

CURVA DE FRAGILIDAD PARA MURO DE MAMPOSTERÍA BAJO CARGAS EXPLOSIVAS A PARTIR DE SIMULACIONES NUMÉRICAS

Ing. Gabriel Francisco Aráoz

Instituto de Estructuras - UNT | CONICET | San Miguel de Tucumán | Tucumán

Ing. Civil UNT (2005), Becario Tipo I CONICET, Alumno de Doctorado en Ingeniería UNT, Auxiliar D.G. en Estabilidad IV (2007) y Construcciones Sismorresistentes UNT

Dr. Bibiana María Luccioni

Instituto de Estructuras - UNT | CONICET | Yerba Buena | Tucumán

Ing. Civil UNT (1985), Magíster Ing. Estructural UNT (1988), Dr. Ing. Estructural UNT (1993). Prof. Titular UNT, Directora Académica Maestría en Ing. Estructural y Doctorado en Ing. UNT, Investigador Independiente CONICET.

Resumen

Cuando se produce una explosión fuera de una edificación, los muros exteriores resultan seriamente afectados por las sobrepresiones y los escombros resultantes pueden ser letales. Existen en la bibliografía, curvas de iso-daño obtenidas experimentalmente o de casos reales, que resultan una forma atractiva para determinar el daño a partir de valores de presión e impulso. La posibilidad de utilizar códigos computacionales para obtener dichas curvas presenta la ventaja de poder modificar la geometría, condiciones de borde o propiedades de los materiales involucrados en el problema. Sin embargo, las solicitaciones y propiedades mecánicas de la estructura presentan incertidumbres propias que hacen necesario un análisis estadístico para determinar su influencia sobre los modelos. Dentro del campo de la confiabilidad estructural, una de las formas más utilizadas para analizar la vulnerabilidad de la estructura son las curvas de fragilidad. Éstas representan la probabilidad de que la respuesta estructural exceda un determinado estado límite. En este trabajo se describe la obtención de la curva de fragilidad correspondiente a un nivel de daño extremo (colapso), a partir del análisis numérico de muros de mampostería bajo cargas explosivas considerando la incertidumbre en el límite de erosión del material.

Abstract

When an explosion takes place outside a building, the exterior walls are severely affected by overpressures and masonry debris that may be lethal. In the literature there are iso-damage curves experimentally obtained or from actual cases. They are an attractive way for damage determination using pressure and impulse values. The possibility of using computational codes to obtain these curves have the advantage of changing geometry, support conditions or material properties involved in the problem. However, the loads and mechanical properties of the structure has itself uncertainties that make necessary a statistics assessment to determinate its influence over the models. In structural reliability, one of the most commonly used methods to analyze the vulnerability of the structure are the fragility curves. These represent the probability of the structural response to exceed a specific limit state. In this work, the fragility curve determination for an extreme damage level (collapse) is described from a numerical analysis of masonry walls under blast loads considering the uncertainty of the material erosion limit.

1. INTRODUCCIÓN

El campo de la confiabilidad estructural permite evaluar la importancia que tienen, sobre la seguridad, funcionamiento y durabilidad, las incertidumbres en las solicitaciones, las cargas estructurales, y las propiedades mecánicas de la estructura. En este contexto, el diseño para determinados niveles de desempeño, requiere de una relación entre los estados límite estructurales y su probabilidad de ocurrencia. Una de las formas más utilizadas para representar el funcionamiento de una estructura son las curvas de fragilidad. Éstas representan la probabilidad de que la respuesta de una estructura exceda un determinado estado límite, en función de un parámetro que define la intensidad de la carga o solicitación. En otras palabras, puede decirse que son una medida de la vulnerabilidad estructural en términos probabilísticos. La construcción de estas curvas requiere de un entendimiento completo de los mecanismos de respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de carga.¹

Las curvas de fragilidad son de gran utilidad para los ingenieros proyectistas, investigadores, expertos en confiabilidad, aseguradoras y administradores de sistemas críticos como hospitales y autopistas, debido a que son un aporte esencial para los siguientes estudios:

- Evaluación del riesgo de sistemas estructurales.
- Análisis, evaluación y mejora del funcionamiento de sistemas estructurales y no estructurales.
- Identificación de diseños óptimos y estrategias de rehabilitación.
- Determinación de márgenes de seguridad útiles para la elaboración de normativas.

