

HACIA LA SIMULACION NUMERICA DE LA EXCITACION SISMICA A PARTIR DEL DESLIZAMIENTO DE UNO DE LOS LABIOS DE LA FALLA DE ORIGEN

*Graciela N. Doz y Jorge D. Riera
Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil*

RESUMEN

En este trabajo se presentan los lineamientos teóricos de un modelo computacional que permite determinar las vibraciones inducidas en un sólido por el deslizamiento del mismo a lo largo de un plano con fricción. El modelo en desarrollo es aplicable a la simulación de la excitación sísmica, a partir de un deslizamiento prescripto de uno de los labios de la falla.

El medio continuo es representado por un modelo discreto, con una frecuencia de corte alta. Se realiza un análisis dinámico, a través de un método explícito, con integración numérica con diferencias finitas centrales.

Las fuerzas dinámicas de fricción desarrolladas en la superficie de falla, son consideradas mediante un modelo clásico que simula el fenómeno de adherencia-desplazamiento (stick-slip).

Finalmente, se presentan resultados numéricos preliminares que muestran el potencial del modelo computacional empleado.

1. INTRODUCCION

El origen de los movimientos sísmicos es atribuido a un proceso de fallas, fracturas y/o movimientos relativos bruscos de grandes masas de rocas en relación a otras, producidos por un estado de tensiones internas que varía, en general, lentamente en el tiempo, presentando en cambio, alteraciones perceptibles después de cada evento sísmico. Es indudable entonces que progresos recientes en la comprensión del proceso de rotura de sólidos, por ejemplo propagación de fracturas y vibraciones inducidas por las mismas, pueden resultar de utilidad para explicar y eventualmente cuantificar diversos aspectos de la excitación sísmica, a partir de informaciones sobre el estado inicial del medio rocoso en que se produce el evento sísmico.

Fue inicialmente considerada la posibilidad de que ocurrieran fracturas en el denominado "modo II", esto es, inducidas por esfuerzos de corte, y que el proceso de propagación de dichas fisuras resulte en vibraciones que se propagan en el medio como ondas sísmicas. Sin embargo, un examen atento del problema sugiere que, en materiales con las características básicas de la roca cristalina, no existe fractura en el modo II. Así, por ejemplo, basados en los ensayos con modelos "single-notched" de hormigón (Fig. 1.1), Arrea e Ingraffea (1982) e Ingraffea y Gerstle (1985) concluyen que el hormigón fractura únicamente en modo I, aún cuando el factor de intensidad de tensiones correspondiente a modo II alcance un valor elevado. En 1987, Rots y de Borst realizan un análisis numérico de los modelos ensayados por Arrea e Ingraffea (1982) utilizando la discretización indicada en la Fig. 1.1. La fractura se propaga siguiendo una pequeña curva primero, y luego en dirección vertical (Fig. 1.2), que concuerda con los resultados experimentales. Más aún, el análisis revela que la energía correspondiente a modo I es liberada más rápidamente que la correspondiente a modo II, lo que indica que la fractura se propaga en modo I predominantemente.

Los modelos de Bazant y Pfeiffer (1986), semejantes a los anteriores, presentan un par de fisuras simétricas en lugar de una única. Las cargas verticales se aplican en puntos próximos a las fisuras, de modo de generar una pequeña zona con factor de intensidad de tensiones correspondiente a modo II muy alto. Bazant y Pfeiffer (1986) entienden que la rotura se debe esencialmente a fractura por corte (modo II). Sin embargo, estudios numéricos de Rots y de Borst (1987) indican que la fractura comienza a propagarse hacia los costados y luego continua en dirección vertical, resultado que coincide con el cuadro de fisuración obtenido experimentalmente.

Por otro lado, estudios de fractura en modo mixto de Kobayashi et al (1985) en modelos "double cantilever beam" y los de Jenq y Shah (1988) en modelos "three point bend" indican que la respuesta puede ser simulada adecuadamente usando modelos de "zona de proceso de fractura" (fracture process zone) para fractura en modo I únicamente, desde que la propagación acontece sólo en ese modo.

Parece existir entonces, una clara tendencia a aceptar que la fisura se propaga siempre en dirección perpendicular a la dirección de las tensiones de tracción. Desde este punto de vista, un modelo numérico de la fuente de excitación sísmica debe considerar deslizamiento de uno de los labios de la falla en relación al otro, no debiendo ser incluida la posibilidad de propagación de la fractura según un modo de corte. El fenómeno en consideración está relativamente poco estudiado y será discutido a seguir.

