

ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE EXPLOSIVOS SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA

Ignacio Iturrioz

PROMECA, Depto. De Engenharia Mecânica Escola de Engenharia de UFRGS, Porto Alegre, RS,
Brasil

e-mail: ignacio@mecanica.ufrgs.br

Jorge D. Riera

PPGEC, Depto. De Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

e-mail: riera@cpgec.ufrgs.br

RESÚMEN

En este trabajo se presentan simulaciones numéricas de la respuesta a cargas explosivas colocadas próximas a la superficie del suelo, comparando las mismas con observaciones experimentales disponibles en la literatura. Son estimadas las dimensiones del cráter y el tamaño de la región dañada utilizando el método de los elementos discretos (MED) para representar el suelo. Este método ya fué utilizado con suceso por los autores en estudios de fractura e impacto en cuerpos sólidos. La excitación actuante fué representada utilizando ecuaciones clásicas que permiten evaluar las presiones producidas por la explosión en forma aproximada. Se muestra que las predicciones numéricas son consistentes con las respuestas medidas y que el método propuesto puede ser utilizado en aplicaciones de Ingeniería.

ABSTRACT

In this paper, results of numerical evaluations of the response of the ground to explosive charges located above the surface are presented and compared with experimental observations. The crater dimensions and the size of the damaged volume are estimated using a so-called discrete element representation (DEM) of the medium, employed earlier by the authors in fracture and impact response studies, together with well known equations to define the blast pressures. It is shown that the predictions closely agree with measured response, and that the approach may therefore be used with confidence in engineering design.

INTRODUCCIÓN

El efecto de cargas explosivas debe ser considerado en el proyecto de estructuras de centrales nucleares y de otras instalaciones críticas. En las últimas dos décadas, el proyecto de estructuras contra ondas de presión o proyectiles resultantes de explosiones ha recibido considerable atención, siendo en algunos casos validado experimentalmente. El tópico central de este trabajo es presentar avances realizados en la simulación del comportamiento de un semi-espacio sometido a una carga explosiva sobre la superficie. La explosión puede formar cráteres, con consiguientes daños a tuberías, tanques y otras estructuras enterradas. Cargas dinámicas debidas a explosiones causan grandes deformaciones, con velocidades de deformación entre 10^{-1} to 10^{-3} s⁻¹, lo cual usualmente implica un

aumento de la resistencia y de la rigidez del material en comparación con valores estáticos de dichas propiedades. En el caso de suelos, la predicción de la respuesta, así como el mecanismo de formación del cráter, son más complejos todavía, debido a la inherente no-linearidad y no-homogeneidad de los mismos. Para poder resolver este problema, es necesario introducir importantes en la formulación del problema. En este contexto, se encuentran en la bibliografía soluciones empíricas, condensadas en ecuaciones, tablas y gráficos, como ilustran por ejemplo Baker *et al*, [2] y Smith & Hetherington, [10]. Existe considerable información sobre el efecto de cargas enterradas o a nivel del terreno, pero casi ningún dato en la literatura abierta sobre el efecto de cargas explosivas situadas a alguna distancia sobre la superficie del suelo. Aún así, a pesar de la abundante evidencia experimental sobre la respuesta de suelos y rocas a diferentes tipos y masas de cargas explosivas (Persson *et al* [6]), el mecanismo de formación del cráter es complejo y las incertezas en la definición de las propiedades físicas y geométricas del medio son grandes, dificultando la predicción de la misma. Pueden entonces esperarse variaciones de las dimensiones de los cráteres, producidos por cargas en condiciones nominalmente idénticas, de alrededor de 10%, no siendo raras diferencias del orden de 30% o 40% (Bull *et al*, [3]). Estudios experimentales recientes son relatados por Ambrosini *et al* [1].

Las leyes de escala establecen que cualquier dimension lineal L del cráter puede expresarse como una constante multiplicada por $W^{1/3}$, en la cual W denota la masa del explosivo(TNT o TNT equivalente), en kg. Se forma una cavidad siempre que una explosión es confinada dentro de la masa del suelo. Si la carga explosiva está *sobre* la superficie, a una distancia pequeña de la misma, se forma un cráter. Las dos variables principales son en este caso la masa W y la distancia d del explosivo a la superficie del suelo, considerando la misma negativa cuando la carga está localizada sobre la superficie, y positiva en el caso de explosiones subterráneas. Para $d > 0$, la formación del cráter es influenciada por la gravedad, ya que cuando la profundidad de la detonación aumenta, gran cantidad de subsuelo debe ser expelido por la explosión, el radio del cráter y su profundidad aumentan con d , hasta que un límite es alcanzado, a partir del cual tanto el radio como la profundidad decrecen rápidamente. Definiendo:

$$\eta = d / W^{1/3} \quad (1)$$

se observa el mayor cráter cuando $1.0 < \eta < 1.5$, mientras en el rango $-0.5 < \eta < 2.0$, resulta un cráter de forma convencional {Bull *et al* [3]}. Baker *et al* [2] presentan un estudio dimensional para explosiones debajo del suelo. Como se indicó anteriormente, existe poca información sobre la acción de cargas *encima* de la superficie del suelo. En contrapartida, estudios de regresión sobre datos de cerca de 200 explosiones *superficiales* son presentadas por Kinney y Graham [5], que sugieren la siguiente expresión para el diámetro del cráter:

$$D / W^{1/3} = 0.8 \quad (2)$$

Análisis numéricos del problema utilizando sistemas comerciales de elementos finitos tales como LSDYNA (2000) o ABAQUS (1997), presentan ciertas limitaciones en la simulación de fracturas y fragmentación del medio modelado. Por el contrario, el método de los elementos discretos (DEM) se presenta como una alternativa atractiva para resolver este tipo de problema, permitiendo considerar la fractura y fragmentación sin dificultad. Esta metodología, previamente empleada por Riera & Iturrioz [7] para determinar la respuesta de cáscaras elasto-plásticas sometidas a cargas explosivas y en el estudio de la fractura en estructuras de hormigón sometidas a impacto [8], será descrita en detalle en el presente trabajo.

EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS: PROPIEDADES Y APLICACIONES

Este método computacional se basa en la representación del continuo mediante un arreglo de masas nodales interconectadas por elementos unidimensionales sin masa. El arreglo cúbico de la figura 1

muestra una célula con ocho nodos en sus vértices, más uno en el centro. Cada nodo posee tres grados de libertad. Las masas son unidas por elementos longitudinales y diagonales de longitud L_c y $\sqrt{3}/2 L_c$, respectivamente. La equivalencia entre un sólido ortotrópico elástico con los ejes principales del material orientados en la dirección de sus elementos longitudinales y el arreglo cúbico, fué verificada por Riera & Iturrioz, [7], [8], dentro del marco de la elasticidad lineal. Apenas la restricción $\nu = 0.25$ debe ser impuesta sobre el valor del coeficiente de Poisson para que la equivalencia sea perfecta. Para otros valores de ν aparecen pequeños errores en los términos de corte. La ecuación de movimiento de un sistema de N grados de libertad queda:

$$M\ddot{\bar{u}} + \bar{f}(t) = \bar{Q}(t) \quad (4)$$

En la cual M denota la matriz de masa (diagonal), \bar{u} el vector de coordenadas generalizadas, esto es, de desplazamientos nodales, $f(t)$ es el vector de fuerzas nodales internas, las cuales pueden depender de desplazamientos presentes y de pasos anteriores, y $Q(t)$ el vector de fuerzas externas. En sistemas lineales, $f(t) = Ku$, siendo K la matriz de rigidez. En sistemas con fuerzas viscosas, $f(t) = Ku + C\dot{u}$, considerando C proporcional a la matriz de masa, el sistema (4) puede ser integrado numéricamente en el dominio del tiempo utilizando un esquema de integración explícita (método de diferencias finitas centrales). Por ser las coordenadas nodales actualizadas en cada intervalo de tiempo, este método permite considerar grandes desplazamientos en forma natural, o sea considerar problemas con no linealidad geométrica. La convergencia de las soluciones en elasticidad lineal, así como en problemas de inestabilidad, fué verificada por los autores. Más recientemente, Rocha y Riera [9], extendieron el método para realizar análisis de fractura en materiales frágiles, tales como hormigón y suelos cohesivos. La relación entre tensión y deformación, o fuerza y desplazamiento, del material es supuesta bilineal, como se muestra en la figura 2. La deformación límite ϵ_t es elegida para satisfacer la condición que cuando el material rompe una fisura abre y disipa una determinada cantidad de energía. Esta energía es igual al producto del área de ruptura, la cual está referida al módulo L_c por la tasa de energía superficial G_f , que es propiedad del material. Las propiedades del material pueden ser modeladas como campos aleatorios, lo que implica que las mismas pueden variar de elemento a elemento siguiendo alguna ley estadística establecida.

