se obtiene por adición al índice *RMR básico*, calculado a partir de valores característicos del macizo rocoso, de una serie de factores de corrección dependientes del paralelismo discontinuidad-talud, del buzamiento de las discontinuidades, del buzamiento relativo entre las discontinuidades y el talud, así como del método de excavación empleado. En este trabajo se propone un método gráfico que permite obtener los parámetros de corrección del *SMR* (F_1 , F_2 y F_3) representando en proyección estereográfica los planos de discontinuidad y del talud a estudiar.

Palabras clave: Clasificación geomecánica, *SMR*, *RMR básico*, proyección estereográfica

ABSTRACT

Slope Mass Rating (*SMR*, Romana, 1985) is a very used geomechanic classification for the characterization of rock slopes. It is obtained adding to basic *RMR* index, calculated by characteristic values of the rock mass, several correction factors depending of the discontinuity-slope parallelism, discontinuity dip, relative dip between discontinuity and slope and the employed excavation method. In this work it is presented a graphical method that allow us to obtain correction parameters of the *SMR* (F_1 , F_2 y F_3) representing in stereographic projection the discontinuity and slope surfaces to study.

Keywords: Geomechanic classification, *SMR*, basic *RMR*, stereographic projection

1. Introducción

Las clasificaciones geomecánicas constituyen una herramienta fundamental en la descripción y caracterización de macizos rocosos. Estas clasificaciones proporcionan una valoración cuantitativa del macizo rocoso o de los taludes rocosos por medio de un algoritmo aritmético simple (Romana, 1997). Algunos de los índices geomecánicos empleados en la caracterización geomecánica de taludes en roca son el *RMS* (Selby, 1980), el *RMR* (Bieniawski, 1989), el *SPSC* (Hack, 1998), el *MRMR* modificado (Haines y Terbrugge, 1991), el *NSM* (Shuk, 1994), el *SPSC* modificado (Lindsay et al., 2001) y el *SMR* (Romana, 1985). Esta última goza de una gran aceptación a nivel mundial (Romana et al., 2001) desde su aparición en el año 1985, resultando muy útil en cuestiones de ingeniería civil y de minas.

2. La clasificación geomecánica *SMR*

Romana (1985) propuso un sistema de clasificación geomecánica de taludes rocosos denominado *Slope Mass Rating (SMR)*. Éste se obtiene por la adición de una serie de factores de ajuste dependientes de la relación geométrica existente entre la discontinuidad y el talud, del tipo de rotura cinemáticamente compatible con el sistema discontinuidad-talud, así como de la suma de un factor dado por el método de excavación, atendiendo a la expresión siguiente:

$$SMR = RMR_{\text{básico}} + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad (1)$$

donde: el *RMR* básico se obtiene de acuerdo con la clasificación de Bieniawski (1989), F_1 depende del paralelismo entre las direcciones de las discontinuidades (α_j o α_i) y del talud (α_s) (Tabla 1), F_2 se refiere al buzamiento de la discontinuidad (β_j) (Tabla 1), F_3 depende de la relación entre los buzamientos del talud (β_s) y las discontinuidades (β_j o β_i) (Tabla 1) y F_4 es un factor de ajuste por el método de excavación empleado (Tabla 1).

Tabla 1.- Parámetros de corrección F_1 , F_2 , F_3 y F_4 de la clasificación *SMR* (modificado de Romana, 1985)

TIPO DE ROTURA		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE	
Plana	A	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°	
Vuelco							$ \alpha_i - \alpha_s $
Cuña							$ \alpha_i - \alpha_s - 180 $
F₁		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
	B	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°	
Plana/Cuña	F₂	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
Vuelco							$ \beta_j $ ó $ \beta_i $
Plana	C	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)	
Cuña							$\beta_j - \beta_s$
Vuelco							$\beta_i - \beta_s$
F₃		0	-6	-25	-50	-60	
MÉTODO DE EXCAVACIÓN			F₄	MÉTODO DE EXCAVACIÓN		F₄	
Talud natural			+15	Voladura normal o excavación mecánica		0	
Precorte			+10	Voladura deficiente		-8	
Voladura suave			+8				

La expresión (1) puede expresarse de forma que el producto de F_1 y F_2 quede agrupado en un sólo término denominado ψ , cuyo valor está comprendido entre 0 y 1. Expresado de este modo, ψ puede ser considerado como el porcentaje del factor F_3 movilizado.

$$SMR = RMR_{\text{básico}} + (\psi \cdot F_3) + F_4 \quad (2)$$

El método gráfico propuesto en el presente trabajo se centra en la obtención de ψ y F_3 , para lo cual se sirve de la proyección estereográfica de las discontinuidades que afectan al talud estudiado.