2. METODOLOGÍAS GENERALES

Existen distintos métodos utilizados para la generación de las curvas de fragilidad, los cuales difieren básicamente en los datos de entrada y en el proceso de obtención de las probabilidades asociadas a cada estado de daño, estos son:

1. Métodos basados en observaciones de campo
2. Métodos experimentales
3. Métodos basados en la opinión de expertos
4. Métodos analíticos – numéricos

Por lo general, la mayoría de los resultados obtenidos se ajusta a una función de distribución LogNormal, de tal forma que es posible determinar las probabilidades de exceder un estado definido de daño (o colapso) para un cierto valor de solicitación o carga. La distribución LogNormal se obtiene cuando los logaritmos de una variable se describen mediante una distribución normal.

Los métodos basados en observaciones de campo sólo deben ser utilizados para evaluar de manera global el comportamiento de las estructuras de una misma clase y no son recomendables para analizar una estructura en particular.

En los métodos experimentales se aplica un procedimiento similar al anterior, con la ventaja de tener un rango de intensidades y tipo de estructura controlado de acuerdo a requerimientos previamente establecidos. Sin embargo, los ensayos pueden ser costosos y la cantidad de observaciones está limitada por el número de pruebas que sea posible realizar; además de contar con simplificaciones impuestas por el modelo a escala, las cuales no deben alterar la respuesta esperada de la estructura.

Los métodos a partir de la opinión de expertos surgen de una serie de preguntas efectuadas a especialistas en análisis, diseño y patología estructural a partir de la cual se puede calcular un parámetro de cuantificación de daño. En general, a partir de los resultados obtenidos se ajusta dicho factor a una función de distribución de probabilidad beta. En estos métodos, además de las incertidumbres en la estimación del daño por la variabilidad de desempeño de la construcción, es necesario considerar las incertidumbres relacionadas a la opinión de los expertos. Las curvas así obtenidas son difíciles de calibrar o modificar con información actualizada.

Los métodos analíticos utilizan análisis numéricos y pueden ser empleados en situaciones donde no se dispone de observaciones o de suficientes resultados experimentales. Y por otro lado pueden ser útiles para el análisis de vulnerabilidad de una estructura particular, por ejemplo en este caso, de muros de mampostería. Los resultados obtenidos con este tipo de métodos son muy sensibles a los modelos adoptados para representar las estructuras y la sollicitación. Por lo tanto, deben utilizarse modelos que representen de la mejor forma tanto el comportamiento estructural como las principales características de las acciones aplicadas, en este caso, cargas explosivas. Una de las grandes ventajas de este tipo de métodos es que constituyen una herramienta de prevención y mitigación del efecto destructivo tanto de explosiones como de otras sollicitaciones extremas. Esto se debe a que pueden ser utilizados para reducir la vulnerabilidad y, en consecuencia, el riesgo al que se encuentran expuestas las estructuras sin necesidad de la ocurrencia real de la explosión, sismo, etc.

Existen básicamente dos tipos de métodos analíticos: los determinísticos, que no consideran las incertidumbres en los parámetros tanto de carga como estructurales; y los probabilísticos que si lo hacen. En estos últimos, los parámetros que definen la carga explosiva y la respuesta estructural involucran aleatoriedad e incertidumbre. La respuesta estructural se evalúa usualmente por medio de modelos y programas computacionales y, por lo tanto, ésta puede apartarse de la respuesta real. Adicionalmente, la capacidad estructural no puede determinarse de manera exacta, ya que los parámetros básicos, tales como las propiedades mecánicas y geométricas del material, muestran siempre variaciones estadísticas. En consecuencia, es más apropiado el uso de una metodología probabilística para la generación de las curvas de fragilidad, ya que permite considerar todas estas incertidumbres.

Para tener en cuenta la incertidumbre de cualquier parámetro, se requieren datos experimentales o simulados, que permitan ajustar una función de distribución que represente su variación. Estas funciones están definidas por algunos parámetros estadísticos, por ejemplo: la media, el desvío estándar o el coeficiente de variación. Una vez que se cuenta con una función de distribución para cada parámetro, éstos se definen como variables aleatorias y, utilizando técnicas de simulación, se puede obtener una muestra adecuada de cada una de ellas. En general, el método más recomendado para la generación de valores aleatorios es el método de Monte Carlo, sin embargo, en este trabajo dichos valores se obtienen utilizando una metodología simplificada, mediante el uso combinado de la función "Random" y la función de probabilidad $F(x)$. Esta metodología será descrita más adelante.

