

# Efecto del desgaste de la roca y de la velocidad de ensayo en la determinación mediante *tilt test* del ángulo de fricción básico de juntas en roca

## *Effect of Rock Wear and Testing Velocity on the Obtaining of Basic Friction Angle of Rock Discontinuities by Means of Tilt Test*

Ignacio Pérez-Rey<sup>1\*</sup>, Hatim Delleró<sup>2</sup>, Leandro R. Alejano<sup>3</sup>, Elisa Grande<sup>4</sup>, Andrea Muñoz<sup>5</sup>, Javier Arzúa<sup>6</sup>

### Resumen

El ángulo de fricción básico ( $\phi_b$ ) es un parámetro esencial para la estimación de la resistencia al corte de juntas de roca, de acuerdo a la ecuación de Barton y a otros criterios sugeridos. Este parámetro se puede obtener en laboratorio mediante el ensayo de inclinación o *tilt test*. Sin embargo, aún no existe una metodología sugerida o procedimiento generalizado para la obtención de este parámetro de manera experimental. En el presente estudio se investiga el efecto del desgaste, consecuencia de las sucesivas repeticiones del ensayo sobre la misma superficie de roca, así como la posible influencia de la velocidad de rotación de la mesa de inclinación sobre los resultados. Se han estudiado cinco velocidades distintas, con cinco juntas para cada velocidad y cinco ensayos para cada junta, para el caso de un granito medianamente meteorizado. Los resultados indican que, si bien la velocidad de rotación no afecta de manera significativa a los resultados, el efecto del desgaste juega un papel importante en la obtención del ángulo de fricción básico. Las observaciones y resultados obtenidos a partir de este estudio servirán de base para sugerir una metodología rigurosa aplicable a la obtención del ángulo de fricción básico en laboratorio.

**Palabras clave:** ensayo de inclinación, desgaste, superficie de roca, durabilidad, corte con sierra.

### Abstract

*Basic friction angle is an essential parameter for estimating the shear strength of rock joints, according to Barton's equation besides other suggested criteria. This parameter can be obtained in laboratory by means of tilt tests. Nevertheless, there is no suggested methodology nor generalised procedure yet to experimentally obtain this parameter. In the present study, the effect of wear, a consequence of repetitive sliding along the same rock surface, is investigated as well as the influence of rotational speed of the tilting table on results. Five different velocities were considered and five rock surfaces for a moderately-weathered granite were tested five times for each velocity. Results indicate that rotational speed does not affect results in a significant manner; conversely, wear was reported to relevantly affect results, as observed by decaying trends of test series. Results and observations derived from this study may be used as the basis for developing a thorough methodology to obtain basic friction angle of rock joints in laboratories.*

**Keywords:** *tilt test, wear, rock surface, durability, saw cutting.*

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Fundamentos

La resistencia al corte de pico representa un parámetro fundamental a la hora de evaluar la estabilidad de taludes

en roca, ya sean laderas naturales, taludes de mina o desmontes de carretera, así como de excavaciones subterráneas. Este parámetro se ha venido estimando en la práctica durante los últimos años mediante una expresión (ecuación 1) propuesta por Barton & Choubey (1977).

$$\tau = \sigma_n \times \tan \left[ \phi_r + JRC \times \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad [1]$$

Esta ecuación tiene en cuenta la rugosidad de la junta, mediante el parámetro *JRC* (*Joint Roughness Coefficient*), la resistencia a la compresión de los labios de la junta mediante *JCS* (*Joint Compressive Strength*) y la tensión normal a la que la junta está sometida mediante  $\sigma_n$ , para estimar la resistencia al corte de la misma,  $\tau$ .

El ángulo de fricción residual o  $\phi_r$ , que considera el efecto de la meteorización de la junta, se puede estimar mediante la ecuación 2:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R} \quad [2]$$

\* Autor de contacto: [iperez@uvigo.es](mailto:iperez@uvigo.es)

<sup>1</sup> Ingeniero de Minas (Universidade de Vigo). Laboratorio de mecánica de rocas John P. Harrison. Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente (ETSE de Minas). Rúa Maxwell, s/n Campus Universitario Lagoas-Marcosende. Universidade de Vigo, 36310, Vigo (Pontevedra).

<sup>2</sup> Hatim Delleró: Geólogo. Doctor en Geología por la Université Abdelmalek Essaïdi Tétouan.

<sup>3</sup> Leandro R. Alejano Monge: Ingeniero de Minas. Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid.

<sup>4</sup> Elisa Grande: Graduada en Obras Públicas (Universidade da Coruña).

<sup>5</sup> Andrea Muñoz: Ingeniera de Caminos (Universidade da Coruña).

<sup>6</sup> Javier Arzúa: Ingeniero de Minas. Doctor por la Universidade de Vigo.

en donde  $r$  y  $R$  se corresponden, respectivamente, con el número de rebotes del martillo de Schmidt para una junta meteorizada ( $r$ ) y para una junta sana ( $R$ ). El parámetro  $\phi_b$  es el ángulo de fricción básico, comúnmente estimado en laboratorio mediante *tilt tests* o ensayos de inclinación, de una superficie de roca seca o húmeda obtenida mediante serrado y se considera igual a la fricción observable en una superficie plana de la roca original no meteorizada.

## 1.2. El ángulo de fricción básico o $\phi_b$

El ángulo de fricción básico, comúnmente denotado por  $\phi_b$ , se define como aquel parámetro representativo de la resistencia al corte de una discontinuidad plana, sin relleno y sin signos de meteorización o desgaste previos.