3. Diagramas estereográficos para el cálculo del *SMR*

La representación de las familias de discontinuidades predominantes del talud al que afectan suele llevarse a cabo mediante proyección estereográfica con el fin de observar la orientación e inclinación de las discontinuidades y su posición relativa respecto al plano del talud. Esta representación permite deducir cuál es el tipo de rotura cinemáticamente compatible a través de un análisis previo denominado cinemático. Además, esta técnica puede emplearse para obtener relaciones angulares necesarias para el cálculo de los factores de seguridad.

Este análisis resulta necesario para la obtención de los índices de corrección del *SMR* estableciendo el/los tipo/s de rotura/s cinemáticamente compatible/s con el sistema. Éstas pueden tratarse de roturas planas, roturas por vuelco o roturas en cuña.

Una vez identificado el tipo de rotura puede hacerse uso de la Tabla 1 para determinar los diferentes parámetros de corrección que dependen precisamente del mecanismo de rotura compatible con el conjunto discontinuidad-talud. Una forma de facilitar el cálculo de los índices de corrección es a través de los diagramas de proyección estereográficos propuestos para el *SMR* en este trabajo cuya elaboración y uso se explica en apartados sucesivos.

3.1. Determinación gráfica del índice ψ

La expresión (2) muestra el valor del *SMR* en función del *RMR* básico y de los parámetros de corrección ψ , F_3 y F_4 . Tal y como hemos visto con anterioridad, esta función se diferencia de la propuesta originalmente por Romana (1985) en que en ella los parámetros F_1 y F_2 han sido agrupados en un solo término denominado ψ que puede considerarse como el porcentaje del parámetro F_3 movilizado en cada caso.

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran los diagramas polares correspondientes a los diferentes mecanismos de rotura (plana, cuña y vuelco respectivamente) que pueden producirse en un talud rocoso permitiendo asignar los valores correspondientes al parámetro ψ .

Para hacer uso de ellos es preciso dibujar en papel vegetal la proyección estereográfica equiangular sobre el hemisferio inferior del polo correspondiente a la discontinuidad considerada, o a la línea de intersección de dos planos en el caso de rotura por cuña. Posteriormente superpondremos el diagrama de polos elaborado en el papel vegetal sobre el diagrama de las Figuras 1, 2 y 3 haciendo coincidir el sentido del buzamiento real del talud con la dirección indicada en el gráfico. La posición del polo nos indicará tanto el tipo de rotura compatible con el sistema como el valor o puntuación correspondiente al parámetro ψ .

3.2. Determinación del índice F_3

El parámetro F_3 depende de la relación existente entre el buzamiento del talud y de la discontinuidad. Por este motivo, para determinar gráficamente su valor es preciso haber llevado a cabo una construcción auxiliar, ya que este diagrama varía con el buzamiento del talud. La construcción presenta gran sencillez, dependiendo a su vez del tipo de mecanismo de rotura compatible con el sistema.

En la Figura 4 se muestra la construcción auxiliar necesaria para la obtención del parámetro F_3 cuando el tipo inestabilidad compatible es la rotura plana. En primer lugar se traza una semicircunferencia en la parte superior del diagrama de proyección de radio OP_S con centro en O , donde P_S es el polo correspondiente al plano del talud. Posteriormente se han trazado dos circunferencias concéntricas a cada lado de la de radio OP_S a una distancia de 10° , para lo cual nos hemos auxiliado de la graduación existente en el diámetro del diagrama. Las cuatro zonas así obtenidas proporcionan los valores de F_3 que siempre ocupan el mismo orden relativo y por lo tanto los mismos valores de corrección que varía entre 0 y -60, decrecientes hacia el centro (O) del diagrama.