A partir del estudio numérico realizado en muros de mampostería sometidos a cargas explosivas, se propone la elaboración de la curva de fragilidad correspondiente a un nivel de daño extremo (colapso), a fin de establecer el grado de influencia que tiene la variabilidad de los parámetros del material utilizado. El trabajo comprende las siguientes etapas:

1. Recopilación de información sobre el material mampostería a fin de determinar la variabilidad de los parámetros característicos.
2. Elección de la variable que se considerará aleatoria en la definición del material y ajuste de la misma a un modelo de distribución probabilística.
3. Definición de un modelo de muro adecuado y simulación numérica para distintos valores de la variable aleatoria.
4. Obtención de la curva de fragilidad para el caso estudiado.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA MAMPOSTERÍA

La mampostería es uno de los materiales con mayor alternativas de aplicación en las obras civiles, y su uso se remonta a las primeras civilizaciones existentes, las ruinas de Jericó (Medio Oriente, 7350 a.C.), las pirámides de Egipto (2500 a.C.), la muralla China (200 a.C a 220 d.C), las pirámides de Yucatán (México, 500 d.C.) o las murallas de Machu Pichu (Perú, 1200 a 1400 d.C.), son algunos ejemplos de su implementación a lo largo de la historia. En nuestro país existe una gran variedad de construcciones ejecutadas con mampuestos de adobe, de hormigón o cerámicos. En particular, existen numerosos edificios de uso crítico o bien de carácter histórico cuya integridad debe ser preservada de las acciones dinámicas extremas, ya sean accidentales o intencionales. El estudio de la mampostería implica necesariamente un análisis estadístico de sus propiedades debido a las incertidumbres propias de su fabricación y las que surgen de su empleo. Es por esto que, a fin de determinar sus características, se tienen en cuenta los ensayos realizados experimentalmente.

Para este trabajo se dispone de valores de resistencia y deformación obtenidos a partir de ensayos experimentales quasi-estáticos, efectuados por la Dr. Ing. Viviana Rougier en el marco de su tesis doctoral en refuerzos de mampostería². En particular, se tomaron en cuenta los resultados del ensayo de compresión uniaxial

en muros no reforzados. En la Figura 1 puede observarse la probeta utilizada en los ensayos mencionados y la curva Tensión – Deformación (longitudinal y transversal) correspondiente.

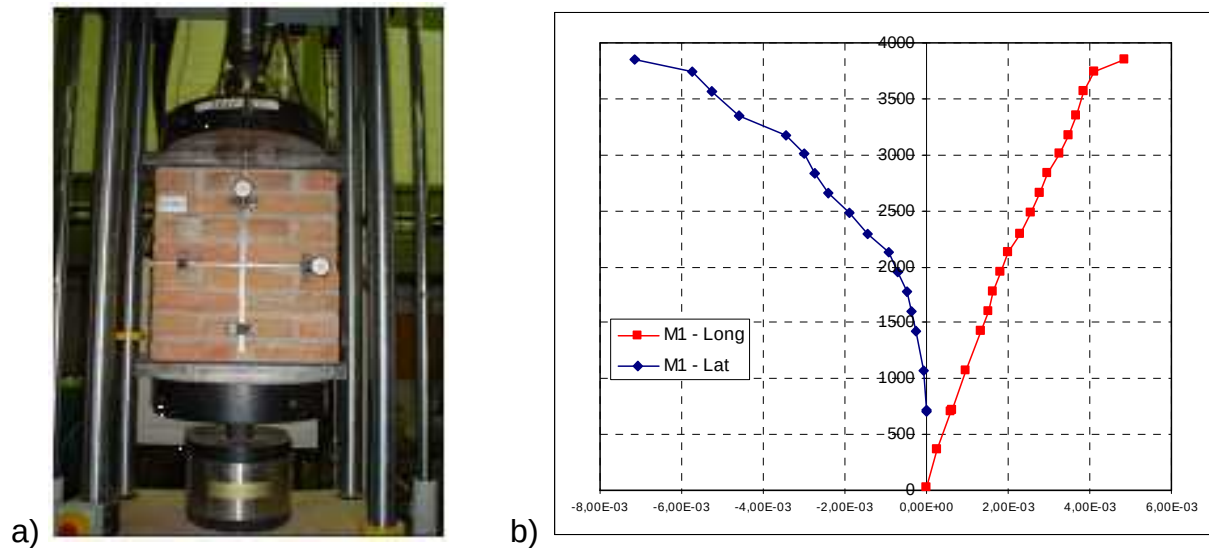


Figura 1 – a) Ensayo de Compresión uniaxial
b) Curva Tensión – Deformación (longitudinal y lateral)

A partir de los valores de tensión y deformación obtenidos en los distintos ensayos, y adoptando la hipótesis de estado plano de tensión, pueden definirse las siguientes componentes del tensor de deformaciones para un instante previo a la rotura del muro:

$$\epsilon_1 = 5,0 \cdot 10^{-3} \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = -7,0 \cdot 10^{-3} \quad \epsilon_{12} = \epsilon_{23} = \epsilon_{31} = 0 \quad (1)$$