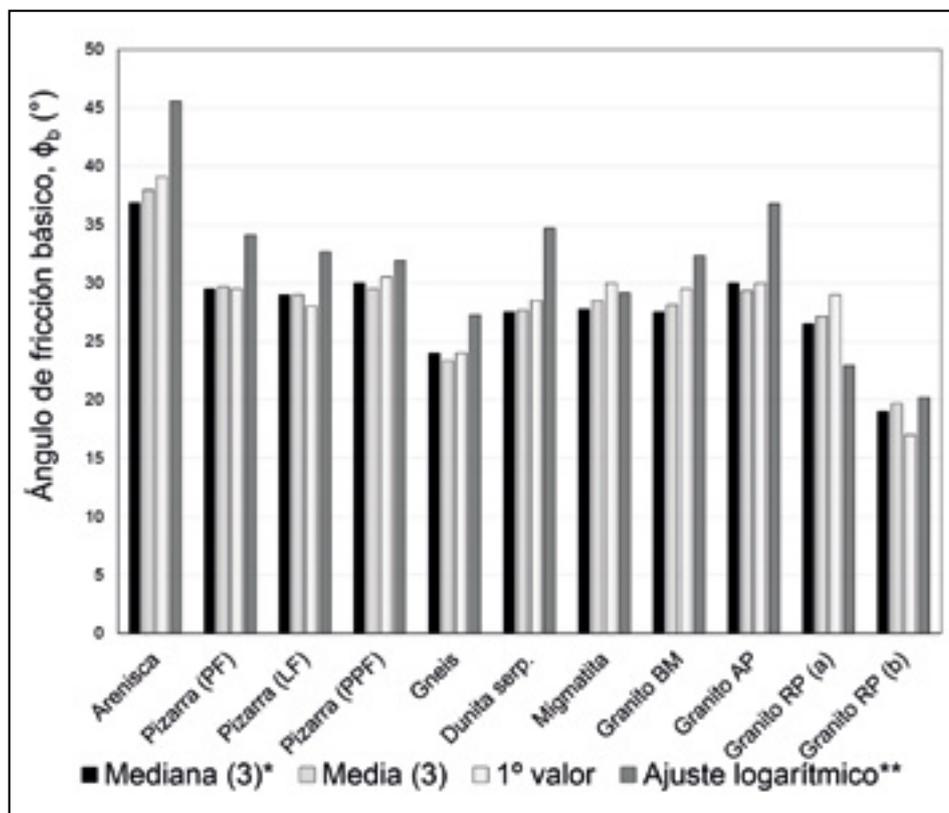
A efectos prácticos, la estimación de este parámetro se ha venido realizando en laboratorio siguiendo diversas metodologías, ya sea mediante ensayos de inclinación o *tilt tests*, *push/pull tests* así como ensayos de corte directo o *direct shear tests*. Estos procedimientos involucran, por una parte, distintas configuraciones geométricas y, por otra, diversos niveles de tensión normal y mecanismos de deslizamiento que pueden afectar a la estimación del parámetro. Entre ellos cabe destacar, como objeto principal de este estudio, el desgaste de la superficie de roca asociado a la sucesiva realización de ensayos y la velocidad de rotación de la plataforma a la que se realizan los mismos.

A pesar de que la obtención de este parámetro puede parecer sencilla, no existe todavía una metodología o procedimiento generalizado para su estimación debido, en parte, a que la definición del ángulo de fricción básico no está aun completamente determinada.

Sin embargo, como puede apreciarse en la figura 1, el valor del ángulo de fricción básico puede variar considerablemente según el procedimiento elegido para su estimación. Esto pone de manifiesto la importancia de una metodología adecuada para la estimación del parámetro objeto de este estudio.

Los ensayos contemplados dentro de este estudio han sido llevados a cabo bajo las pautas marcadas por Alejano et al. (2012), que representan un punto de partida razonable para la obtención del ángulo de fricción básico mediante ensayos de inclinación o *tilt tests*. Se describen a continuación de manera general:

- El uso de bloques prismáticos con una superficie de contacto mayor que  $50 \text{ cm}^2$  y un ratio longitud-espesor mayor que 2.
- La limpieza de las superficies de ensayo con un paño limpio entre cada repetición, para evitar la acumulación de polvo.
- Situar los bloques horizontalmente en su posición inicial.
- Repetición de los *tilt tests* de cada serie al menos tres veces.



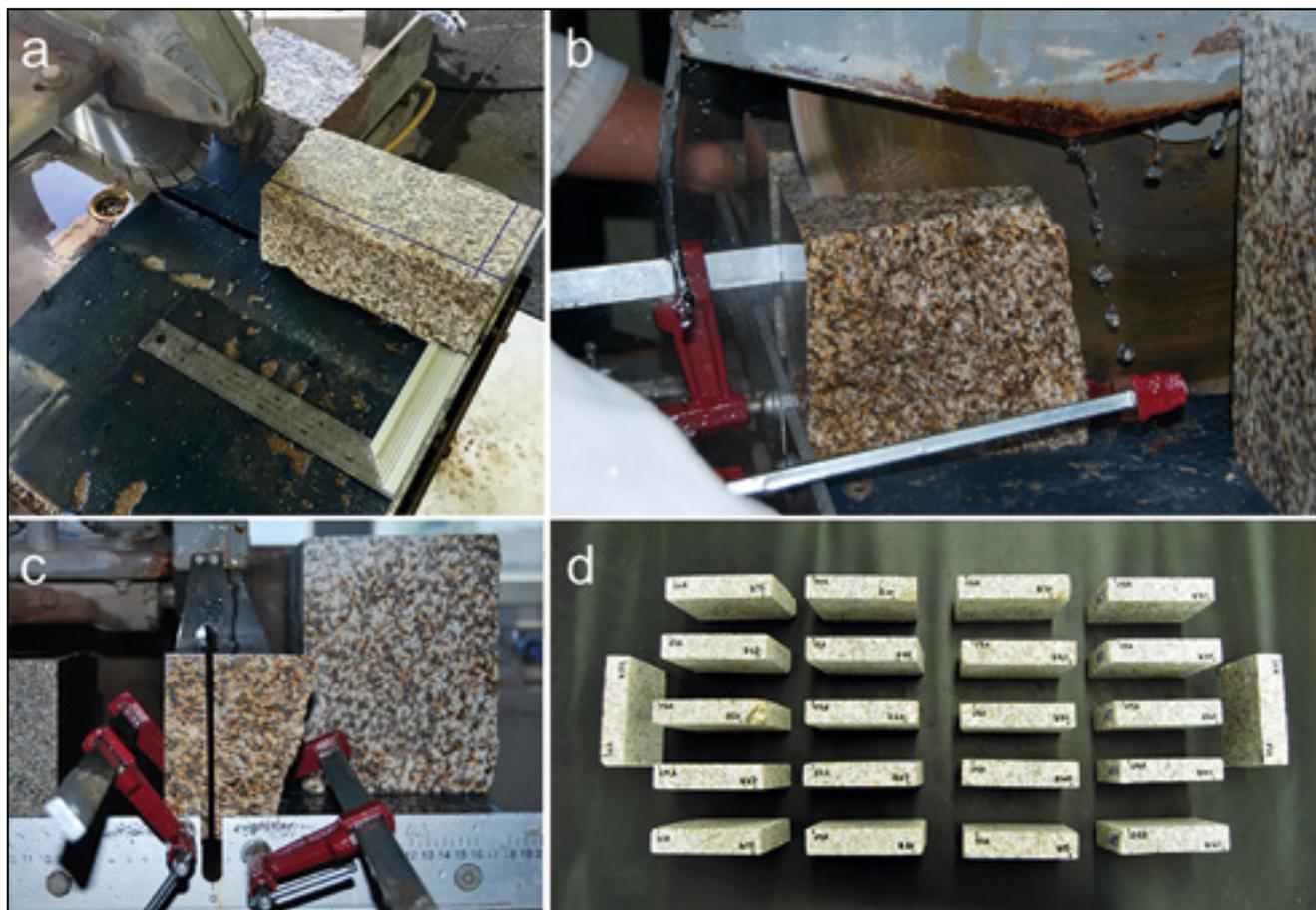
**Figura 1.** Estimación del ángulo de fricción básico mediante cuatro procedimientos: mediana, media, primer valor y ajuste logarítmico de cada serie de ensayos. (PF = test paralelo a la foliación; LF = test a lo largo de la foliación; PPF = test perpendicular a la foliación). \*según Alejano et al. (2012); \*\*según Pérez-Rey et al. (2015).