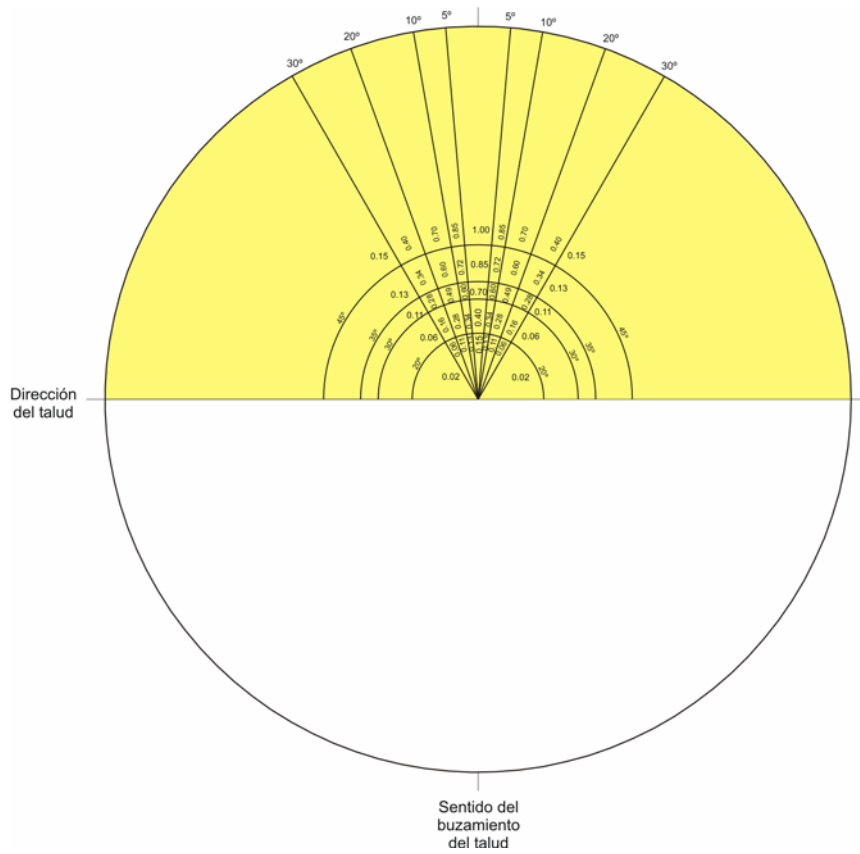


Fig. 1.- Diagrama estereográfico para la determinación de ψ para rotura plana.

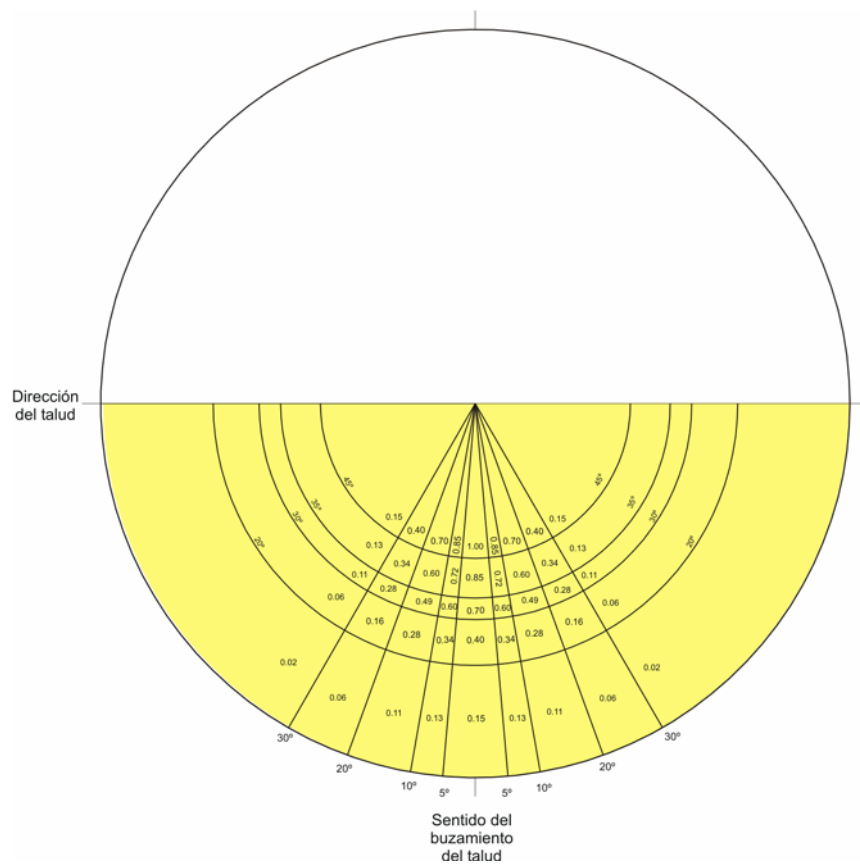


Fig. 2.- Diagrama estereográfico para la determinación de ψ para rotura por cuña.