Los valores medios utilizados en la simulación para el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son los siguientes:

$$E = 1367770 \text{ KPa} \quad \mu = 0,15 \quad (2)$$

4. VARIABILIDAD ALEATORIA

A fin de determinar numéricamente la influencia de las características del material en el modelo es necesario definir la variabilidad aleatoria de por lo menos uno de sus parámetros. Distintas experiencias realizadas indican que la variabilidad de parámetros mecánicos como la resistencia a la tracción o el módulo de elasticidad no evidencian mayores efectos en el comportamiento de los modelos, mientras que, el parámetro ‘límite de erosión’ tiene un alto grado de influencia, por lo cual puede considerarse como una variable aleatoria de relevancia.

El límite de erosión está dado por un valor de referencia de deformación que se establece a priori en la definición del material, y que luego es comparado durante

el proceso de cálculo con la siguiente relación, denominada ‘deformación geométrica instantánea’:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) + 5(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1) - 3(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} \quad (3)$$

Luegue³ y Xu et al⁴ consideran un límite de erosión igual a 0.01 para modelos de H^oA^o. En estos trabajos, la deformación correspondiente a la tensión máxima, obtenida a partir de ensayos quasi-estáticos, es mayorada a fin de considerar, en primer lugar, el ablandamiento que sufre el material hasta la rotura. Posteriormente, es necesario tener en cuenta la amplificación dinámica originada por la alta velocidad en la aplicación de la carga; y una amplificación final debida al efecto de confinamiento de la armadura. En el trabajo de Xu et al⁴ se amplifica 5 veces la deformación correspondiente al pico de tensión para considerar el ablandamiento y luego, esta deformación se amplifica otras 5 veces por las características dinámicas de la carga. Es decir que, para ese caso, el límite de deformación dinámico es igual a 25 veces el límite de deformación en el pico de tensión para el ensayo quasi-estático.

Utilizando para la mampostería los valores experimentales detallados en las expresiones (1), se obtiene según la ecuación (3) un límite de deformación en tensión máxima $\varepsilon_{eff}=2,8 \cdot 10^{-3}$. Considerando que las mediciones fueron interrumpidas previas al instante de rotura se puede inferir que el límite de erosión (quasi-estático) será mayor debido al ablandamiento del material y por lo tanto se adopta $\varepsilon_{eff}=1,0 \cdot 10^{-2}$.

Dada la escasa información disponible en relación a la amplificación dinámica de la resistencia de la mampostería, se considera el valor de deformación quasi-estática como cota mínima del límite de erosión, Por otro lado, haciendo distintas comparaciones de los modelos analizados con los resultados presentados en la bibliografía⁵ a través de las curvas de iso-daño, se establece que el valor esperado para el límite de erosión debe ser superior a 0,20. De esta forma, se considera como cota máxima de ε_{eff} un valor de 0,50; es decir que el rango de valores de X (límite de erosión) será:

$$0,01 \geq X \geq 0,50 \quad (4)$$

Asumiendo una distribución log normal dada por la siguiente expresión⁶:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad x > 0 \quad (5)$$

donde μ_y y σ_y son la media y el desvío estándar de $Y = \ln X$, logaritmo natural del límite de erosión; y admitiendo que el 95% de los valores estarán dentro del intervalo definido anteriormente, se puede determinar que $\mu_y = -1.671$ y $\sigma_y = 0,6$.

En la figura 2 puede observarse la función de distribución log normal ajustada mediante el uso del programa Maple.

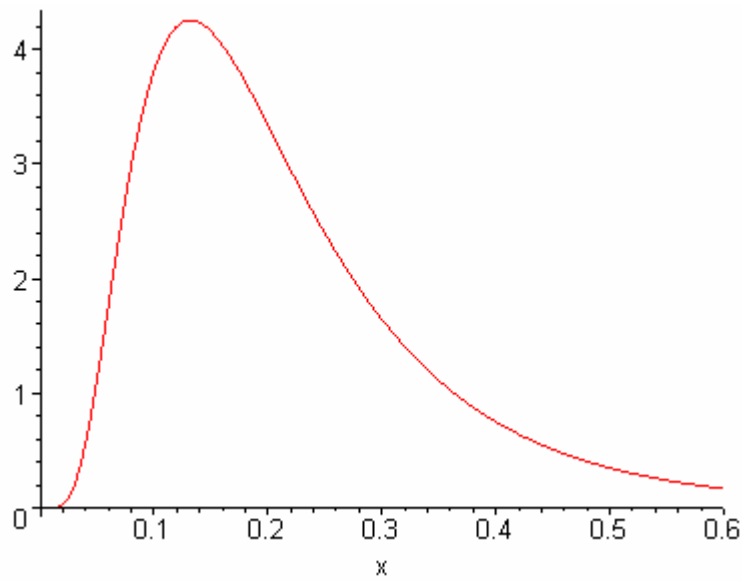


Figura 2 – Función de distribución de probabilidad Log Normal (Maple)