## 2. TRABAJOS DE LABORATORIO

Para el desarrollo de este estudio, se ha seleccionado un granito moderadamente meteorizado, con un tamaño de grano medio (granito de la variedad comercial *Amarillo País*). Esta roca presenta una densidad de  $2,61 \text{ g/cm}^3$ , una resistencia a la compresión simple o RCS media de 75 MPa y una resistencia a tracción, obtenida mediante ensayos brasileños, de 6,65 MPa.

Las probetas utilizadas en este estudio provienen de dos bloques prismáticos, de dimensiones iniciales  $300 \times 120 \times 120 \text{ mm}^3$ . A partir de ellos y mediante cortes transversales con una sierra circular, se han obtenido 22 probetas, con unas dimensiones finales de  $115 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ , cumpliendo así con las condiciones establecidas en Alejano et al. (2012).

En la figura 2 se esquematiza el proceso de obtención de las probetas en laboratorio.



**Figura 2.** Proceso de obtención de las probetas para la realización de este estudio: **a.** bloque original antes de ser cortado; **b.** y **c.** proceso de corte; **d.** conjunto de probetas preparadas para realizar los ensayos.

El programa de laboratorio comprende cinco series de ensayos —incluyendo veinte *tilt test* por serie—, cada una realizada a una velocidad distinta. Para ello, se dispone de una máquina de ensayos de inclinación (descrita en su versión original en Alejano et al. 2012), si bien se ha modificado para poder realizar ensayos a distintas velocidades (figura 3).

Esto es posible gracias a un potenciómetro acoplado al variador de frecuencia, lo que permite preestablecer velocidades de ensayo desde los  $0,5 \text{ }^\circ/\text{min}$  hasta un máximo de  $28 \text{ }^\circ/\text{min}$ .



**Figura 3.** Mesa de inclinación para la realización de *tilt tests*, modificada con un potenciómetro (indicado mediante una flecha) para permitir variar en la forma deseada la velocidad de ensayo.

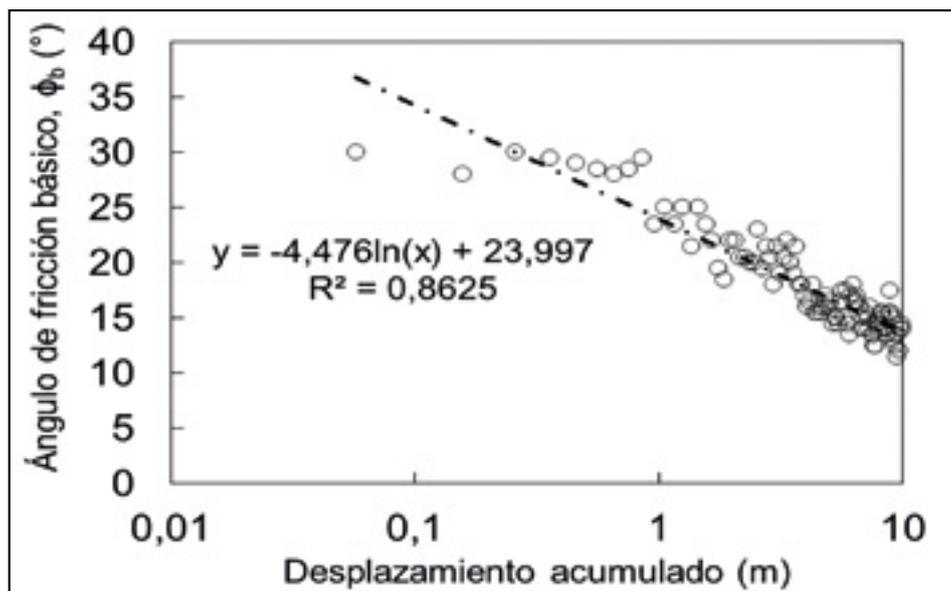
### 3. EFECTO DEL DESGASTE DE LA ROCA Y LA VELOCIDAD DE ENSAYO