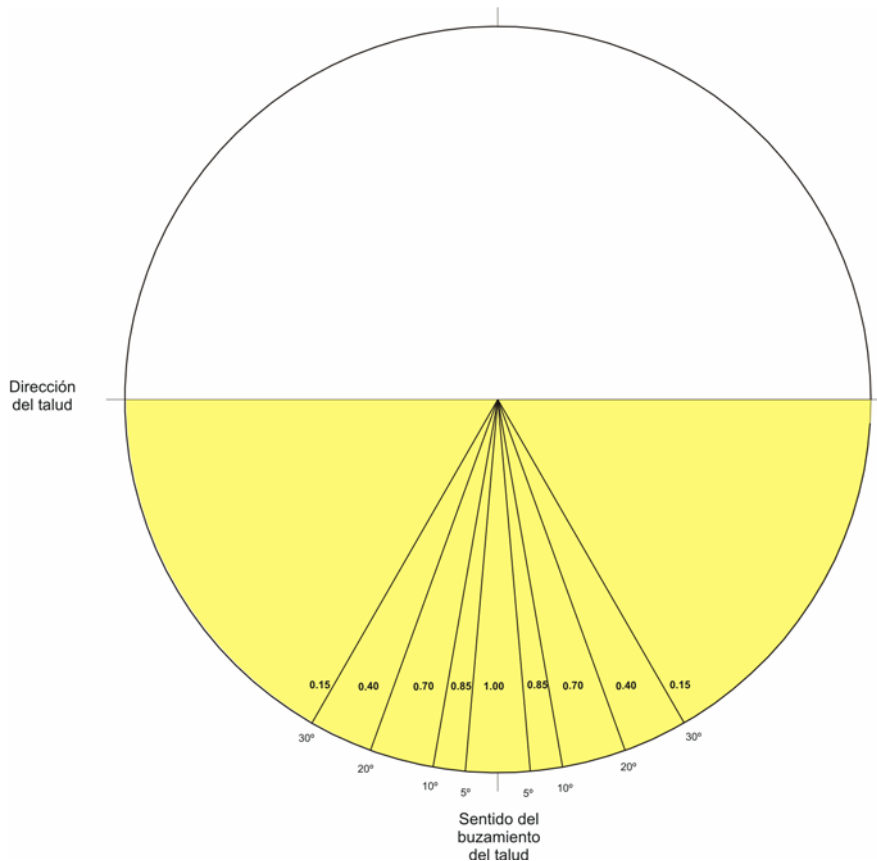


Fig. 3.- Diagrama estereoscópico para la determinación de ψ para rotura por vuelco.

La Figura 5 corresponde al gráfico de obtención de F_3 para fenómenos de rotura en cuña. Para definir los sectores de puntuación debemos trazar con centro en O una circunferencia de radio OQ, donde Q es la proyección del polo de la recta de máxima pendiente (l.m.p.) del talud S. Posteriormente trazamos dos nuevas circunferencias, a ambos lados de la ya trazada, equidistantes 10° valiéndonos nuevamente de la graduación del eje. La distribución de puntuaciones decrece hacia fuera del diagrama, variando también entre 0 y -60.

Cuando la rotura compatible con el sistema sea el vuelco el diagrama a utilizar es el mostrado en la Figura 6. Para construirlo transportamos el radio OP_S hasta el diámetro del diagrama, siendo P_S el polo del talud S. Una vez situado sobre el diámetro mediremos 110° y 120° en el sentido del centro de diagrama O por cuyos extremos haremos pasar sendas semicircunferencias que trazaremos en la parte inferior del diagrama. Los valores de F_3 correspondientes a cada una de las tres zonas determinadas son las mostradas en la Figura 6 manteniéndose siempre en el mismo orden relativo (creciente hacia el centro, O) y variando entre 0 y -25.

Puesto que para cada talud hemos de usar el diagrama de F_3 correspondiente a su buzamiento, el usuario de los mismos puede optar por hacer cada vez la construcción sobre el papel transparente en el que se proyectan los polos o por crear una serie de diagramas que contemplen todos los posibles buzamientos de los que se va a hacer uso. La segunda alternativa presenta la ventaja que una vez elaborados podremos guardarlos para emplearlos en cualquier otro talud que presente el mismo buzamiento.

En cualquiera de los tres casos posibles de rotura, la puntuación correspondiente al factor F_3 se obtiene al superponer el diagrama de polos de las discontinuidades, dibujado sobre papel transparente, que hemos empleado para la determinación del parámetro ψ , sobre el diagrama de determinación de F_3 . Para ello ha de girarse el diagrama hasta hacer coincidir el sentido del buzamiento del talud con el del diagrama de F_3 .

La posición del polo de la discontinuidad (para mecanismos de rotura por vuelco o plana) o de la recta de intersección de dos planos (para la rotura en cuña) determina la puntuación correspondiente.

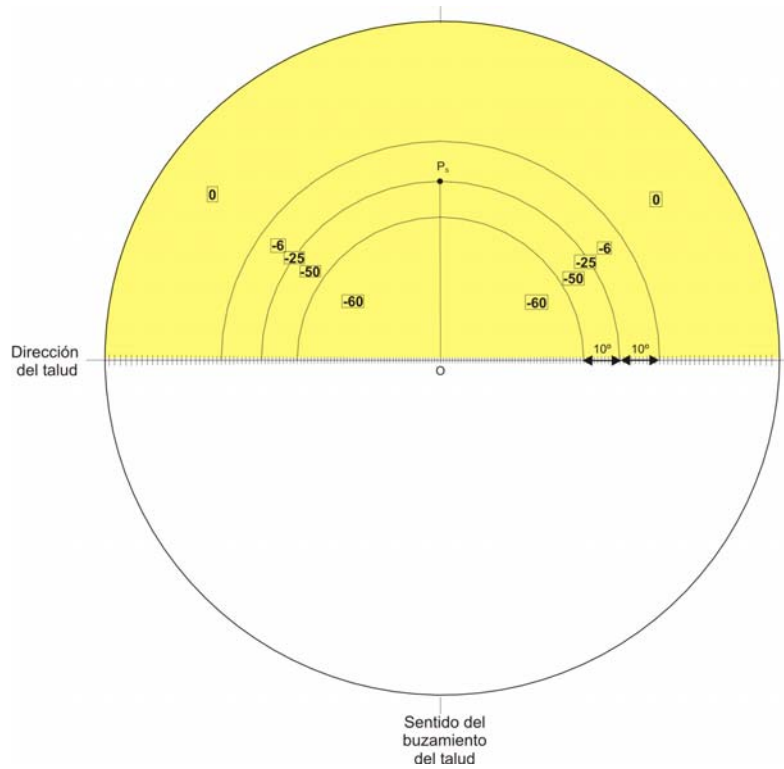


Fig. 4.- Procedimiento gráfico para determinación del parámetro F_3 para rotura plana.

