

# Modelado en Mecánica de Rocas utilizando Discontinuous Deformation Analysis (DDA)

Juan Pablo Ibañez<sup>(1)</sup>

(1) Área Geotecnia, Instituto IMERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo  
Juan.pablo.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

## Resumen

En este trabajo se presenta el modelador para Mecánica de Rocas denominado DDA (Discontinuous Deformation Analysis). Se trata de una herramienta avanzada de modelado numérico basada en la mecánica de los medios discontinuos o discretos. Propuesto inicialmente en la década de 1980, ha sido difundido ampliamente, siendo usado y optimizado por diferentes grupos de investigación a nivel mundial. Este modelador fue incorporado al Área Geotecnia del Instituto IMERIS luego de un proyecto de investigación y desarrollo conjunto realizado con investigadores del Departamento de Geología y Medio Ambiente de la Universidad Ben Gurión del Neguev, Israel. DDA fue concebido para el análisis *forward* de deformaciones en medios discontinuos, incluyendo explícitamente en el modelado las características geométricas y mecánicas del macizo rocoso. Consta de cuatro módulos de cálculo: procesador geométrico, procesador topológico, procesador de cálculo y procesador de resultados. El desarrollo del presente trabajo incluye una breve descripción del modelador DDA, detallando sus principales hipótesis y características, así como su flujo de trabajo. A continuación, se presenta una nueva ley de fricción con degradación por deslizamiento, como resultado del proyecto de investigación conjunto antes mencionado. Finalmente, para ejemplificar la capacidad de modelado de DDA, se presenta un retro análisis del deslizamiento histórico de Vaiont, en Italia.

**Palabras-clave:** Rocas, modelo discreto, fricción, taludes, DDA.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las rocas son inherentemente materiales discontinuos. En la escala del macizo rocoso abundan los planos de discontinuidad que se agrupan en familias y confieren una estructura discreta al mismo. Por esto, modelar la deformación de macizos rocosos mediante modelos continuos puede simplificar groseramente el problema o llevar a resultados erróneos, especialmente en macizos donde las discontinuidades controlan el comportamiento mecánico. En macizos extremadamente sanos o extremadamente fragmentados el análisis continuo puede ser una buena aproximación. En el resto de los casos, un modelado adecuado requiere el reconocimiento de las regiones de discontinuidad. En este contexto surge el método Discontinuous Deformation Analysis (DDA). DDA es un modelador para análisis discreto de sistemas de bloques deformables en dos dimensiones. Basado en el concepto de elemento de junta propuesto por Goodman et al. (1968), e implementado originalmente por Shi y Goodman (1984,1985), DDA ha sido optimizado y ampliamente utilizado por diversos autores. Hatzor et al. (2017) presentan una detallada descripción de DDA, incluyendo su origen, desarrollo y diversas aplicaciones.

## 2. DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS (DDA)

### 2.1. Características de DDA

DDA fue concebido para el análisis *forward* de deformaciones en medios discontinuos. Para esto incluye explícitamente las características geométricas y mecánicas del macizo rocoso mediante una malla de bloques asociada al dominio, definiendo sus parámetros mecánicos.

El flujo de trabajo en DDA se estructura en cuatro módulos secuenciales de cálculo:

- DDA LINES (DL): Procesador geométrico de discontinuidades. Permite definir fracturas, fallas y familias de diaclasas, túneles, excavaciones, así como su dominio espacial. Los parámetros pueden usarse de forma determinística o estadística.
- DDA CUT (DC): Procesador topológico de bloques. Genera el sistema de bloques a partir de la geometría definida por las discontinuidades.
- DDA FORWARD (DF): Procesador de cálculo. Se definen los parámetros para el análisis, que puede ser estático o dinámico, así como los parámetros mecánicos del dominio. El sistema de ecuaciones se resuelve mediante método directo o iterativo (sobre relajación).
- DDA GRAPH (DG): Procesador de resultados. Genera gráficos y archivos para impresión.

## 2.2. Hipótesis básicas de DDA

DDA está orientado al análisis estático y dinámico de sistemas de bloques para grandes deformaciones y desplazamientos. Algunas características importantes son:

- Como se asume la hipótesis de desplazamientos infinitesimales para cada paso de tiempo, se establecen pequeños pasos de tiempo para obtener deformaciones y desplazamientos razonablemente pequeños. Grandes desplazamientos se obtienen por la aplicación de sucesivos pasos de tiempo.
- En el caso de análisis estático, las velocidades en los bloques son igualadas a cero a cada nuevo paso de tiempo, lo que no sucede en el cálculo dinámico.
- Se asume deformación constante para el interior de los bloques.
- La resistencia en las discontinuidades obedece la ley de Coulomb.