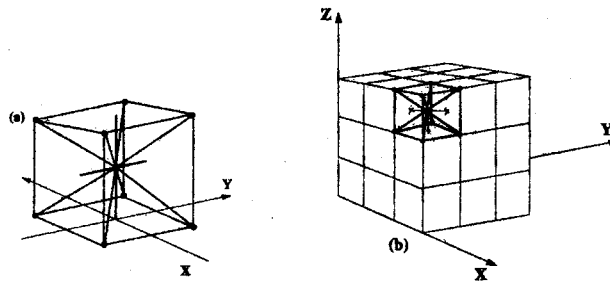


Figura 1: Arreglo Cúbico (a): El modulo básico, (b) composición de prismas.

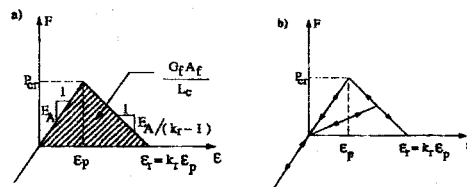


Figura 2: Ley constitutiva bilineal para materiales frágil

CARGA EXPLOSIVA SOBRE UN SEMIESPACIO HOMOGÉNEO

Presiones inducidas por una carga explosiva

La evolución de las presiones de la onda explosiva en el caso de explosiones en aire han sido extensivamente estudiadas y pueden ser descriptas con razonable confianza (Kinney & Graham [5]). Admitiendo una carga puntual de TNT de masa W (o masa equivalente de TNT) y designando r a la distancia desde desde la misma a cualquier localización, la distancia reducida z se define como:

$$z = r/W^{1/3} \quad (5)$$

la variación de la presión con el tiempo en el punto en estudio es dada por la expresión

$$P = p_s (1 - t/t_d) \exp(-\alpha t/t_d) \quad (6)$$

En la cual p_s es la presión de pico en el punto de interés, t es el tiempo medido desde el instante en que la onda de presión alcanza el punto de interés, y t_d es la duración del impulso, aproximadamente triangular de la presión. El parametro de forma α en la ecuación (6) puede ser considerado como un factor que permite regular el impulso entregado al sistema por la explosión. La Figure 3 muestra una curva típica de variación de la presión con el tiempo. Los tres parametros p_s , t_d y α dependen de z , y pueden ser encontrados, por ejemplo, en tablas (Kinney & Graham, [5])

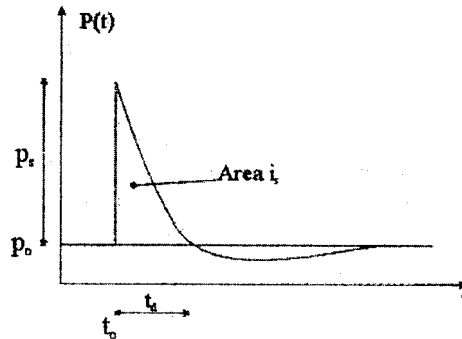


Figura 3: Curva típica presión-tiempo para una onda debida a una explosión.

Finalmente la velocidad de la onda explosiva c_s es dada por la siguiente expresión :

$$c_s = c_0 M(z) \quad (8)$$

en la cual c_0 es la velocidad de propagación del sonido en el aire, siendo M el número de Mach. La variación de M com z puede ser encontrada también en Kinney y Graham [5]. Pero cuando la onda de presión encuentra un obstáculo, es reflejada produciendo una presión neta que dependerá de la geometría del problema. Para simplificar el análisis, considerando la gran cantidad de de incertezas existentes en la definición de la excitación, fué admitido que la presión sobre el terreno es dos veces la dada por la ecuación (7) y que actúa siempre en dirección normal a la superficie en consideración.

Modelo discreto del semiespacio

Fué utilizado el método de los elementos discretos (MED), descrito en la sección anterior, para modelar una región del semiespacio. Se considera la doble simetría del problema, lo cual reduce

considerablemente el esfuerzo numérico. De esta forma fué discretizada la región comprendida entre los planos $x=0$ y $x=3m$, $y=0$ y $y=3m$, $z=0$ y $z=3m$. Como el objetivo es modelar un semiespacio, fueron introducidas condiciones de contorno absorbentes, que permiten simular la continuación del semiespacio en los planos $x=y=3m$ (Dalguer [11]). El tamaño del elemento fué tomado igual a $0.1m$, lo cual implica en restringir la masa del menor pedazo de suelo expelido a $10^{-3} m^3$. Este tamaño es demasiado grande, como fué observado en estudios experimentales (Ambrosini 'et al', [1]), donde masas de $0.01 m$ de diámetro fueron encontradas alrededor de $100 m$ del foco de la explosión, sin contar las partículas finas localizadas a una distancia de $0.50m$ and $1.00m$ del centro de la explosión. El modelo analizado contiene 27000 modulos, 60000 barras y 150000 grados de libertad. Como consecuencia de lo antes señalado, cualquier reducción del tamaño L_e del elemento implicaría un aumento considerable del esfuerzo computacioanl, lo cual no era viable en este momento.