#### 3.1. El desgaste de la superficie de la roca

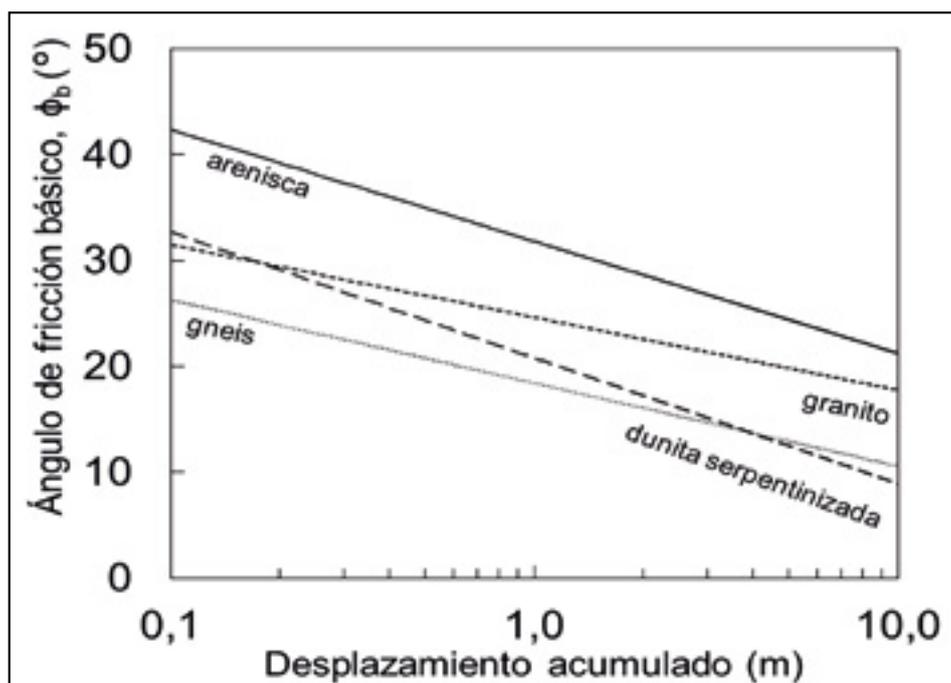
El efecto del desgaste de la superficie de la roca como consecuencia de sucesivas repeticiones en la estimación del ángulo de fricción básico de juntas mediante *tilt test* es una evidencia ya estudiada por varios autores hasta la fecha (González et al. 2014; Pérez-Rey et al. 2015). Este efecto provoca que, para una superficie de ensayo dada, los resultados de  $\phi_b$  puedan presentar valores que disminuyen a medida que se realizan sucesivos ensayos con limpieza de la superficie entre cada test (figura 4).

El efecto del desgaste se ha intentado relacionar de alguna manera al tipo de litología estudiada (Pérez-Rey et al. 2015). Para ello, de manera similar a la llevada a cabo en la figura 4, se han ajustado funciones logarítmicas a los conjuntos de puntos representativos del ángulo de fricción frente al desplazamiento acumulado a consecuencia del deslizamiento inherente al ensayo. De esta manera, las rocas más meteorizables/disgregables, como la dunita serpentinizada o la arenisca, presentarían una pendiente de descenso del ángulo de fricción mayor que aquéllas más duras, como el gneiss o el granito (figura 5).

En el laboratorio de mecánica de rocas *John P. Harrison* de la Universidad de Vigo se dispone de una máquina de ensayos de durabilidad tipo *Slake*. Como una primera



**Figura 4.** Efecto del desgaste (en ejes semilogarítmicos representando  $\phi_b$  frente al desplazamiento acumulado de la superficie de ensayo) tras la realización de 100 ensayos con limpieza de superficies en granito *Amarelo País*.



**Figura 5.** Funciones de ajuste logarítmicas de  $\phi_b$  frente al desplazamiento acumulado, para cuatro tipos de litología (arenisca, granito, gneis y dunita serpentinizada).

aproximación al estudio de una hipotética relación entre el desgaste y el tipo de litología, se planteó una serie de ensayos de durabilidad en varias rocas sobre las que se tenían registros de ángulos de fricción básico obtenidos mediante *tilt tests* con anterioridad (figura 6).

Si bien parece que existe, *a priori*, una relación entre la durabilidad de la roca y el desgaste, representado en forma de la pendiente de una función de ajuste adecuada, como se muestra en la figura 5, una vez comparados los resultados de los ensayos *Slake* con dichas pendientes representativas del desgaste, no se puede obtener ninguna conclusión relevante en cuanto a este aspecto. En el gráfico mostrado en la figura 7, donde se ha representado el índice de durabilidad *Slake* ( $I_d$ ) frente a los valores de las pendientes correspondientes a las funciones de ajuste en valor absoluto, no

se observa ninguna tendencia clara que relacione de alguna manera estos dos parámetros.

De este trabajo se deriva, por una parte, que el índice de durabilidad *Slake* no parece un parámetro apropiado para estudiar el desgaste de la superficie de roca, pues la pérdida de material observada en las probetas está en todo caso más relacionada con la resistencia mecánica de la roca que con su resistencia al desgaste por fricción; por otra parte, en vista de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que el desgaste de la superficie de ensayo es un factor relevante, un estudio en mayor profundidad de este efecto se hace necesario. La mineralogía, la rugosidad, el tipo de disco usado en el corte o incluso la temperatura y la humedad del ambiente son factores que, se piensa, pueden afectar conjuntamente al efecto del desgaste de las superficies



Figura 6. Probetas cúbicas características de un ensayo de durabilidad tipo *Slake*.

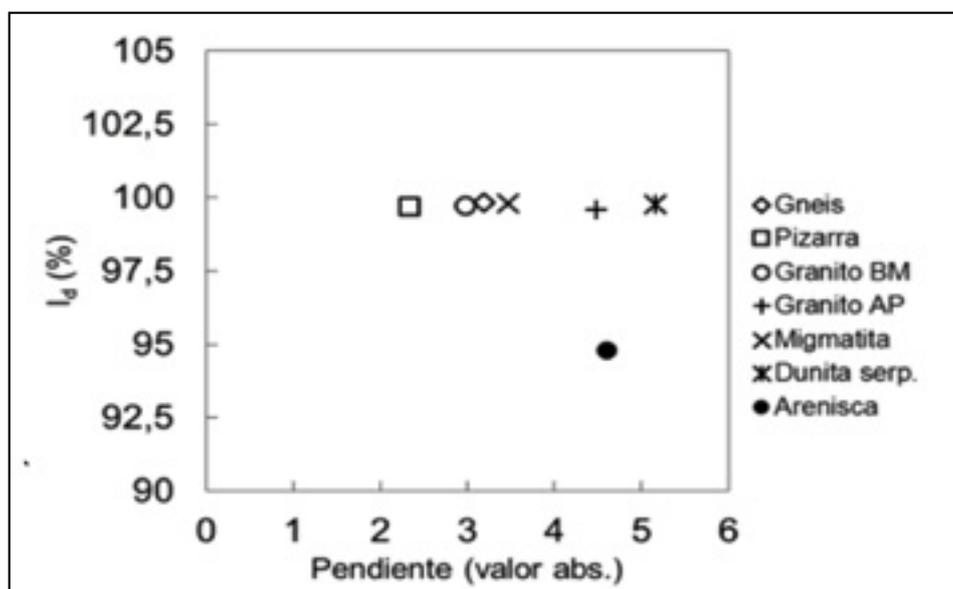


Figura 7. Representación del índice de durabilidad *Slake* ( $I_d$ ) frente a la pendiente del ajuste logarítmico para las distintas rocas estudiadas.

en juntas de rocas. La aplicación de un programa de investigación más pormenorizado sobre este aspecto se considera de sumo interés.