## 3. PROCEDIMIENTO DE CALCULO EN DDA

### 3.1. Módulo DL

En este procesador se generan las líneas que representan las discontinuidades, bloques de una dada geometría, los límites de dominio del problema y los contornos de túneles o excavaciones. Las discontinuidades son definidas por familias, sobre las cuales se aplica variación estadística. Para cada familia se necesita definir:

- Rumbo y buzamiento;
- Espaciamiento, persistencia y puentes de roca promedio;
- Coeficiente de aleatoriedad;

Las líneas que forman el contorno del modelo y los contornos de obras como túneles, anclajes y excavaciones se definen separadamente. Con toda esta información geométrica se genera el dominio del macizo, que sirve de input al próximo módulo DC.

### 3.2. Módulo DC

En este procesador topológico se realiza el reconocimiento de regiones cerradas para formar los bloques que serán las unidades discretas del macizo. Los segmentos que no forman bloques y quedan “suelos” son eliminados del modelo. Los bloques son identificados, sus vértices numerados y áreas computadas. En efecto funciona como un generador de mallas. El archivo de salida contiene la información de:

- Bloques con o sin restricciones y anclajes;
- Puntos fijos y puntos con desplazamiento controlado;
- Puntos correspondientes a vacíos (túneles o excavaciones);

### 3.3. Módulo DF

En este procesador de cálculo estático o dinámico se especifica la información mecánica:

- Parámetros de cálculo (tipo de cálculo, paso de tiempo, rigidez de contacto, etc)
- Parámetros de bloques (densidad, módulo de elasticidad, módulo de Poisson)
- Parámetros de las discontinuidades (cohesión, fricción, tracción);
- Cargas puntuales y fuerzas de masa (incluye cargas o desplazamientos dinámicas);
- Tensiones y velocidades iniciales;
- Anclajes y excavaciones durante el tiempo de análisis;

Para cada paso de desplazamiento los contactos entre bloques son recalculados, y la información es guardada en una matriz de contactos. También son utilizadas matrices para las rigideces, cargas, masas, que son adicionadas a las matrices de fuerzas o coeficientes en la formulación general de equilibrio. Antes de cada paso de cálculo se incluyen resortes en cada contacto entre bloques. Si al final del paso existen resortes que se cargaron en tensión más allá del límite establecido, estos se retiran de la matriz y se repite el cálculo para ese paso. De igual forma, si en el paso de cálculo hubo superposición de bloques, se colocan resortes en tales contactos y se recalcula el paso. Los resultados un paso sirven de condición inicial para el próximo paso. Para el cálculo se puede utilizar un método directo o iterativo se sobre relajación.

### 3.4. Módulo DG

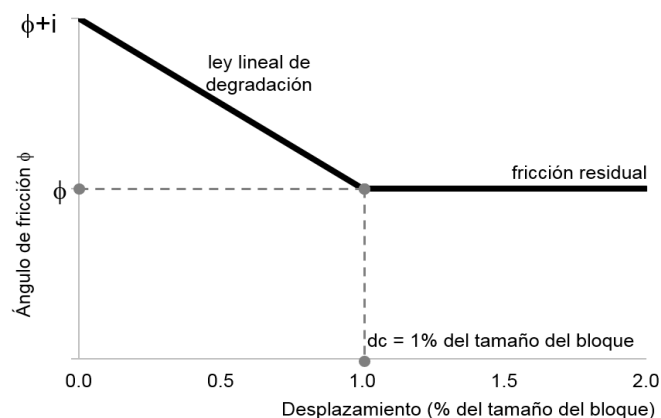
Recibe los resultados obtenidos en cada paso de cálculo y los expresa en gráficos. Grafica la posición deformada de los bloques, la dirección de sus tensiones principales, así como la trayectoria de puntos con cargas o elegidos para medir sus desplazamientos.