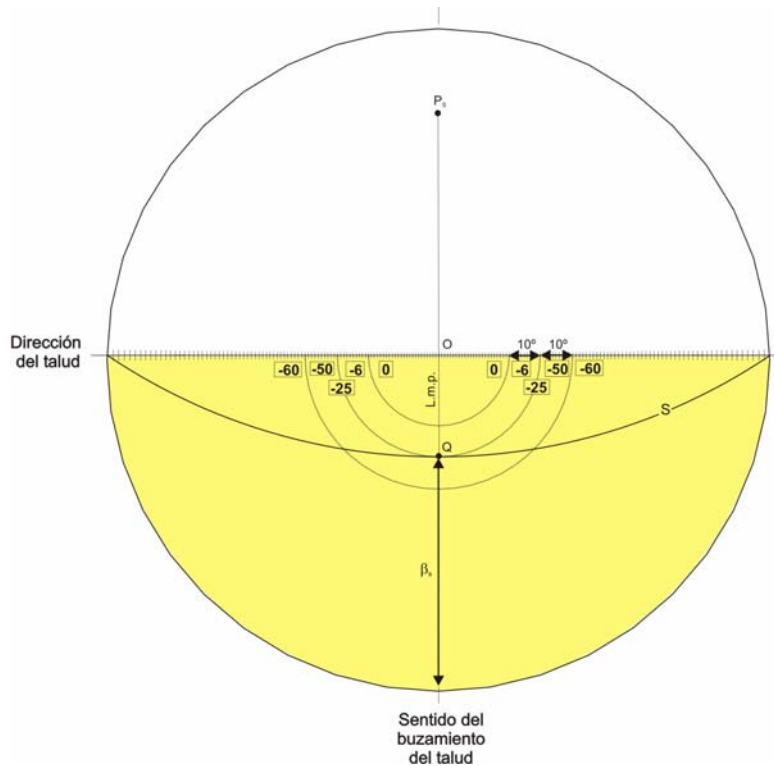


Fig. 5.- Procedimiento gráfico para determinación del parámetro F_3 para rotura en cuña (β_s es el buzamiento del talud S).

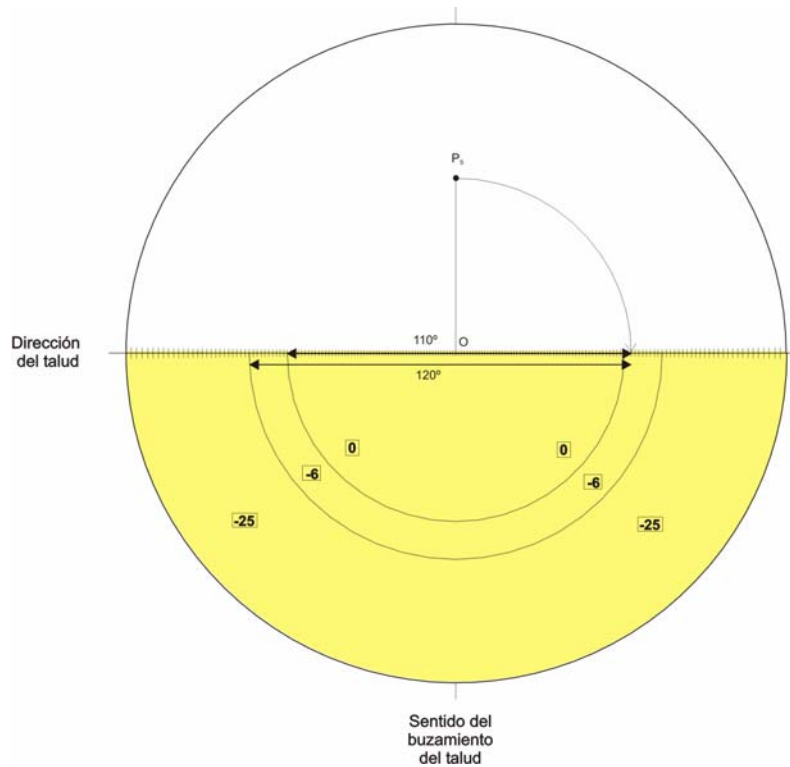


Fig. 6.- Procedimiento gráfico para determinación del parámetro F_3 para rotura por vuelco.