### 3.2. La velocidad de la mesa de inclinación

El posible efecto de la velocidad de inclinación de la mesa de ensayos sobre los resultados del ángulo de fricción básico resulta de un interés particular, pues es elevado el número de laboratorios que llevan a cabo ensayos de inclinación a diferentes velocidades. Este hecho es consecuencia de la propia experiencia de cada laboratorio, de las capacidades técnicas de los mismos así como de la inexistencia de un procedimiento estandarizado para la estimación del ángulo de fricción básico mediante *tilt tests*.

Con la intención de estudiar el efecto de la velocidad sobre el ángulo de fricción básico, se tuvo en cuenta el rango de velocidades de inclinación recogidas en diversas publicaciones. Entre éstas, se presentan: 2,5°/min (USBR 2009), 8°/min (Bruce et al. 1989), 23°/min (Ruiz & Li 2014) o 24°/min (Alejano et al. 2012). Así, se plantearon cinco series de ensayos en probetas de granito *Amarelo* País, comprendiendo veinte *tilt tests* cada una y realizadas a 2, 4, 7,5, 12,5 y 25°/min. Los resultados se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Ángulos de fricción básicos obtenidos para las diferentes velocidades angulares indicadas

Series	$\omega$ (°/min)	Repeticiones				
		$\phi_{b1}$ (°)	$\phi_{b2}$ (°)	$\phi_{b3}$ (°)	$\phi_{b4}$ (°)	$\phi_{b5}$ (°)
TR-1	25	32,5	30,9	30,2	29,8	27,6
TR-2	25	29,0	26,3	25,4	25,3	25,4
TR-3	25	31,3	32,7	31,7	31,5	31,2
TR-4	25	30,9	31,1	30,7	30,8	29,5
TR-5	12,5	29,2	29,2	31,0	28,9	28,9
TR-6	12,5	27,5	26,8	27,3	25,4	29,1
TR-7	12,5	27,1	27,2	26,4	26,7	27,2
TR-8	12,5	29,1	31,3	27,5	26,1	26,1
TR-9	7,5	30,7	30,8	29,4	30,0	29,6
TR-10	7,5	29,2	29,4	27,6	25,6	28,6
TR-11	7,5	32,2	29,6	30,7	29,8	28,0
TR-12	7,5	29,3	28,0	27,9	29,1	30,8
TR-13	4	31,1	32,2	31,0	30,4	30,2
TR-14	4	30,6	30,6	28,0	26,7	26,6
TR-15	4	28,9	28,7	30,8	29,6	30,2
TR-16	4	30,1	30,3	30,7	29,8	28,9
TR-17	2	32,2	30,0	28,6	29,9	26,6
TR-18	2	30,9	27,9	27,8	26,3	27,7
TR-19	2	30,2	25,6	32,1	24,1	23,4
TR-20	2	30,3	30,7	28,5	27,6	27,8

De acuerdo a los resultados, parece que no existe alguna relación clara entre los valores del ángulo de fricción y las velocidades de ensayo, aunque el efecto del desgaste es claramente observable a medida que se aumenta el número de repeticiones, en la misma línea observada por nuestro grupo de investigación (González et al. 2014; Pérez-Rey et al. 2015).

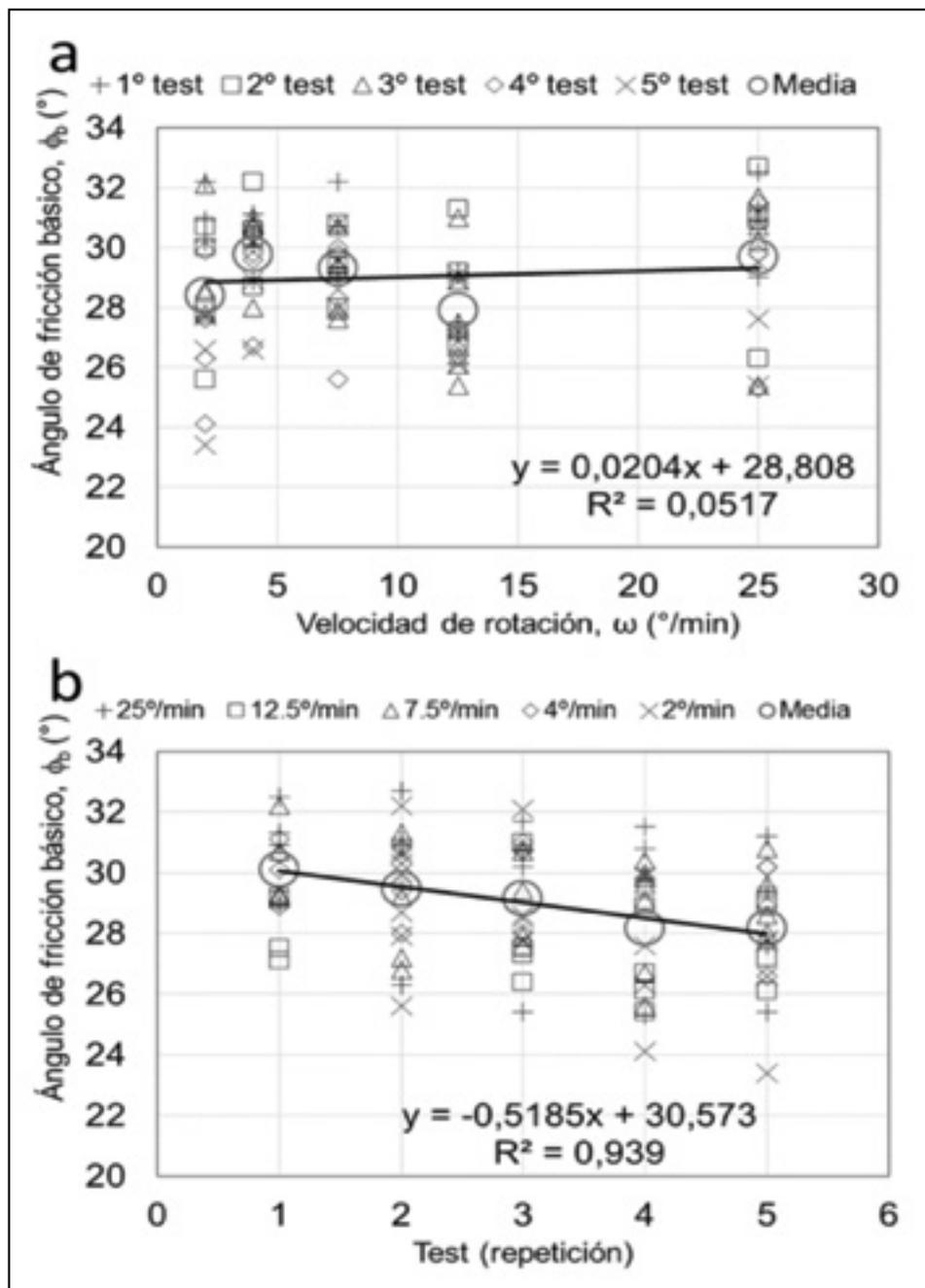
Como una primera aproximación al estudio de la posible influencia de la velocidad de ensayo en el resultado del ángulo de fricción básico, los resultados tal cual se obtuvieron de las series de *tilt tests* se representaron frente a la velocidad angular de la plataforma (figura 8a) y frente a la repetición o número de ensayo (figura 8b).