En la figura 4a se presenta un esquema del modelo y la posición de la carga, mientras en figura 4b se muestran, esquemáticamente, los parámetros que definen la forma y tamaño del cráter.

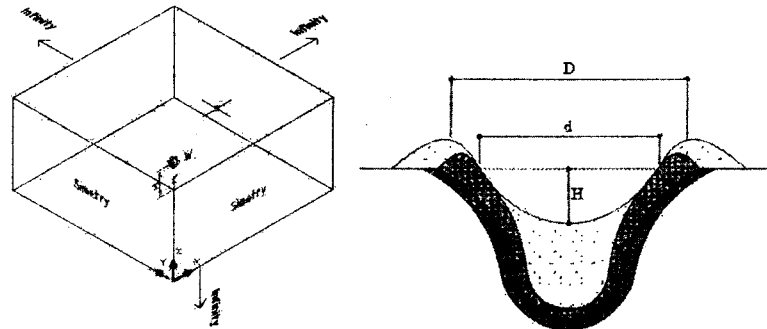


Figura 4: a) Esquema del cuadrante discretizado b) Dimensiones del cráter en el semiespacio

El suelo, una arcilla dura con arena y limo, fué caracterizada con los siguientes parámetros: la densidad $\rho_o = 1400 kg/m^3$, el ángulo de fricción interna $\phi=25^\circ$, la cohesión $c=0.036Mpa$. Las propiedades del material necesarias para el análisis numérico son inferidas de los valores antes citados, resultando los siguientes parámetros: Energía específica de fractura $G_f = 25N/m$, deformación crítica $\epsilon_p = 6.6 \times 10^{-4}$ y módulo de Young en el origen $E=188.0E06 N/m^2$. La ecuación constitutiva para los elementos es definida por la ecuación

$$F_i = \epsilon(EA) \quad (9)$$

representada en Fig. 2, donde A es el área de la sección y ϵ la deformación axial de los elementos.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTALES

En ensayos realizados por Ambrosini *et al* [1], las cargas explosivas fueron colocadas en el aire a varias distancias de la superficie del terreno. El efecto de la onda expansiva sobre el suelo fué numéricamente determinado utilizando los modelos discutidos previamente. En la figura 5 se presentan las configuraciones finales de varias simulaciones numéricas, mostrándose la distribución de daño en el instante $t=97.6 ms$ después de la explosión. Masas nodales debajo de $z= 3.00m$ son impulsadas hacia arriba, resultando en la formación del cráter. Es posible visualizar también, en esta última figura, una variación de la forma del cráter con la altura de la carga, efecto detectado por Jones *et al* [4] en grandes explosiones y en impactos de meteoritos, lo que sugiere la existencia de por lo menos dos *modos de falla o formas del cráter*. El diámetro del cráter aparece claramente en la figura 8, que muestra el perfil del terreno en varios instantes después de la explosión y para varios casos analizados. La variación de la aceleración vertical y radial a diferentes distancias del centro de

la explosión para una simulación numérica se aprecia en figura 7 . Finalmente en Fig. 8 se presenta un gráfico que resume la comparación entre las predicciones numéricas y experimentales del diámetro del cráter. La correlación entre valores teóricos e experimentales es en todos los casos satisfactoria .