4. Ejemplo de aplicación a un caso real

Los gráficos mostrados en los apartados precedentes permiten reconocer el mecanismo de rotura del talud a la vez que proporcionan los valores de los parámetros de corrección con tan sólo superponer el diagrama de polos de las discontinuidades sobre el diagrama. Una ventaja del método es que hace uso de los diagramas de polos que siempre se elaboran antes de aplicar cualquier clasificación geomecánica, por lo que la única operación que hay que hacer es superponerlo a los diagramas propuestos para determinar los parámetros de corrección.

En el presente apartado vamos a aplicar la metodología gráfica planteada en el presente trabajo a un talud rocoso para la obtención de los parámetros de corrección del *SMR*. Igualmente utilizaremos la clasificación original del *SMR* para terminar comparando los valores obtenidos.

El caso estudiado corresponde a un talud (S) con un sentido de buzamiento y un buzamiento de 145° y 61° respectivamente, excavado mecánicamente sobre calizas, y con un RMR básico de 60. Para identificar los sistemas de discontinuidades se han llevado a cabo unas 100 medidas de orientación que posteriormente se han representado en proyección estereográfica con el fin de diferenciar cuatro juegos de discontinuidades. Los cuatro sistemas de discontinuidades reconocidos en el macizo rocoso tienen los siguientes valores de sentido del buzamiento y de buzamiento: J_1 123/46, J_2 028/81, J_3 276/73 y J_4 310/26 (Fig. 7).

Posteriormente se ha superpuesto la proyección estereográfica de la Figura 7 a los diferentes diagramas propuestos con el fin de distinguir los sectores a los que pertenecen los polos de los planos en el caso de rotura plana y por vuelco o los polos de la recta de intersección entre planos en el caso de rotura en cuña (Fig. 8).

De la figura 8a correspondiente a la rotura plana obtenemos el valor de $\psi_1=0.4$ para el plano de discontinuidad J_1 cuyo polo (P_1) se proyecta sobre el semicírculo superior, correspondiente a la rotura plana.

La Figura 8b muestra la proyección de los polos de las rectas de intersección entre planos con el fin de establecer las posibles cuñas de rotura compatibles con el sistema. De él se deduce que pueden generarse

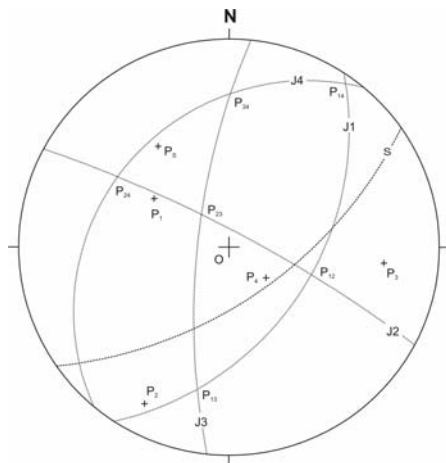


Fig. 7.- Diagrama de polos y de círculos máximos de las discontinuidades del talud estudiado.

rotura y superponiéndole el diagrama de polos de las intersecciones entre planos (Fig. 8b). Los valores de F_3 obtenidos de este modo para los pares de discontinuidades J_1 - J_2 y J_1 - J_3 son en los dos casos de -60 puntos.

Por último hemos de obtener el valor de F_3 para los juegos de discontinuidades susceptibles de causar roturas por vuelco. Para ello elaboramos el diagrama correspondiente a esta modalidad de rotura para el talud considerado, de donde deducimos los valores de F_3 correspondientes a las discontinuidades J_2 , J_3 y J_4 que son -25, -25 y 0 respectivamente (Fig. 8c).

Ordenando todos estos valores (Tabla 2) obtenemos el índice SMR para todos los tipos de rotura compatibles con la geometría del talud a través del procedimiento gráfico expuesto.

Como puede observarse en la Tabla 2, el procedimiento de cálculo de los parámetros de corrección proporciona el mismo valor del SMR sin producir cambios en la clase ni la subclase del talud.

Del análisis realizado se concluye que en el ejemplo planteado, el sistema de discontinuidades J_1 (123/46) es, con diferencia, el más desfavorable de todos los que afectan al talud considerado, ya que proporciona un valor del SMR de 36 puntos (clase IV), inferior, y por lo tanto más desfavorable, a las puntuaciones calculadas para los sistemas J_2 , J_3 y J_4 o a las combinaciones J_1 - J_2 y J_1 - J_3 que son las únicas cinemáticamente compatibles con la orientación del talud (Tabla 2).

5. Conclusiones

El método gráfico propuesto para la obtención de los parámetros de corrección del SMR proporciona una herramienta muy cómoda para el cálculo de dicho índice geomecánico. Se sirve de la proyección estereográfica de los polos de los planos y de las rectas de intersección, siempre necesaria para el análisis previo de reconocimiento de sistemas de discontinuidades y para el análisis cinemático de los taludes, para establecer los índices de corrección del SMR. Para obtenerlos basta superponer el diagrama de polos sobre los diagramas propuestos para calcular los diferentes parámetros.