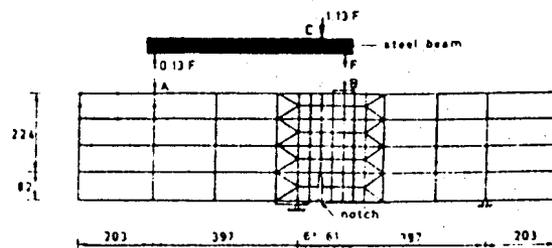


Fig. 1.1: Geometría del modelo "single-notched" y discretización empleada por Rots y de Borst (1987)

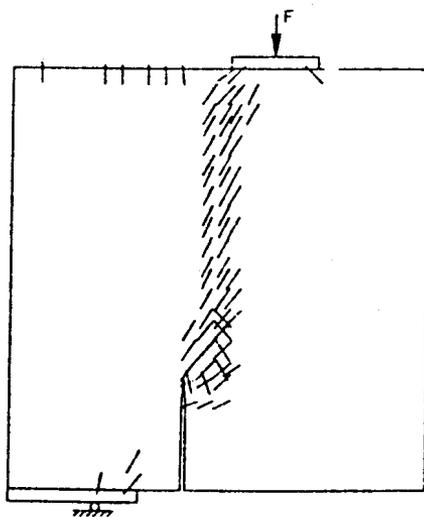


Fig. 1.2: Cuadro de fisuración correspondiente a la carga última

2. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL MECANISMO DE FRICCIÓN

La naturaleza de las fuerzas dinámicas de fricción desarrolladas entre cuerpos en contacto es extremadamente compleja y está afectada por un gran número de factores: constitución en la interface, tiempo y frecuencia del contacto, respuesta en la interface a fuerzas normales, efectos de inercia y térmicos, rugosidad de las superficies en contacto, historia de carga, humedad, presencia o ausencia de lubricantes, etc. En la rama de la ingeniería mecánica conocida como tribología, se reconoce la fricción como un mecanismo que envuelve adhesión, deformaciones elásticas y plásticas, así como arrancamiento de micro-asperezas, en proporciones variadas, dependiendo del tiempo, la historia de carga y la velocidad de corte. Esto es, la fricción dinámica no es un fenómeno simple, sino una colección de fenómenos mecánicos y químicos complejos interrelacionados, presentando hasta cuadros de comportamiento caótico.

Por fricción con deslizamiento dinámico se designa a una clase importante de problemas dinámicos que incluyen efectos como amortiguamiento, deslizamiento, movimiento de adherencia-desplazamiento (stick-slip), etc. La constitución del material de la interface es esencialmente estable, no hay penetración o deformación plástica normal de la interface y, al menos desde un punto de vista global, las fuerzas friccionales desarrolladas en la superficie de contacto aparecen como dependientes de la velocidad relativa de deslizamiento de una superficie con respecto a la otra.

Las leyes clásicas de fricción establecen que, al comienzo del deslizamiento, la fuerza de fricción es igual al producto del coeficiente de fricción estático y de la fuerza normal. Sin embargo, esta ley es válida únicamente en un sentido macroscópico, desde que antes que el deslizamiento macroscópico sea observado, aparecen algunos microdesplazamientos preliminares para niveles menores de la fuerza.

Cuando dos superficies en contacto deslizan una en relación a la otra, aparece una vibración intermitente, especialmente para bajas velocidades y permanente o pseudo-estacionaria, para velocidades elevadas. Este fenómeno se conoce vulgarmente como movimiento adherencia-desplazamiento (stick-slip). La frecuencia del movimiento de adherencia-deslizamiento crece con el aumento de velocidad y que el máximo valor de esa frecuencia se aproxima a la frecuencia fundamental del sistema.

Los primeros modelos propuestos para caracterizar este movimiento, se resumen en Fig. 2.1.

3. MODELO NUMERICO

El modelo empleado consiste en la modelización del continuo mediante un arreglo de barras de rigidez equivalente. La idea original proviene de Nayfeh e Hefzi (1978) que representaron paneles formados por módulos de barras espaciales, a través de un medio continuo equivalente.