## 4. DEGRADACION DE LA FRICCION EN DDA

DDA utiliza un modelo de resistencia tipo Mohr-Coulomb para los contactos entre bloques, a partir de parámetros de cohesión y fricción. Patton (1966) propuso un modelo más avanzado modelar la resistencia al corte de discontinuidades inicialmente rugosas, dado por

$$\tau = \sigma \tan(\phi + i) \quad (1)$$

donde  $\tau$  es la tensión tangencial,  $\sigma$  la tensión normal,  $\phi$  el ángulo de fricción residual e  $i$  al ángulo de rugosidad. Davidesko et al. (2014) mostraron claramente que la fricción por rugosidad se degrada con el desplazamiento relativo. Resultados empíricos presentados por Barton y Choubey (1977) indican que la distancia necesaria para degradar la fricción por rugosidad es alrededor del 1% del tamaño del bloque que desliza. Basados en estas premisas fue implementada una ley de fricción con degradación lineal de la rugosidad en función del desplazamiento relativo en la discontinuidad (ver figura 1). Esta implementación permite obtener estimaciones más ajustadas en análisis de estabilidad y retro análisis de procesos de inestabilidad de macizos ya ocurridos.



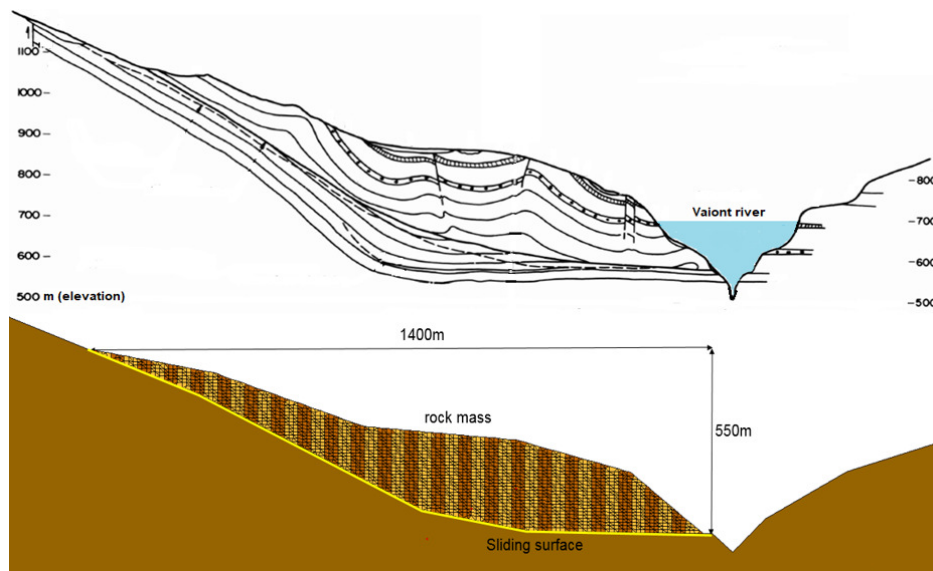
**Fig. 1 Ley de fricción bilineal con degradación (Ibañez y Hatzor, 2018).**

## 5. ESTUDIO DE CASO: DESLIZAMIENTO EN PRESA DE VAIONT

Como ejemplo de la capacidad de simulación de DDA se presenta brevemente un estudio de caso de un deslizamiento catastrófico del 9/10/1963 en la presa de Vaiont, norte de Italia, donde un talud de roca de hasta 250m de espesor falló, provocando un gigantesco rebalse del lago que impactó en las poblaciones aguas debajo de la presa, provocando alrededor de 2.000 muertos. El estudio se basó en el reporte detallado sobre la catástrofe de Hendron y Patton (1985), que informó que la distancia máxima fue de alrededor de los 500m con velocidades pico entre 20 y 25m/s.

La sección del talud de Vaiont se muestra en la figura 2, así como el modelo de bloques para retro análisis por DDA. Se incluyeron tres familias de discontinuidades (una sub vertical, una sub horizontal y otra acompañando la inclinación del talud) para representar el estado de fracturación del talud, con un tamaño medio de bloque de 8m. La fricción en la superficie de falla se estableció en  $12^\circ$  por presencia de arcillas, y en la masa rocosa se estableció en  $40^\circ$ .

Con estos parámetros, el deslizamiento alcanzó una distancia máxima cercana a los 300m, y velocidades pico de 10m/s. Por lo tanto, queda claro que fue necesaria una cierta degradación de la fricción para alcanzar las distancias y velocidades mapeadas en campo y retro analizadas por Hendron y Patton (1985). Esta degradación estaría asociada a pérdida de rugosidad y exceso de presión de poros por recalentamiento de la superficie de falla.



