

Ensayos de un muro antiexplosivos: el proyecto MADEX

Tests of an anti-explosive wall: the MADEX project

Alejandro Pérez Caldentey^a, Lina López^b María Chiquito^c, Ricardo Castedo^d, Tasio Santos^e, Antonio Gutierrez^f, Carlos Posada^g

^a PhD Civil Engineer. Universidad Politécnica de Madrid/FHECOR. Full Profesor. apc@fhcor.es.

^b Mining Engineer. Universidad Politécnica de Madrid. Full Profesor. lina.lopez@upm.es, ^c Mining Engineer. Universidad Politécnica de Madrid. Assistant Profesor. maria.chiquito@upm.es, ^d Mining Engineer. Universidad Politécnica de Madrid. Full Profesor. ricardo.castedo@upm.es, ^e Mining Engineer. Universidad Politécnica de Madrid. Associate Profesor. tasio.santos@upm.es, ^f Mining Engineer. INGE. Development director. agutierrez@inge.es, ^g Technical Architect. RUESMA. Director of Construction. cposada@ruesma.es

RESUMEN

En 2019 se concedió una patente de muro antiexplosivo a FHECOR Ingenieros Consultores (ES2684845B1, EP3604714B1 [1]). El sistema destinado a proteger una zona crítica de una infraestructura se basa en modificar el periodo de la estructura colocando delante de ella una placa de acero conectada al muro de la estructura que se debe proteger mediante una serie de muelles lineales. La principal ventaja de esta solución es que se trata de un sistema elástico que se basa en reducir notablemente el efecto de la explosión sobre la estructura al aumentar significativamente su periodo natural por lo que el sistema no resulta significativamente dañado por un ataque. Esto permite resistir un ataque doble, en el que un primer explosivo está dirigido a destruir las defensas y otro posterior a causar daños en la instalación esencial.

Dentro del Proyecto de Investigación MADEX, promovido por FHECOR, RUESMA e INGE, con la participación de la UPM y el INTA, y financiado por el CDTI (Proyecto número IDI-20211067), el sistema fue probado con éxito utilizando cargas explosivas de 10, 20, 30, 50 y 70 kg de TNT equivalente en las instalaciones del INTA en La Marañosa, situadas al Sur de Madrid.

Este trabajo resume los resultados de los ensayos, expone las lecciones aprendidas de las mismas y proporciona una metodología para el proyecto del sistema de protección en diferentes escenarios para aplicaciones prácticas.

ABSTRACT

An anti-explosive wall patent was granted to FHECOR Ingenieros Consultores in 2019 (ES2684845B1, EP3604714B1 [1]). The system aimed at protecting a critical area of an infrastructure is based on changing the period of the structure by placing in front of it a steel plate connected to the wall of the structure that should be protected by means of a series of linear springs. The main advantage of this solution is that it is an elastic system based on a significant reduction of the effect of the explosion on the structure by significantly increasing its natural period. The result is that the system it is not significantly damaged by an attack. This allows resisting a double attack ,where a first explosive is aimed at destroying the defences and a subsequent one aimed at causing damage to the essential facility.

Within Research Project MADEX, promoted by FHECOR, RUESMA and INGE, with the participation of UPM and INTA, and financed by CDTI (Project number IDI-20211067), the system

was successfully tested using explosive charges of 10, 20, 30, 50 and 70 kg of TNT equivalent at the installations of INTA at La Marañosa, located South of Madrid.

This paper will report on the results of the tests and on the lessons learned from them, as well as provide a methodology for design of the protection system in different scenarios for practical applications.

PALABRAS CLAVE: Acciones explosivas, sistema de protección, ensayos a escala 1:1.

KEYWORDS: Blast loading, period-based protection system, full scale tests

1. Descripción del sistema

El prototipo de muro anti-explosivos ensayado en el marco del proyecto MADEX, financiado parcialmente por CDTI (IDI-20211067) consiste en una chapa metálica que se ancla a un muro prefabricado de hormigón, que representa la estructura a proteger mediante una serie de muelles lineales (30 en este caso) (ver **Figura 1**). La chapa metálica está soportada mediante un sistema de ruedas comerciales que permiten su desplazamiento relativo al muro de hormigón.