Las expresiones para determinar el valor esperado y el desvío estándar del límite de erosión son las siguientes:

$$\mu_x = \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$\sigma_x = \sqrt{[\exp(\sigma_y^2) - 1] \cdot \exp(2\mu_y + \sigma_y^2)} \quad (7)$$

Utilizando las ecuaciones (6) y (7) respectivamente se obtiene:

$$\mu_x = 0,224 \quad \sigma_x = 0,146 \quad (8)$$

Integrando la expresión (5) es posible determinar la función de probabilidad $F(x)$ que será utilizada para obtener los valores aleatorios del límite de erosión, los cuales se usarán luego en la simulación numérica. La representación gráfica de dicha función puede observarse en la Figura 3.

La obtención de los valores aleatorios se realiza mediante una función RANDOM que devuelve un número aleatorio mayor o igual que 0 y menor que 1, distribuido uniformemente, con el cual se ingresa en las ordenadas de la curva de $F(x)$ y se determina el valor correspondiente de X (límite de erosión). Los valores obtenidos se detallan en la Tabla 2.

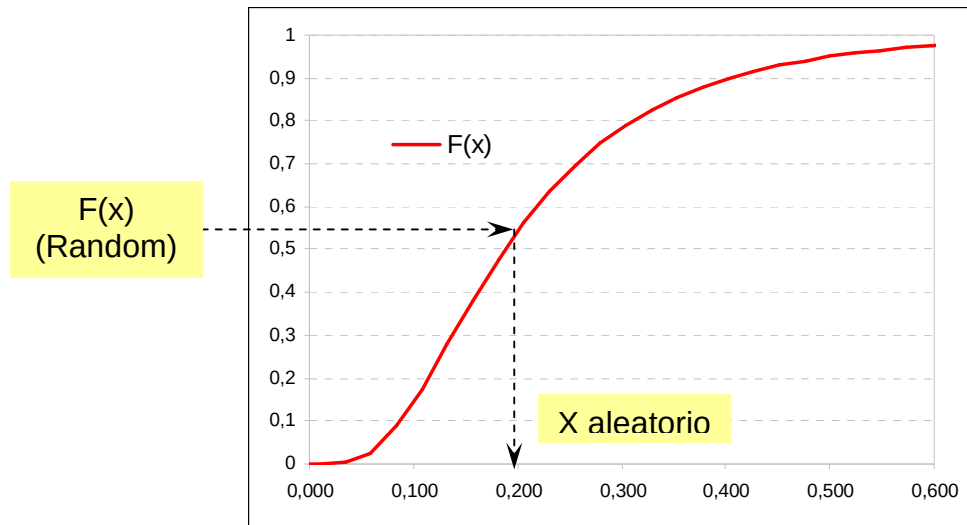


Figura 3 – Función de probabilidad $F(x)$

En cuanto a las incertidumbres en la aplicación de la carga, existen distintos parámetros que pueden considerarse aleatorios: las propiedades del aire donde se propaga la onda explosiva, la ubicación, masa y otras propiedades del explosivo propiamente dicho (potencia, velocidad del frente de onda, equivalencia en TNT, etc.) así como también las presiones que efectivamente inciden sobre el muro. En el presente trabajo sólo se considera la aleatoriedad en las características materiales del muro, en particular el límite de erosión.

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA

5.1 Descripción general del modelo

Se utiliza en la modelación el programa AUTODYN⁷. El modelo consta de un volumen de aire donde se propaga la onda explosiva, en el cual está inmerso el muro. La carga explosiva se ubica en el centro de la sección transversal como puede observarse en la Figura 4.

Las dimensiones de volumen de aire son: 3,04 m de ancho x 3,04 m de alto x 5,00 m de largo. El flujo del aire hacia fuera está permitido en todos los bordes excepto en la cara inferior que corresponde al suelo en donde se supone que la onda de presión se refleja. En la parte inferior se modela un volumen adicional de 100mm de espesor que servirá como piso para contener la eventual caída del muro o de sus partes. En todos los casos se tiene en cuenta el efecto de la aceleración de la gravedad ($g = 0.00981\text{m/ms}^2$).