**Fig. 2** Sección del talud lateral de Vaiont antes del deslizamiento de 9/10/1963 (modificado de Hendron y Patton, 1985) y sección modelada en DDA (Ibañez y Hatzor, 2018).

Utilizando una degradación del 25% en la fricción de la base y de la masa de roca, se obtuvieron resultados que ajustaron las estimaciones, con una distancia máxima de 490m y velocidades pico de 22m/s (ver figura 3). También la deformación interna de la masa rocosa fue reproducida, incluyendo la formación de bandas de corte. Para más detalles ver Ibañez y Hatzor (2018).

## 6. CONCLUSIONES

El estudio de caso mostró la capacidad de modelado de DDA, al reproducir satisfactoriamente un proceso de inestabilidad en términos de distancias y velocidades, así como de deformación interna de la masa rocosa. Se trata de una potente herramienta que auxiliará los análisis mecánicos y de estabilidad a ser realizados por el Área Geotecnia del Instituto IMERIS en el estudio de la problemática andina regional.

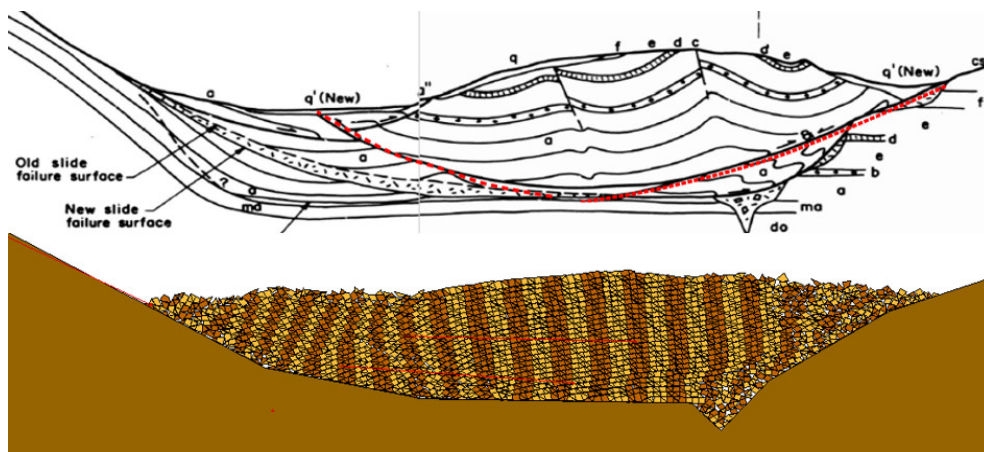


Fig. 3 Sección del talud lateral de Vaiont después del deslizamiento de 9/10/1963 (modificado de Hendron y Patton, 1985) y respuesta obtenida con DDA (Ibañez y Hatzor, 2018).

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo por el apoyo que posibilitó este proyecto de investigación post doctoral al otorgarme licencia por año sabático durante el año de 2017.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barton, N., Choubey, V., 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech 10, 1–54.

Davidenko, G., Sagy, A., Hatzor, Y.H., 2014. *Evolution of slip surface roughness through shear*. Geophys Res Lett 41, 1492-1498.

Goodman, R. E., Taylor, R. L., & Brekke, T. L. (1968). *A model for the mechanics of jointed rock*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94 (3), 637–659.

Hatzor, Y. H., (2017) *Discontinuous Deformation Analysis in Rock Mechanics Practice* (ISRM Book Series). CRC Press.

Hatzor, Y.H., Ma, G., Shi, G., (2017). *Discontinuous Deformation Analysis in Rock Mechanics Practice*. CRC Press, Feng, X.T.ISRM Book Series. The Netherlands

Ibañez, J.P., Hatzor, Y.H., (2018). *Proceeding of the 52th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. Seattle: ARMA.

Patton, F.D., 1966. *Multiple modes of shear failure in rock.*, Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech. ISRM, Lisbon, pp. 509-513.

Shi, G.H. & Goodman, R.E. (1984). *Discontinuous deformation analysis*. In: Proc. 25th U. S. Symposium on Rock Mechanics. pp. 269–277.

Shi, G. H. & Goodman, R. E. (1985). *Two dimensional discontinuous deformation analysis*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 9, 541–556.