Los diagramas de determinación de ψ (Figs. 1, 2 y 3) son válidos para cualquier tipo de talud independientemente de su buzamiento. Sin embargo los diagramas para la obtención de F_3 (Figs. 4, 5 y 6) dependen del buzamiento del talud que se pretende caracterizar, por lo que deben construirse adaptados a cada caso particular de buzamiento. Puesto que a menudo los buzamientos de los taludes ejecutados en una determinada obra o explotación minera presentan el mismo buzamiento o pendientes, podemos utilizar los mismos diagramas para la determinación de los parámetros de todos los taludes de ésta que presentan el

cuñas de rotura entre las discontinuidades J_1 - J_2 y J_1 - J_3 , con valores $\psi_{12}=0.15$ y $\psi_{13}=0.06$, dado que sus polos de la línea de intersección se proyectan sobre el semicírculo inferior del diagrama.

La Figura 8c corresponde al análisis de vuelco. De este diagrama se deduce que los planos de discontinuidad J_2 , J_3 y J_4 pueden generar cinemáticamente vuelcos, puesto que sus polos se proyectan en el semicírculo inferior del diagrama. Los respectivos valores de ψ son $\psi_2=\psi_3=0.15$ y $\psi_4=0.70$.

El siguiente paso en el cálculo del SMR es la determinación del factor F_3 . Para ello hemos de construir el diagrama según el procedimiento descrito con anterioridad para rotura plana. Una vez hecho esto basta observar la posición del polo P_1 para determinar el valor de $F_3=-60$ (Fig. 8a).

Para la rotura por cuña actuaremos del mismo modo, elaborando el diagrama correspondiente a este tipo de

mismo buzamiento. Para obtener los parámetros de corrección bastará con hacer la representación estereográfica de los sistemas de discontinuidades y superponerlos a los diagramas.