El muro de mampostería se encuentra empotrado en todos sus bordes y sus dimensiones son: 3,04 m de ancho, 3,04 m de altura y 0,15 m de espesor, considerando para el mismo una zonificación homogénea (box).

Tanto para el aire y como para el muro se adoptan elementos con las siguientes dimensiones: $dx=dy=0.04\text{m}$, $dz=0.05\text{m}$.

El modelo se adoptó a partir de un trabajo previo⁸ en el cual se realizaron comparaciones con distintos niveles de discretización y tipos de zonificación, ya que

el programa permite, además, una modelación fragmentada del muro (ladrillo y mortero por separado).

Las cargas explosivas modeladas están entre 0,10 Kg TNT y 100 Kg TNT.

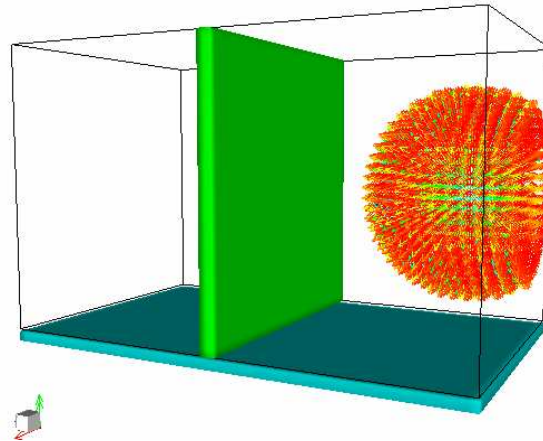


Figura 4 – Perspectiva del modelo numérico. Ubicación del muro y carga explosiva.

5.2 Elección del modelo numérico

En esta etapa se determina el modelo más adecuado para analizar la influencia del límite de erosión. Es recomendable partir de un modelo en el cual se esperen 50% de colapsos; para esto se tienen en cuenta los resultados obtenidos en un trabajo previo⁹ donde se determinaron distintos niveles de daño según la distancia escalada Z para un valor de límite de erosión constante igual a 0,20. La distancia escalada está definida por la siguiente expresión:

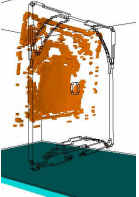
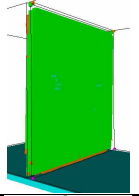
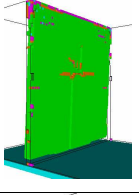
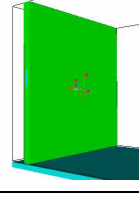
$$Z = R/W^{1/3} \quad (9)$$

donde

R: Distancia a la carga explosiva [m]
W: Masa de explosivo [Kg de TNT]

Los resultados mencionados se detallan en la Tabla 1. Tanto en los niveles III y IV hay desprendimiento o colapso del muro, por lo que el modelo adoptado de partida será el correspondiente a $Z = 2,0$, debido a que se encuentra próximo al nivel de daño moderado, en el cual el muro presenta erosión parcial de los bordes y fisuración general. Para $Z = 2,0$ corresponde el modelo de muro a 2 m de distancia y 1 kg de TNT.

Tabla 1 – Niveles de daño obtenidos numéricamente para $\varepsilon = 0,20$

Z	Nivel de daño	Descripción	Detalle
0.43	IV	Destrucción total	
0.93	IV		
1.17	III	Severo	
2.00	III		
3.00	II	Moderado	
4.00	II		
4.76	I	Leve	
6.35	I		

Las simulaciones numéricas se realizan para cada valor de carga explosiva (o distancia escalada, ya que la ubicación no varía) con 10 valores distintos del límite de erosión obtenidos en forma aleatoria, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 – Valores aleatorios del límite de erosión para cada carga explosiva

Límite de Erosión	Carga explosiva [Kg TNT]						
	0,10	0,25	1	2	5	10	100
X ₁	0.19	0.27	0.11	0.5	0.38	0.34	0.40
X ₂	0.28	0.39	0.03	0.32	0.05	0.43	0.13
X ₃	0.33	0.21	0.20	0.45	0.22	0.17	0.26
X ₄	0.41	0.07	0.09	0.25	0.26	0.04	0.22
X ₅	0.16	0.30	0.54	0.19	0.53	0.54	0.18
X ₆	0.51	0.51	0.35	0.04	0.18	0.02	0.57
X ₇	0.38	0.03	0.12	0.13	0.12	0.16	0.12
X ₈	0.14	0.29	0.33	0.38	0.16	0.08	0.09
X ₉	0.24	0.20	0.15	0.21	0.06	0.28	0.19
X ₁₀	0.27	0.13	0.24	0.26	0.31	0.33	0.17

En la Figura 5 se puede observar la influencia del límite de erosión en el estado de daño para el caso de 1 kg de TNT. La Figura 5.a corresponde a un límite de erosión de 0,54 para el cual no se produce colapso del muro, simplemente daño en los bordes, representado por las zonas de color magenta. La Figura 5.b corresponde a un límite de erosión de 0,20 en el cual se evidencia el desprendimiento final del mismo (bordes totalmente erosionados).