La geometría del módulo cúbico está representada en Fig. 3.1. Utilizando un sistema de ejes cartesianos, paralelos a las aristas de los cubos, se distinguen barras normales y diagonales. Las rigideces de ellas son calculadas haciendo:

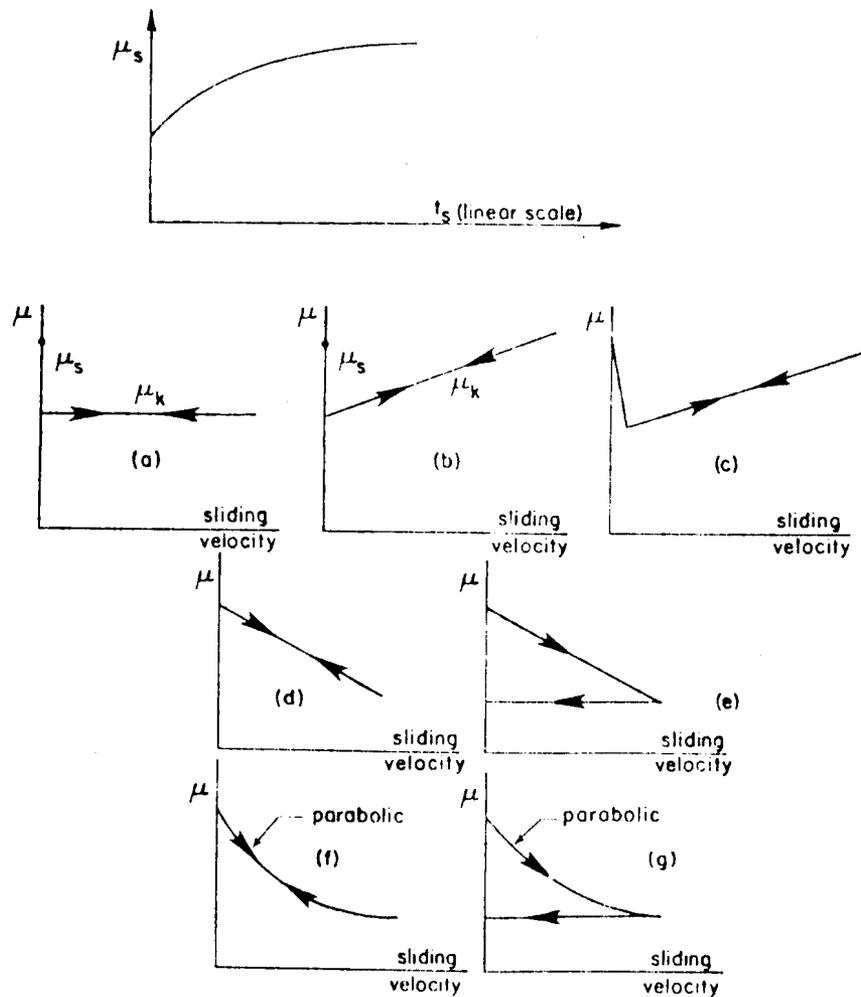


Fig. 2.1: Modelos para la variación de la fuerza friccional

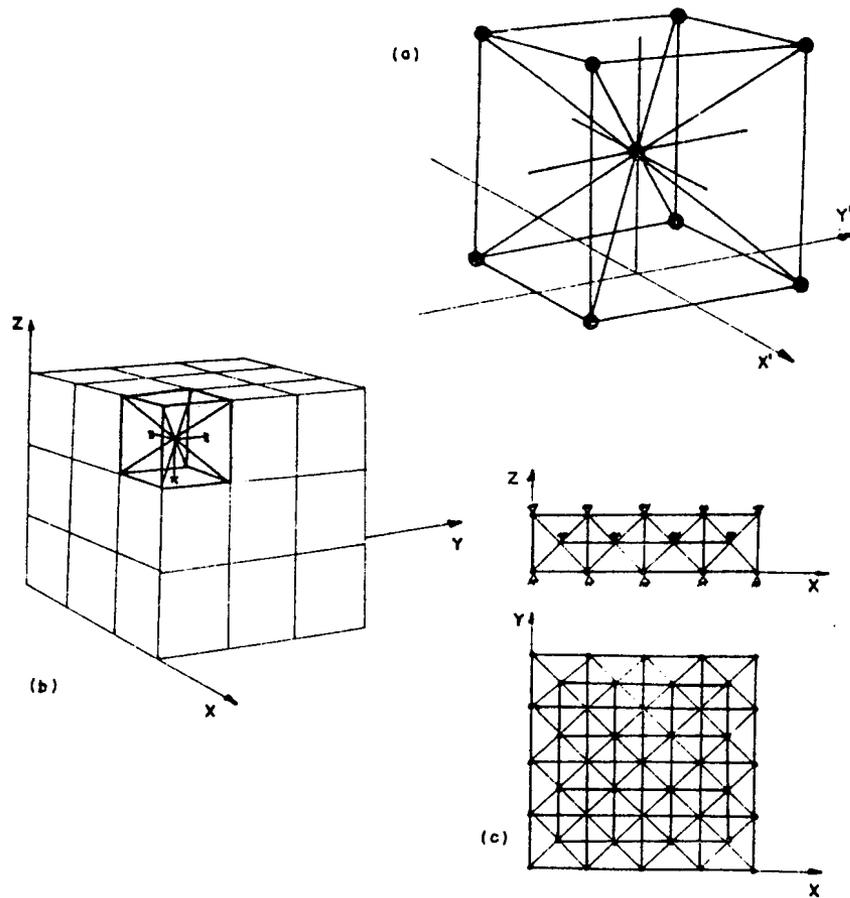


Fig. 3.1: a) Módulo cúbico para la construcción del modelo de barras
b) Composición de un prisma
c) Composición de una placa para estado plano de deformaciones
(desplazamientos en la dirección z impedidos)

* Barras normales de longitud L

$$E_n E_n = \alpha E L^2 \quad (1)$$

con:

$$\begin{aligned} E &: \text{módulo de elasticidad del material} \\ \alpha &= (9 + 8\delta) / (18 + 24\delta) \\ \delta &= 9\mu / (4 - 8\mu) \\ \mu &: \text{módulo de Poisson} \end{aligned}$$

* Barras diagonales de longitud $\sqrt{3}L/2$

$$E_d = 2\delta\alpha E L^2 / \sqrt{3} \quad (2)$$

Las masas se consideran concentradas en los puntos nodales.

Considerando la estructura así discretizada, se realiza un análisis dinámico a través de un método explícito, con integración numérica por diferencias finitas centrales. De esta forma, en cada paso de integración se debe resolver la ecuación de equilibrio dinámico

$$m\ddot{u} + c\dot{u} = f_i \quad (3)$$

donde:

m : masa nodal
 $c = D_f m$ cte de amortiguamiento viscoso proporcional a la masa m
 u_i : componentes de un vector de coordenadas nodales en relación a tres ejes de referencia
 f_i : componentes del vector de la resultante de fuerzas aplicadas por las barras que concurren a un nodo.

La ley constitutiva para los elementos es función de las características del material a modelar.

Las fuerzas dinámicas de fricción desarrolladas en la superficie de falla, son consideradas mediante un modelo clásico que simula el fenómeno de adherencia-desplazamiento (stick-slip).

El criterio de rotura establece que cuando el factor de intensidad de tensiones correspondiente a modo I alcanza un valor crítico, entonces acontece la propagación inestable.