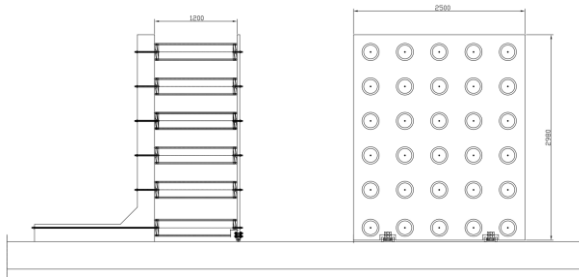


Figura 1. Esquema de la probeta ensayada.

El principio de funcionamiento del muro es el aumento del periodo propio de la estructura. Al ser la acción explosiva de muy corta duración, el coeficiente de impacto es menor que 1 y se reduce a medida que la relación entre el periodo propio de la estructura y la duración de la carga aumenta. Dentro de un rango de acciones explosivas, el comportamiento es elástico lineal, lo cual evita cualquier daño al sistema de protección. Esto permite resistir eficazmente un ataque múltiple. Para cargas explosivas más importantes, se puede alcanzar el recorrido máximo de muelle, lo cual puede provocar algunos daños y unas acciones algo mayores sobre la estructura a proteger. No obstante, en la campaña

experimental realizada, se utilizaron cargas explosivas de hasta 70 kg de TNT equivalente a 2 metros de la chapa metálica, lo cual supone una distancia escalada de $0.49 \text{ m/kg}^{1/3}$ lo que supone una acción explosiva de alta intensidad.

2. Descripción de los ensayos

Las probetas consisten en un muro prefabricado de 25 cm de canto, 3.00 metros de altura y 2.50 m de ancho, que se ancla a una losa existente (ver **Figura 2** y **Figura 3**) y se conecta a una chapa metálica mediante 30 muelles de 24.73 kN/m de rigidez. Los muelles tienen un diámetro medio de espira 0.255 m, un diámetro de barra de 25 mm, y 14 espiras efectivas. La calidad del acero de los muelles es 51CrV4 según EN 10089 y tiene un límite elástico superior a 1200 MPa y una tensión de rotura comprendida entre 1400 y 1700 MPa. La chapa metálica se apoya inicialmente sobre un sistema con 4 ruedas, reforzado en la segunda fase de ensayos a 8 ruedas (ver **Figura 4**). Se utilizaron ruedas tipo KR47 del fabricante SFK.

Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones del INTA en la Marañosa. Se llevaron a cabo un total de 12 ensayos sobre el mismo muro en dos fases. Se ensayó simultáneamente un muro no protegido, aunque esta comunicación se centra, por falta de espacio, en el muro protegido.

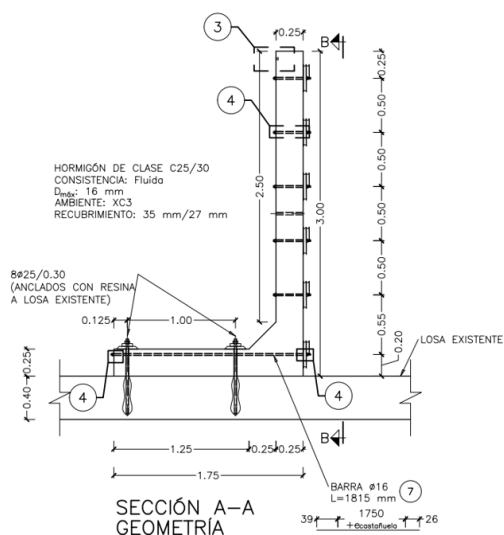


Figura 2. Definición geometría del muro.

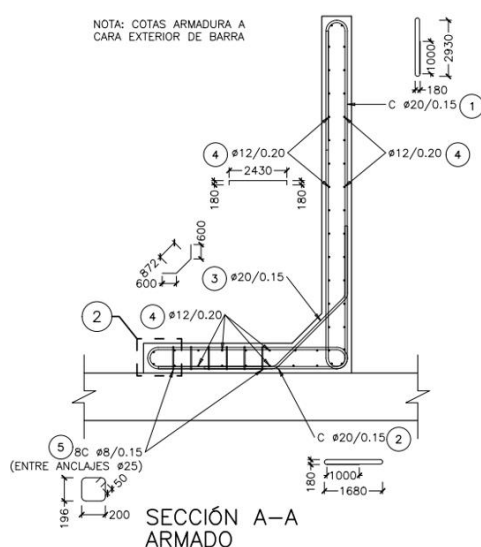


Figura 3. Definición de la armadura del muro.