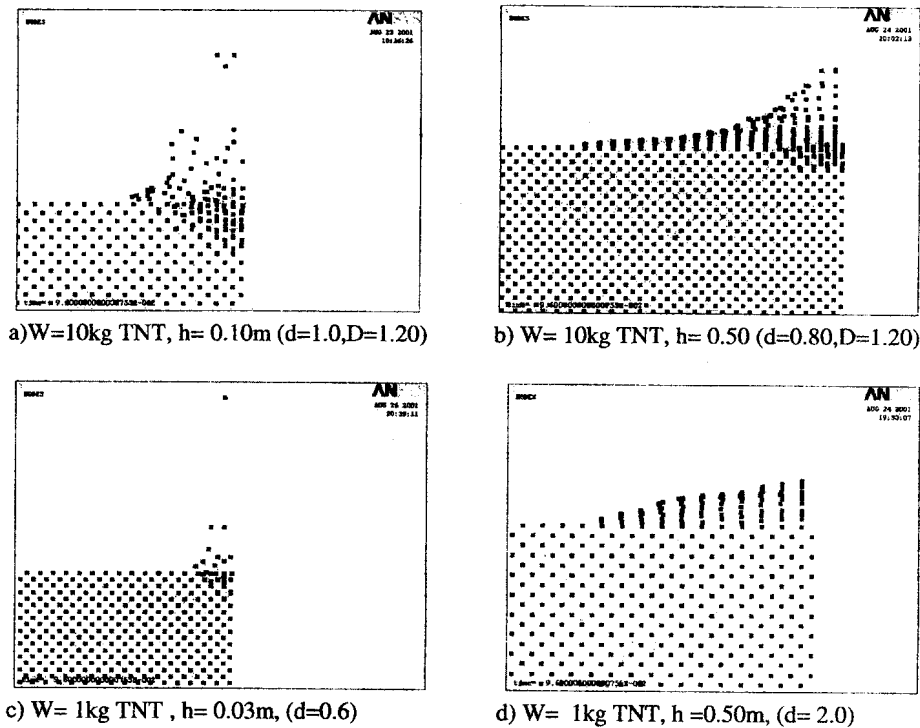


Figure 5. Configuraciones finales en $t= 97.6$ ms para diferentes simulaciones, (W es la masa de la carga explosiva, y h la altura desde el nivel del suelo hasta el centro de la carga.)

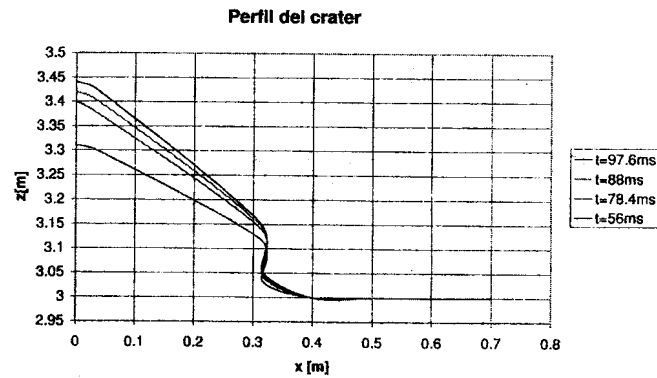


Figure 6: Perfil del cráter debido a una carga explosiva sobre la interface, Resultados numéricos ($W=1$ kg, $h:0.01$ m). Claramente se percibe que el radio del cráter es de 0.33 m.,($d= 0.66$ m).

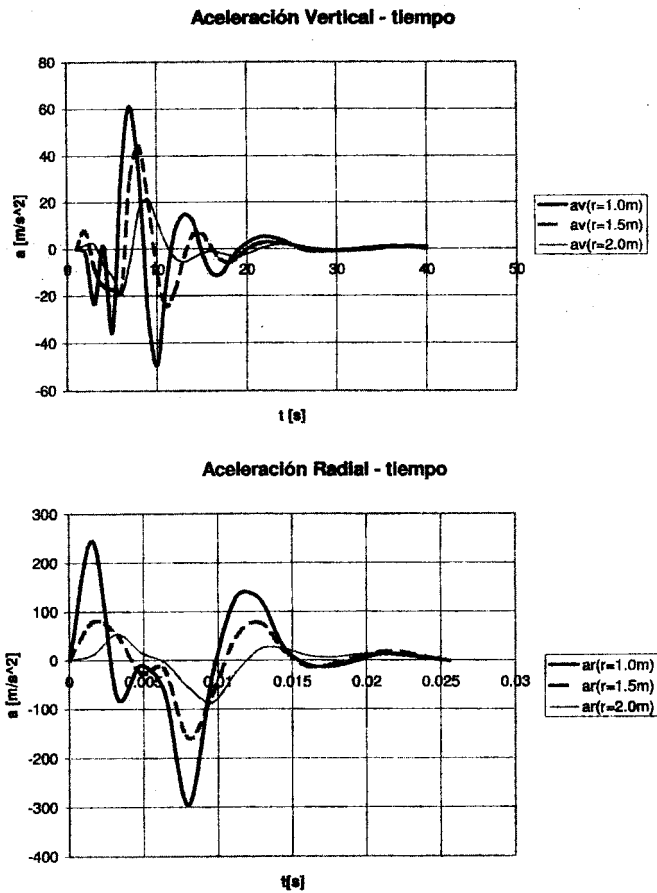


Figure 7: Aceleraciones vertical y radial vs. tiempo, para una simulación numérica con $W=1kg$, carga explosiva sobre la superficie.