4. SIMULACION DEL PROBLEMA

Inicialmente se considera un bloque de características físicas constantes, asentado sobre una superficie plana, sometido a tensiones de compresión resultantes del peso propio del bloque.

A partir de esta situación inicial se especifica un desplazamiento horizontal correspondiente a una velocidad en uno de los nodos del borde lateral que produce tensiones de corte en nodos situados a lo largo de la superficie de discontinuidad (etapa 1). Antes que las tensiones de corte superen las correspondientes resistencias por fricción y, consecuentemente, se produzca un desplazamiento de algún punto, el proceso de carga es suspendido.

La etapa siguiente consiste en permitir que las oscilaciones se amortiguen, de modo de estabilizar las tensiones de corte y de compresión.

Finalmente, en la última etapa se aplica nuevamente un desplazamiento horizontal en uno de los nodos del borde lateral, provocando un nuevo incremento de corte.

El proceso de carga, de naturaleza pseudo-estática, no produce aceleraciones perceptibles en el medio hasta que, en algún punto a lo largo de la base, la tensión de corte actuante supera la resistencia, produciéndose entonces un desplazamiento con la consiguiente liberación de energía en forma de ondas. La zona en que ocurre deslizamiento relativo define el área de ruptura resultando, como consecuencia del movimiento, una reducción en los esfuerzos de corte transmitidos por fricción a través de la "falla". Esta reducción, denominada usualmente caída de tensión (stress-drop) constituye uno de los parámetros más significativos en la determinación del mecanismo focal.

En la Fig. 4.1 está graficada la variación de las tensiones de corte en el tiempo para uno de los ejemplos analizados. Puede observarse nitidamente las caídas de tensión asociadas a cada "evento sísmico". Ya en la Fig. 4.2 se presentan aceleraciones registradas en un punto situado a 0.1m de la base durante el proceso de carga. Existe una relación lineal entre las caídas de tensión y las aceleraciones inducidas en el medio circundante.