Si los resultados de los ángulos de fricción básicos se representan frente a las diferentes velocidades angulares a las cuales se llevaron a cabo los ensayos (figura 8a), se puede observar que, descartando la variabilidad natural, no existe una correlación evidente entre los valores de los ángulos de fricción y las velocidades de inclinación de la plataforma. Esta conclusión se evidencia de manera matemática mediante un coeficiente de determinación muy bajo ( $R^2 = 0,0517$ ). Aun considerando un ajuste lineal, una diferencia de unos 0,5° es la que separa a las series extremas (2 y 25°/min).

Para el caso de la representación de los resultados frente a la repetición o número de ensayo (figura 8b) se puede observar, de manera bastante evidente, una tendencia descendente de la función lineal de ajuste, hecho que ya se había observado anteriormente. Aplicando el mismo procedimiento que para el caso de la figura 8a, se observa que el coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,939$ ) es mucho más elevado. La caída de los valores está en torno a 0,5° por repetición, lo que implica una diferencia media de 2,1° en tan sólo cinco repeticiones.

Este hecho pone de manifiesto que, en consonancia con el apartado 3.1, el efecto del desgaste juega un papel relevante a la hora de estimar el ángulo de fricción básico de una junta de roca.

La tendencia descendente se observa a pesar de que dentro de cada grupo existen ensayos realizados a diferentes velocidades añadiendo, si cabe, mayor justificación al hecho de que los resultados no presentan ningún tipo de dependencia con respecto a la velocidad de rotación de la plataforma.



**Figura 8a.** Ángulo de fricción básico frente a la velocidad angular de la plataforma. **b.** Ángulo de fricción básico frente a las cinco repeticiones llevadas a cabo con cada serie. (Los círculos de mayor tamaño, representan la media de cada grupo).

#### 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Después de representar los resultados y analizar de manera somera la posible influencia de la velocidad sobre la estimación del ángulo de fricción básico de juntas en roca, se consideró oportuno investigar en mayor profundidad el efecto de este factor. Para ello, se llevaron a cabo diversas pruebas estadísticas así como representaciones con los datos experimentales.

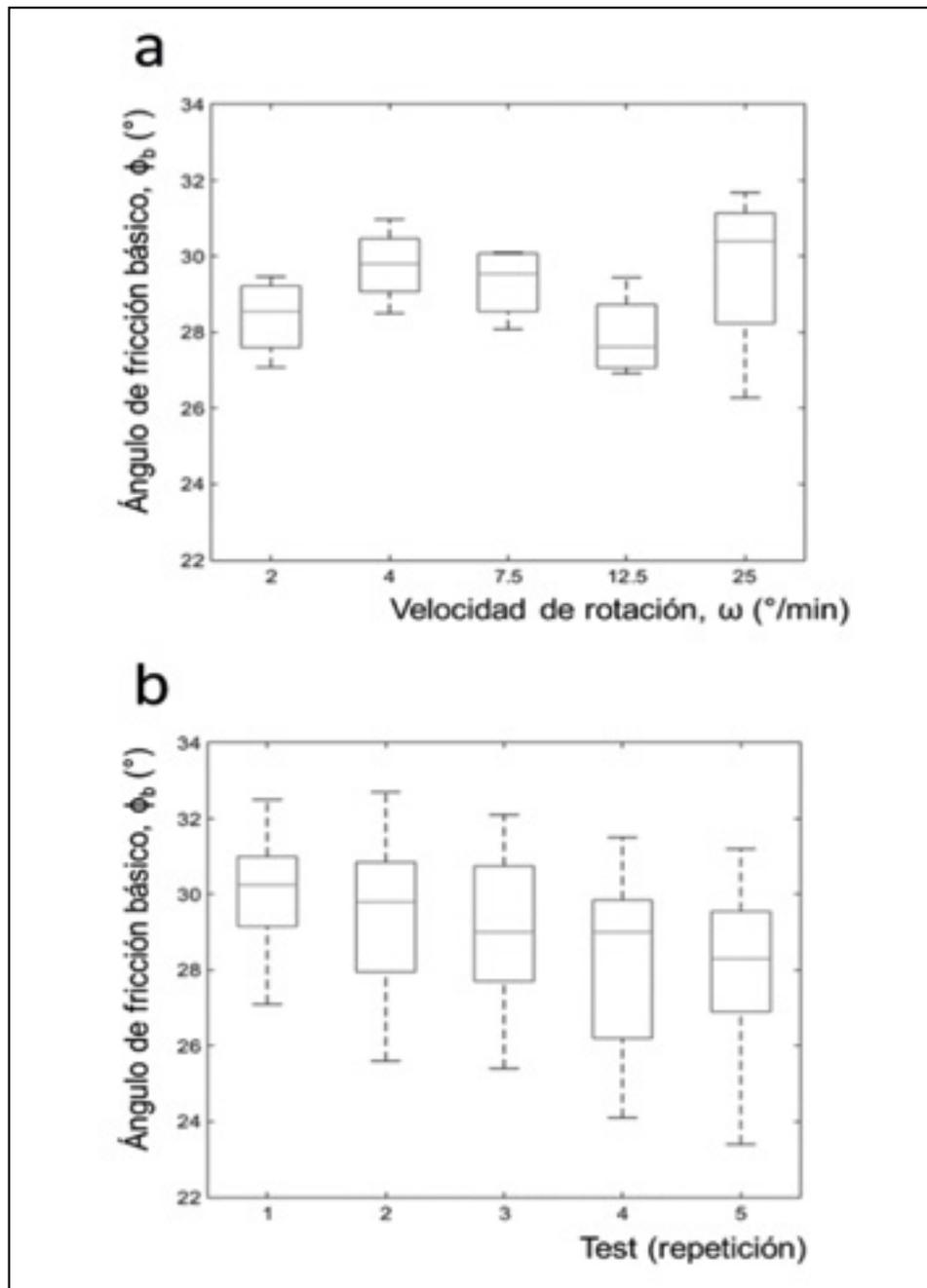
##### 4.1. Diagramas de caja o box-plots