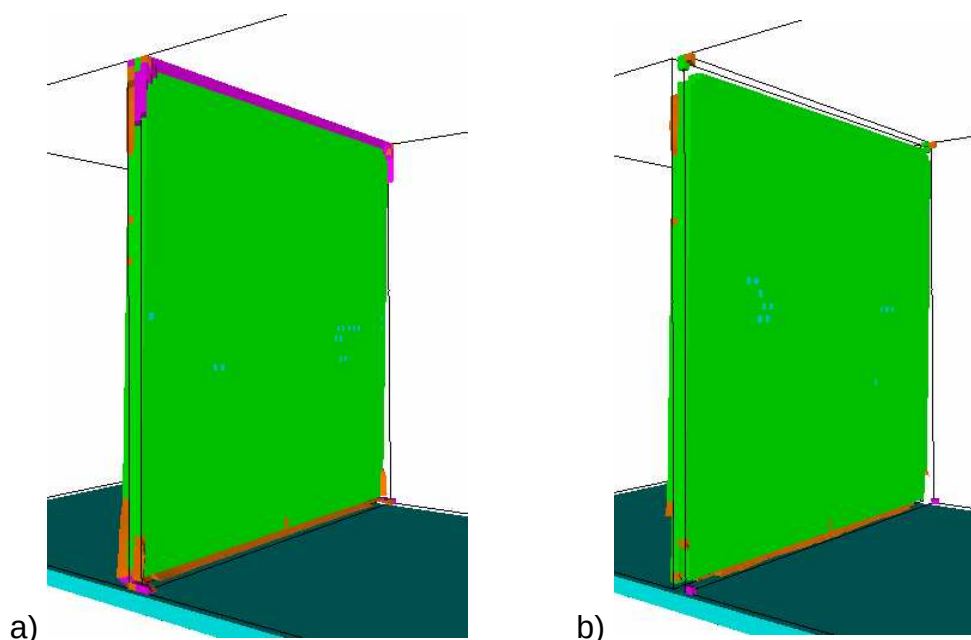


Figura 5 – Niveles de daño: a) Modelo 1 kg TNT con $X=0,54$.
b) Modelo 1 kg TNT con $X=0,20$

6. CURVA DE FRAGILIDAD

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones en función de los distintos límites de erosión adoptados, se cuentan los casos donde hubo o no colapso del muro. Luego se determina en cada valor de carga la probabilidad o frecuencia de colapsos f_c como el número de colapsos dividido en 10 casos estudiados. A modo de resumen se detallan en la Tabla 3 los resultados obtenidos en función de la distancia escalada.

Tabla 3 – Número y frecuencia de colapsos producidos para distintos valores de Z

Carga explosiva [Kg TNT]	Distancia escalada Z	Nº de Colapsos	Probabilidad de colapso f_c
0,10	4,31	0	0,00
0,25	3,17	1	0,10
1,00	2,00	9	0,90
2,00	1,59	10	1,00
5,00	1,17	10	1,00
10,00	0,93	10	1,00
100,00	0,43	10	1,00

Finalmente, utilizando los valores de probabilidad de colapso se elabora la Curva de Fragilidad que se ilustra en la Figura 6, correspondiente a un muro de mampostería sometido a distintas cargas explosivas ubicadas a 2 m de distancia del mismo.