El modelo descrito parece representar adecuadamente la excitación sísmica. Las variaciones en las tensiones de corte señaladas por Haskell (1964), y observadas experimentalmente por Brune et al (1993); aparecen nitidamente en cada evento sísmico.

CONCLUSIONES

Fue presentada una determinación numérica de las vibraciones inducidas y de la caída de tensión de corte promedio en la base del un bloque apoyado sobre una superficie rígida y sometido a cargas gravitacionales conjuntamente con desplazamiento horizontal de uno de los nodos. El mismo constituye un modelo que permite estudiar efectos ya observados en sismología y podrá ser de gran utilidad en la previsión de la excitación sísmica a partir de las propiedades focales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo parcial del CONICET (Argentina) y CNPq (Brasil).

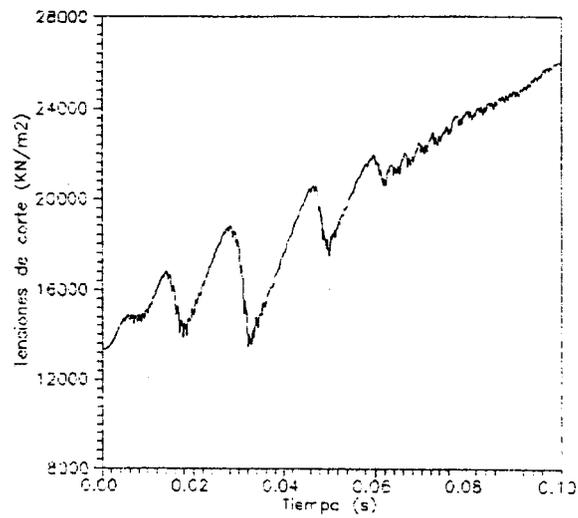


Fig. 4.1: Evolución de las tensiones de corte

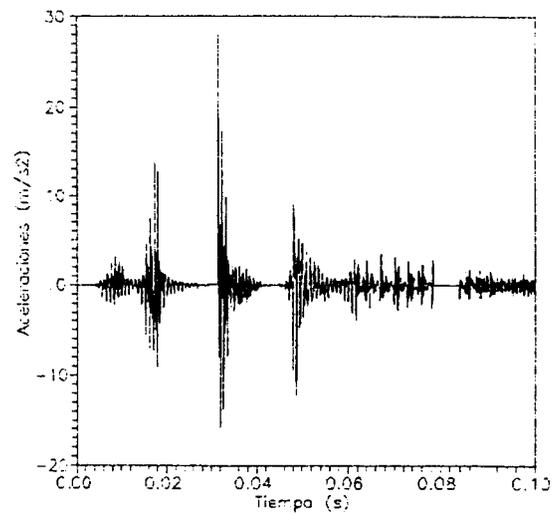


Fig. 4.2: Aceleraciones inducidas en el medio

REFERENCIAS

- Arrea, M., Ingraffea, A. R., 1982. Mixed-Mode Crack Propagation in Mortar and Concrete. Report No 81-13, Dept. of Struct. Engrg., Cornell Univ., Ithaca.
- Bazant, Z., Pfeiffer, P. A., 1986. Shear Fracture Tests of Concrete. *Materiaux et Constructions (RILEM)* 19:111-121.
- Brune, J., Brown, S., Johnson, P., 1993. Rupture Mechanism and Interface Separation in Foam Rubber Models of Earthquakes: a Possible Solution to the Heat Flow Paradox and the Paradox of Large Overthrusts. *Tectonophysics*, 218:59-67.
- Ingraffea, A. R., Gerstle, W., 1985 Nonlinear Fracture Models for Discrete Crack Propagation. Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites, S.P. Shah ed., Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 247-285.
- Jenq, Y. S., Shah, S. P., 1988. Mixed-Mode Fracture of Concrete. *International Journal of Fracture*, 38:123-142.
- Kobayashi, A. S. et al., 1985. Fracture Process Zones of Concrete. Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites, S.P. Shah, ed., Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 25-50.
- Pires, E., Oden, J., 1983. Analysis of Contact Problems With Friction Under Oscillating Loads. *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.* 39:337-362.
- Rots, J. G., de Borst, R., 1987. Analysis of Mixed-Mode Fracture in Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, V. 113, No 11.