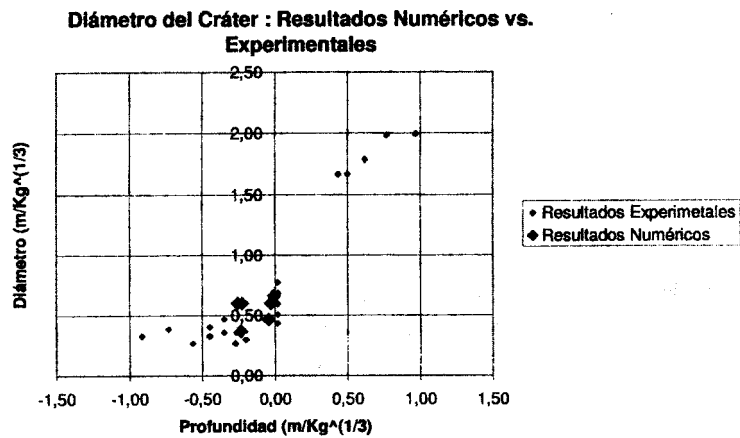


Figure 11: Comparación entre resultados numéricos y experimentales.

CONCLUSIONES

En este trabajo fué presentada una metodología numérica para predecir la formación de cráteres en un semiespacio, debido a la acción de cargas explosivas sobre la superficie. Los resultados del análisis son comparados con evidencia experimental y con ecuaciones empíricas de predicción, lo que permite verificar la aplicabilidad y confiabilidad global de esta metodología para analizar sistemas estructurales sujetos a fuerzas de impacto y cargas impulsivas.

Observese finalmente que el método permite evaluar la evolución con el tiempo del balance energético y también determinar la regiones fracturadas y/o dañadas del sistema, asunto sobre el cual no se encontró ninguna referencia en la literatura abierta. Un estudio más detallado sobre la profundidad de la región dañada, así como la influencia de la altura de la carga en la forma del cráter, darán continuidad al presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] **Ambrosini, R.D.; Luccioni, R.F.; Danesi, R.F.; Riera, J.D. and Rocha, M.M.** (2000): "Craters produced by explosions", to be published.
- [2] **Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J. and Strehlow, R.A.** (1983): *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- [3] **Bull, J.W. and Woodford, C.H.** (1998): "Camouflets and their effects on runway supports", *Computer and Structures*, 69/6, 695-706.
- [4] **Jones G. H. S, Roddy D.J. Henny R.W. , Slater J. E.**, (1999) "Defence Research Establishment Suffield Explosion Craters and Planetary Impact Craters: Morphological and Structural Deformation Analogues", *15th International Symposium on Military Aspect of Blast and Shock*, Suffield, Canada. .
- [5] **Kinney, G.F. and Graham, K.J.** (1985): *Explosive Shocks in Air*, Second Edition, Springer Verlag, Berlin.
- [6] **Persson, P.A.; Holmberg, R. and Lee, J.:** (1994): *Rock blasting and explosives engineering*, CRC Press, Boca Raton , USA.
- [7] **Riera, J.D. and Iturrioz, I.** (1995): "Discrete element dynamic response of elastoplastic shells subjected to impulsive loading", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, 417-426.
- [8] **Riera, J.D. and Iturrioz, I.**(1998): "Discrete element model for evaluating impact and impulsive response of reinforced concrete plates and shells subjected to impulsive loading", *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 179, 135-144.
- [9] **Rocha, M.M & Riera, J.D.:** (1990) "On size effects and rupture in non-homogeneous materials", *Proceedings, Congress on Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics*, J.M.Van Mier; J.G. Rots & A. Baker (Eds), Chapman & Hall/ Ed. Fn Spon, London, 451-460.
- [10] **Smith, P.D. and Hetherington** (1994): *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann Ltd., London, U.K.
- [11] **Dalguer, L. A.**(1999): "Simulação de movimentos sísmicos considerando o mecanismo de ruptura da falha causativa do terremoto", *Tese de Doutorado*, Escola de Engenharia, PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean reconocer el apoyo parcial de CNPQ y CAPES, Brasil. Parte de los estudios fueron realizados en el CESUP, UFRGS, Porto Alegre, Brasil..