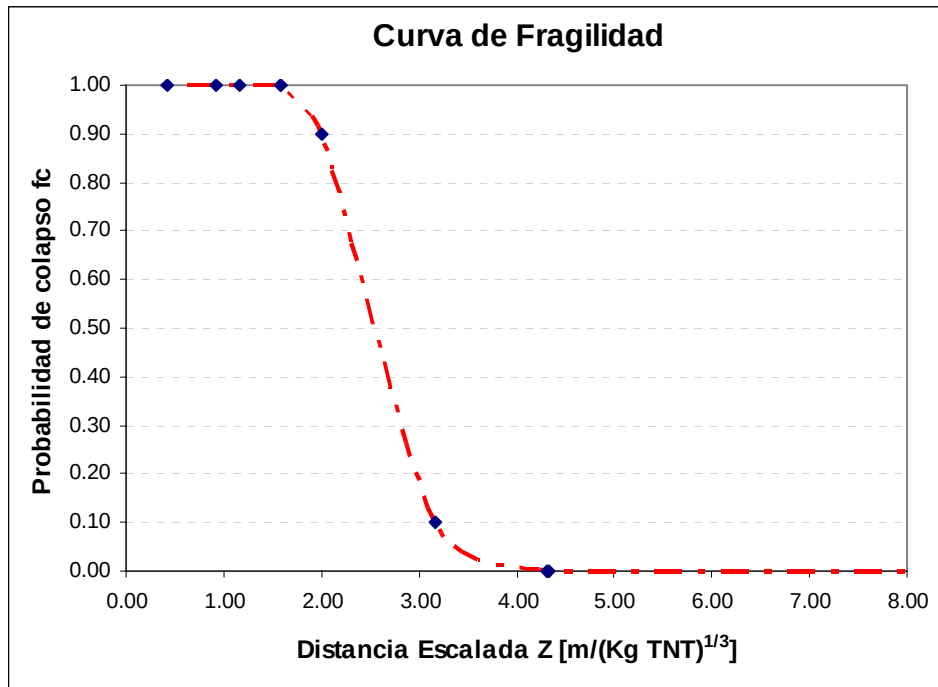


Figura 6 – Curva de Fragilidad en función de la distancia escalada Z.

En la Figura 6 se observa que la variabilidad del límite de erosión tiene una gran influencia en la probabilidad de colapso para valores de Z entre 1,5 y 4,3 aproximadamente. Este intervalo abarca los niveles de daño II (Moderado) y III (Severo) descritos en la Tabla 1, que establecen los límites dentro de los cuales se produce el colapso en los modelos numéricos. La probabilidad de colapso es superior al 50% para valores de Z menores a 2,5.

7. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos es posible concluir que:

- La utilización de las curvas de fragilidad obtenidas a partir de métodos probabilísticos permite tener en cuenta las incertidumbres propias del material y de la acción aplicada a la estructura. En el presente trabajo sólo se tomaron en cuenta las incertidumbres del material por lo que es necesario realizar estudios idénticos sobre la aleatoriedad de la carga aplicada, tanto en las características de propagación de la onda explosiva como en los parámetros propios del explosivo.
- La implementación de herramientas numéricas presenta la ventaja de poder analizar el riesgo o la vulnerabilidad estructural sin necesidad de realizar ensayos reales, los cuales pueden representar un costo importante para su

ejecución. Aún más, la obtención de curvas de fragilidad a partir de simulaciones numéricas permite predecir el riesgo de colapso de elementos estructurales y no estructurales sometidos a acciones extremas como la detonación de explosivos, excitaciones sísmicas, etc. sin la ocurrencia real de las mismas.

- La importante variabilidad observada en los resultados obtenidos hace necesaria la profundización en el estudio del límite de erosión a fin de acotar aún más el rango de valores posibles. Por otro lado, es recomendable la utilización de un número mayor de simulaciones con el objeto de definir en detalle la curva de fragilidad y, de esta forma, reproducir con mayor precisión la vulnerabilidad del muro bajo cargas explosivas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Dr. Ing. Viviana Rougier que facilitó los datos experimentales de la mampostería; agradecen al CONICET y al CIUNT por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo

REFERENCIAS

- 1 BONETT DIAZ, R.L. Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España, 2003.
- 2 ROUGIER V.C. and LUCCIONI B.M. Análisis experimental del comportamiento de muros de mampostería reforzados con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono. XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Mar del Plata, Argentina, 2006.
- 3 LUEGUE M. Simulación del comportamiento de materiales bajo cargas explosivas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán, Argentina, 1999.
- 4 XU K. and LU Y. Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading. Computers and Structures 84. 431-438. 2006.
- 5 SMITH PD. and HETHERINGTON JG. Blast and Ballistic Loading of Structures, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, UK, 1994.
- 6 RIERA J.D. Introdução à Confiabilidade na Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2007.
- 7 AUTODYN. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software, Version 6.1, User's Manual. Century Dynamics Inc., 2005.
- 8 ARÁOZ G.F. and LUCCIONI B.M. Comportamiento de muros de mampostería bajo cargas explosivas. XVI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF), Córdoba, Argentina, 2007.
- 9 ARÁOZ G.F. and LUCCIONI B.M. Evaluación del daño producido por explosiones en muros de mampostería. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Santiago, Chile, 2008.