Los resultados se representaron, primeramente, con la ayuda de *Matlab* mediante diagramas de caja o *box-plots* (figura 9). Este tipo de representaciones ofrecen información relativa a la variabilidad y distribución de datos de

una manera clara y resumida. Incluyen parámetros descriptivos como la mediana, los percentiles 25% y 50% así como los valores máximos y mínimos no considerados *outliers*.

Los diagramas de caja también ofrecen una idea general de la «normalidad» de la distribución, de manera que, para una distribución normal, los valores extremos, los percentiles y la mediana se presentarían equiespaciados.

Como se puede observar en la figura 9a, los datos experimentales no siguen una tendencia clara cuando se representan frente a la velocidad de rotación de la mesa de ensayos; este hecho es indicativo de que los resultados de los ángulos de fricción básico no dependen de la velocidad de ensayo, como se había estudiado en el apartado 3.2.



**Figura 9.** Diagramas de caja mostrando los ángulos de fricción básicos frente a la velocidad angular de la mesa de inclinación (a) y frente a la repetición o ensayo realizado (b).

Sin embargo, a la hora de analizar la representación de los ángulos de fricción frente a cada repetición correspondiente (figura 9b), se observa una tendencia descendente que está claramente asociada al desgaste de la superficie.

#### 4.2. Análisis de la varianza o ANOVA

Un test estadístico apropiado para el análisis de la influencia de la velocidad en la estimación del ángulo de fricción básico es el análisis de la varianza o ANOVA. El test genera como salida un *valor-p* —obtenido después de aplicar el análisis ANOVA a un conjunto de datos— que, en caso de ser mayor que un valor crítico predefinido  $\alpha = 0,05$  (el nivel de significación) asegura la existencia de la hipótesis nula. La existencia de la hipótesis nula implica que los datos analizados pertenecen a la misma población, es decir, pueden ser comparables entre sí.

Una vez aplicado este análisis a los datos experimentales mostrados en la tabla 1, el test genera un *valor-p* = 0,05, que no permite asegurar que éstos pertenezcan a la misma población aunque tampoco demuestra que no sea de esta manera.

Considerando la relevancia que presenta el efecto del desgaste en los resultados de los ángulos de fricción obtenidos experimentalmente, además de la propia variabilidad natural del ángulo de fricción básico, se consideró estudiar los valores promedio de las distintas series de velocidades, con la intención de reducir algo la dispersión. La prueba ANOVA volvió a aplicarse al conjunto de datos medios, siendo esta vez el *valor-p* = 0,289, lo que asegura con un nivel estadístico suficientemente riguroso que los datos pertenecen a la misma población, es decir, que no se ven afectados por las distintas velocidades de rotación de la plataforma.

### 4.3. Interpretación de los resultados tras descartar el efecto del desgaste

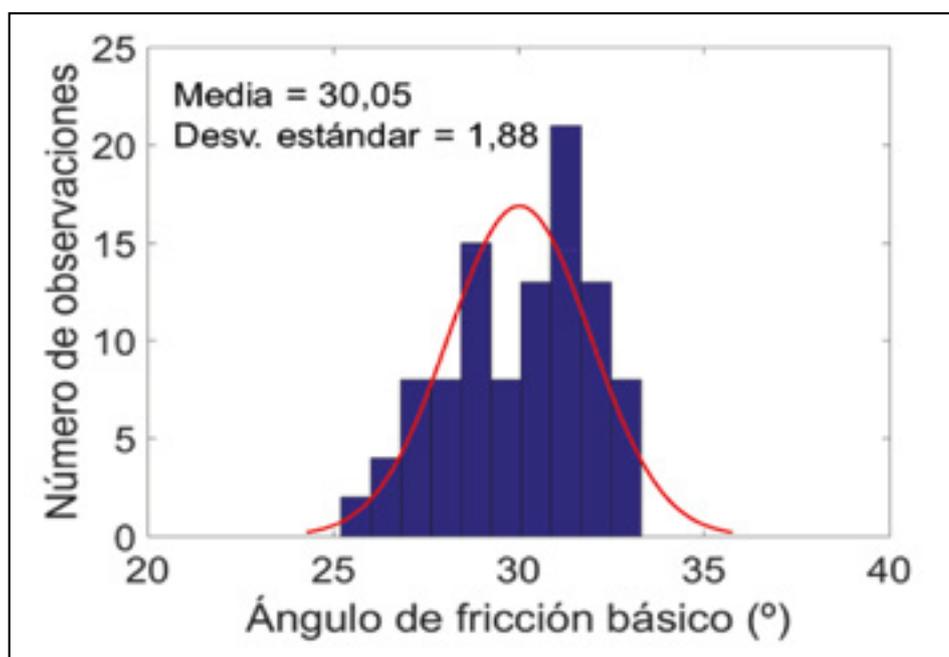
Con la intención de descartar el efecto indeseado del desgaste en la estimación de los ángulos de fricción básicos mostrados en la tabla 1., ésta se ha reestructurado mediante la eliminación de dicho efecto; para ello, se han utilizado los ajustes lineales de cada serie de datos representada frente a las repeticiones y, con las pendientes obtenidas en cada, se han corregido los valores en función de cada repetición. El nuevo conjunto de datos se presenta en la tabla 2.