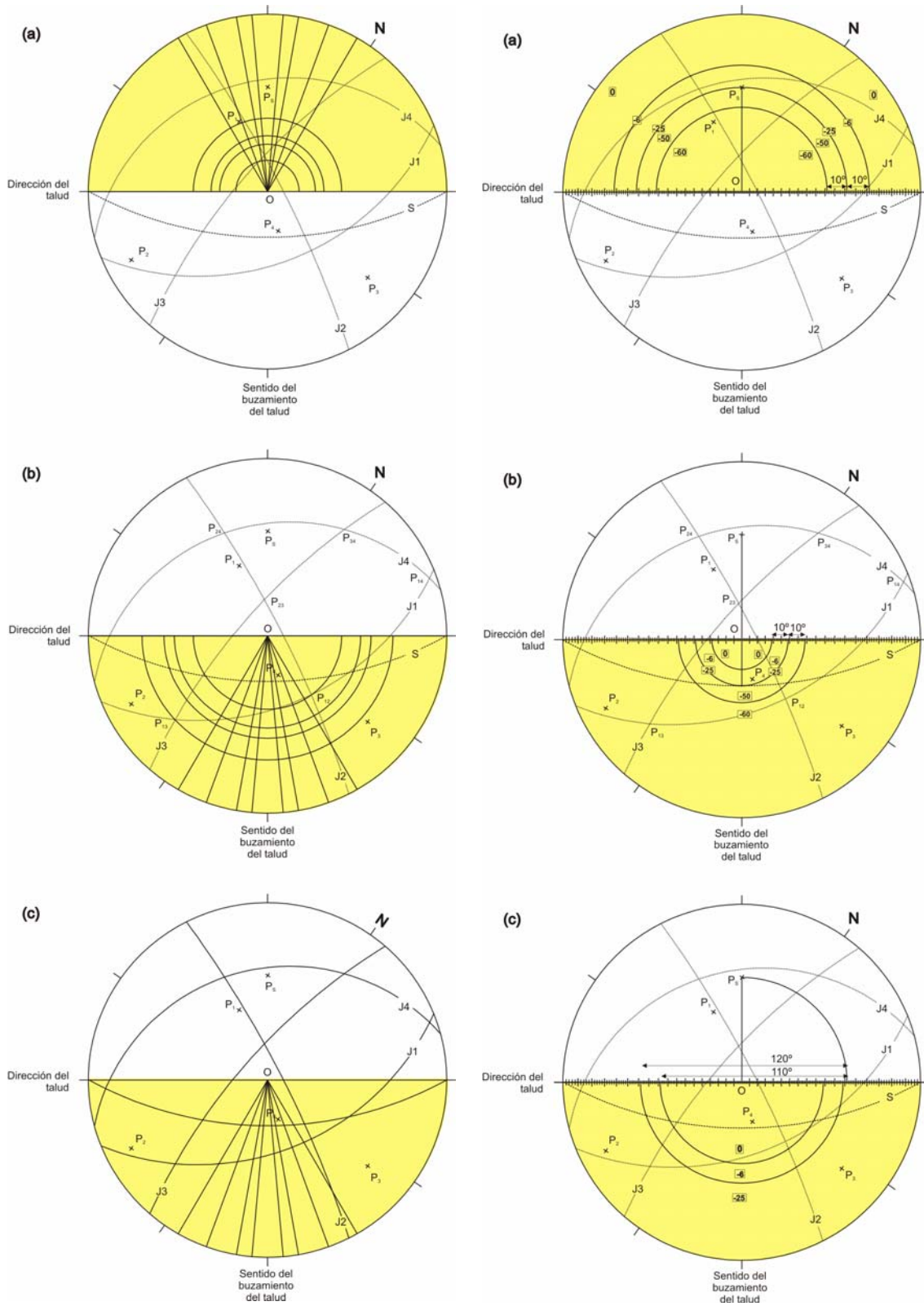


Fig. 8.- Ejemplo de obtención de $\psi (F_1 \times F_2)$ y de F_3 para: (a) rotura plana, (b) rotura en cuña y (c) rotura por vuelco.

Las pequeñas diferencias que se producen en algunas ocasiones al emplear el método gráfico se deben en parte al redondeo que se ha llevado a cabo al fijar el parámetro ψ en el método gráfico aunque se ha comprobado que los posibles errores derivados de este hecho no producen cambios relevantes en el índice final. Otra fuente de error es debida a la asignación de valores de corrección a polos que se proyectan en zonas próximas a los límites entre sectores de puntuación, ya que el ojo humano no permite discernir donde nos encontramos exactamente, si en un sector o en el anexo. De cualquier manera se ha comprobado que dichos errores no alteran los índices finales llevando a cabo un análisis meticuloso para la obtención de los factores de corrección.

Tabla 2.- Cálculo del cálculo del SMR -en negrita set más desfavorable- (G: gráfico; D: convencional).

SET	TIPO DE ROTURA	RMR básico	α_j	β_j	α_s	β_s	$ \alpha_j - \alpha_s $ $ \alpha_j - \alpha_s $ $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	$\beta_j - \beta_s$ $\beta_j + \beta_s$	MÉTODO	F ₁	F ₂	ψ	F ₃	F ₄	$F_1 F_2 F_3 + F_4$	SMR
J1	P	60	123	46	145	61	22	46	G	-	-	0.40	-60	0.00	-24.00	36
									D	0.40	1.00	-	-60	0.00	-24.00	36
J2	T	60	028	81	145	61	63	81	G	-	-	0.15	-25	0.00	-3.75	56
									D	0.15	1.00	-	-25	0.00	-3.75	56
J3	T	60	276	73	145	61	49	73	G	-	-	0.15	-25	0.00	-3.75	56
									D	0.15	1.00	-	-25	0.00	-3.75	56
J4	T	60	310	26	145	61	15	26	G	-	-	0.70	0	0.00	0.00	60
									D	0.70	1.00	-	0	0.00	0.00	60
J1-J2	W	60	108	45	145	61	37	45	G	-	-	0.15	-60	0.00	-9.00	51
									D	0.15	1.00	-	-60	0.00	-9.00	51
J1-J3	W	60	192	20	145	61	47	20	G	-	-	0.06	-60	0.00	-3.6	56
									D	0.15	0.40	-	-60	0.00	-3.6	56

Agradecimientos

El presente trabajo se ha elaborado en el marco del proyecto TIC2002-04451-C02-02, la acción especial BTE2002-12456-E así como del proyecto de la Generalitat Valenciana GV04B/556 y el grupo de investigación GRUPOS03/085.

Referencias bibliográficas

- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, Chichester, 251 pp.
- Hack, H.R.G.K. (1998). *Slope Stability Probability Classification*, vol.43. ITC Delf Publication, Enschede, Netherlands, 273 pp.
- Haines, A., Terbrugge, P.J. (1991). *Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification system*. In: Wittke, W. Ed.. Proceedings 7th Congress on Rock Mechanics, ISRM, Aachen. Germany. Balkema, Rotterdam, 887-892.
- Lindsay, P., Campbell, R.N., Fergusson, D.A., Gillard, G.R., Moore, T.A. (2001). *Slope stability probability classification*, Waikato Coal Measures, New Zeland. International Journal of Coal Geology, 45. 127-145.
- Romana, M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Int. Symp. On the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas, 49-53.
- Romana, M. (1997). *El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes*. Actas del IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables, 3, 955-1011. Granada.
- Romana, M., Serón, J.B., Montalar, E. (2001). *La clasificación geomecánica SMR: Aplicación experiencias y validación*. V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. I, 393-404, Madrid.
- Selby, M.J. (1980). *A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with test from Antarctica and New Zeland*. Z. Geomorphologic N.F., 24, 31-51.
- Shuk, T. (1994). *Key elements and applications of the natural slope methodology (NSM) with some emphasis on slope stability aspects*. Proceedings of the 4th South American Congress on Rock Mechanics 2, ISRM, Aachen, Germany, Balkema, Rotterdam, 955-960.