La figura 10 muestra un histograma de frecuencias así como el valor promedio y la desviación estándar correspondiente al conjunto de datos una vez descartado el efecto del desgaste. El valor promedio de los resultados es  $30,05^\circ$  y la desviación estándar de  $1,88^\circ$  que, en comparación con las correspondientes para el conjunto de datos sin procesar ( $29,02^\circ$  para la media y  $2,02^\circ$  para la desviación estándar), es algo mayor para el caso de la primera (se ha descartado el efecto del desgaste, que reduce los valores angulares) y menor para la desviación estándar (se ha reducido la dispersión).

Se ha de destacar también que la desviación estándar es incluso menor que aquéllas correspondientes a otros parámetros geomecánicos, como son la resistencia a la compresión uniaxial o el módulo de elasticidad de rocas ensayadas en laboratorio.

**Tabla 2.** Ángulos de fricción básicos obtenidos para las diferentes velocidades indicadas descartando el efecto del desgaste

Series	$\omega$ (°/min)	Repeticiones				
		$\phi_{b1}$ (°)	$\phi_{b2}^*$ (°)	$\phi_{b3}^*$ (°)	$\phi_{b4}^*$ (°)	$\phi_{b5}^*$ (°)
TR-1	25	32,5	31,4	31,2	31,4	29,7
TR-2	25	29,0	26,8	26,4	26,9	27,5
TR-3	25	31,3	33,2	32,7	33,1	33,3
TR-4	25	30,9	31,6	31,7	32,4	31,6
TR-5	12,5	29,2	29,7	32,0	30,5	31,0
TR-6	12,5	27,5	27,3	28,3	27,0	31,2
TR-7	12,5	27,1	27,7	27,4	28,3	29,3
TR-8	12,5	29,1	31,8	28,5	27,7	28,2
TR-9	7,5	30,7	31,3	30,4	31,6	31,7
TR-10	7,5	29,2	29,9	28,6	27,2	30,7
TR-11	7,5	32,2	30,1	31,7	31,4	30,1
TR-12	7,5	29,3	28,5	28,9	30,7	32,9
TR-13	4	31,1	32,7	32,0	32,0	32,3
TR-14	4	30,6	31,1	29,0	28,3	28,7
TR-15	4	28,9	29,2	31,8	31,2	32,3
TR-16	4	30,1	30,8	31,7	31,4	31,0
TR-17	2	32,2	30,5	29,6	31,5	28,7
TR-18	2	30,9	28,4	28,8	27,9	29,8
TR-19	2	30,2	26,1	33,1	25,7	25,5
TR-20	2	30,3	31,2	26,5	29,2	29,9



**Figura 10.** Histograma de frecuencias y distribución normal obtenida para los resultados experimentales corregidos en cuanto al desgaste. Se indica media y desviación típica.

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha llevado a cabo un programa experimental para evaluar el efecto del desgaste y la posible influencia de la velocidad angular de la mesa de ensayos en la estimación del ángulo de fricción básico.

De acuerdo a estudios previos, se ha observado que el desgaste de las superficies, como consecuencia de sucesivas repeticiones de los ensayos, juega un papel relevante que se debe tener en cuenta a la hora de analizar resultados de *tilt tests* en juntas de roca.

Mediante una interpretación estadísticamente rigurosa de los resultados se llega a la conclusión de que la velocidad de rotación de la mesa de ensayos no afecta significativamente a los resultados del ángulo de fricción básico, al menos en el rango de velocidades de 2 a 25°/min.

Es pertinente remarcar que, una vez se descarta el efecto del desgaste, los resultados obtenidos se ajustan razonablemente bien a una distribución normal y presentan una desviación estándar en línea con aquéllas observadas para otros parámetros geomecánicos, como la resistencia a compresión simple o el módulo de elasticidad.

Se plantea una investigación más pormenorizada del efecto del procedimiento de corte, incluyendo los tipos de sierra utilizados en la preparación de las muestras. Estos estudios pueden ser útiles a la hora de proporcionar una metodología conveniente para ensayar y estimar el ángulo de fricción básico de juntas en roca.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación parcial de este estudio mediante el Proyecto con Referencia N° BIA2014-53368P. Este contrato está parcialmente financiado mediante fondos FEDER de la Unión Europea.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Alejano, L.R., González, J., y Muralha, J. (2012). Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment. *Rock Mechanics & Rock Engineering* 45(6): pp. 1023-1035.

Barton, N., y Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 10(1): pp. 1-54.

Bruce, I.G., Cruden, D.M., y Eaton, T.M. (1989). Use of a tilting table to determine the basic friction angle of hard rock samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(3): pp. 474-479.

González, J., González-Pastoriza, N., Castro, U., Alejano, L.R., y Muralha, J. (2014). Considerations on the laboratory estimate of the basic friction angle of rock joints. *Proc. EUROCK 2014, ISRM European Regional Symposium, Vigo, 26-28 May 2014*. Rotterdam: Balkema.

Pérez-Rey, I., Alejano, L.R., González-Pastoriza, N., González, J., y Arzúa, J. (2015). Effect of time and wear on the basic friction angle of rock discontinuities. *Proc. ISRM European Regional Symposium EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, 7-9 October 2015*: 1115-1120. Salzburg: OGG.

Ruiz, J., y Li, C.C. (2014). Measurement of the basic friction angle of rock by three different tilt test methods. *Proc. EUROCK 2014, ISRM European Regional Symposium, Vigo, 26-28 May 2014*: 261-266. Rotterdam: Balkema.

USBR (2009). Procedure for determining the angle of basic friction (static) using a tilting table test (Designation USBR 6258-09). Disponible en <http://www.usbr.gov/>