Figura 4. Vista del sistema de rodadura.

En la Figura 5 y en la Tabla 1 se muestra la posición del explosivo respecto de los muros ensayados y la magnitud de las cargas explosivas.

La altura del explosivo respecto del suelo fue de 70 cm en todos los casos.

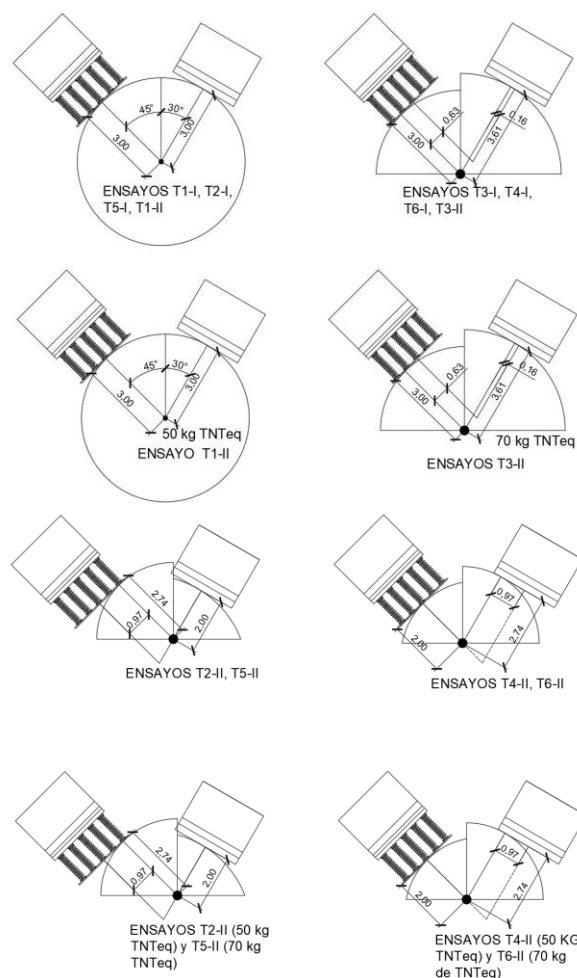


Figura 5. Posición del explosivo respecto de los muros en cada uno de los ensayos.

Tabla 1. Posición y magnitud de las cargas explosivas

Ensayo #	Carga(kg RIODIN)	Posición	Muro M1	
			d_{M1} (m)	$e_{y,M1}$ (m)
T1-I	10	centrada	3.000	0.000
T2-I	20	centrada	3.000	0.000
T3-I	10	excéntrica	3.000	0.625
T4-I	20	excéntrica	3.000	0.625
T5-I	50	centrada	3.000	0.000
T6-I	50	excéntrica	3.000	0.625
T1-II	50	centrada	3.000	0.000
T2-II	50	centrada	2.740	0.966
T3-II	70	excéntrica	3.000	0.625
T4-II	50	centrada	2.000	0.000
T5-II	70	excéntrica	2.740	0.966

En la Tabla 2 se muestra para cada ensayo, la distancia escalada, y la presión reflejada y el impulso estimados de acuerdo con

el Manual del Departamento de Defensa estadounidense [2], suponiendo carga esférica.

Tabla 2. Distancia escalada, presión reflejada e impulso aplicados sobre el muro, estimados a partir del manual del Departamento de defensa (DoD) (onda esférica)

Ensayo #	Carga(kg RIODIN)	Muro 1 (chapa)		
		z [m/kg ^{1/3}]	p_r [kPa]	i [kN.s]
T1-I	10	1.392	2084	6.079
T2-I	20	1.105	3952	10.031
T3-I	10	1.392	2084	6.079
T4-I	20	1.105	3952	10.031
T5-I	50	0.814	8949	20.207
T6-I	50	0.814	8949	20.207
T1-II	50	0.814	8949	20.207
T2-II	50	0.744	11088	22.553
T3-II	70	0.728	11931	26.405
T4-II	50	0.543	27831	40.508
T5-II	70	0.665	16666	32.501
T6-II	70	0.485	36295	52.717

La instrumentación de los ensayos consistió en los siguientes sensores:

- Células de presión (ver Figura 6)
- Acelerómetros (ver Figura 6)
- Dos hilos extensométricos para medir el desplazamiento de los muelles en las esquinas superior e inferior de la chapa (ver Figura 7 y Figura 8)
- Dos líneas de fibra óptica con sensores FBG cada 25 cm para medir las deformaciones en la chapa metálica y confirmar un comportamiento lineal (ver Figura 7)

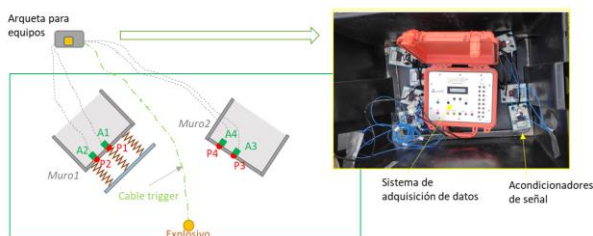


Figura 6. Posición de acelerómetros y células de presión

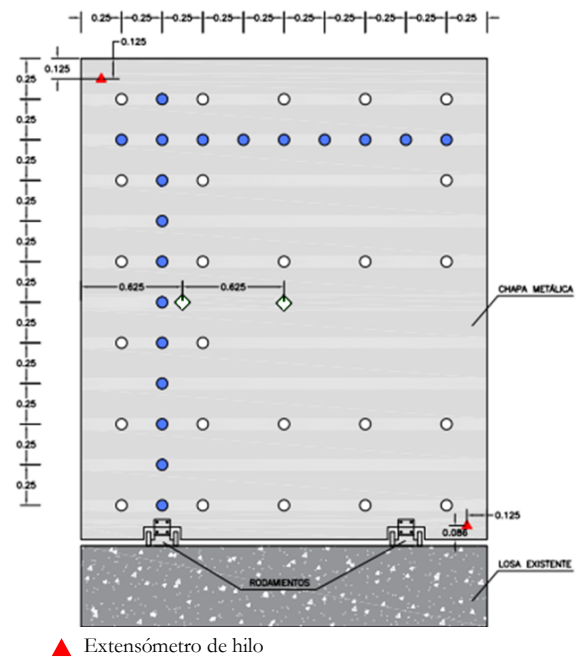


Figura 7. Posición de extensómetros de hilo y sensores de fibra óptica (FBG)

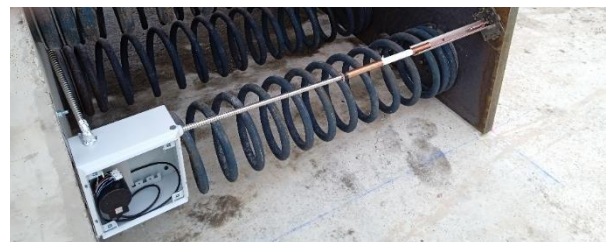


Figura 8. Vista del extensómetro de hilo inferior

3. Resultados de los ensayos



Figura 9. Fotograma de la cámara de alta velocidad para el Ensayo T1-I

Los ensayos se llevaron a cabo en dos fases, en noviembre de 2022 (Figura 9) y en noviembre de 2023, con objeto de utilizar los resultados de la primera fase para identificar posibles errores en

la concepción o posibles oportunidades de mejora.

Los ensayos se desarrollaron razonablemente de acuerdo con lo previsto. Sin embargo, sí se produjeron algunas diferencias significativas y algunos problemas imprevistos.

En el muro protegido, se observó un comportamiento análogo al previsto, de oscilaciones de la chapa frontal respecto del muro protegido. Las vibraciones se pararon con mayor rapidez en la zona inferior del muro debido al rozamiento. Este comportamiento es lógico, porque, aunque el sistema de ruedas utilizado para el muro tiene un rozamiento muy reducido, la superficie de rodadura sí tenía bastantes irregularidades, que además fueron aumentando con el número de ensayos por los daños producidos por las detonaciones y por el propio sistema de rodadura en la losa de apoyo.



Figura 10. Vista del extensómetro de hilo inferior

Los desplazamientos máximos se pudieron medir con cierta precisión tras los primeros ensayos debido a las huellas que fueron dejando las ruedas sobre la losa (ver Figura 10), y se resumen en la **Tabla 3**. Las medidas de los desplazamientos mediante los potenciómetros de hilo solo pudieron hacerse en los 4 primeros ensayos, debido a que para una masa de 50 kg de TNT equivalente de explosivos los sensores resultaron dañados. A modo de ejemplo se muestra uno de los registros en la **Figura 11**.

Tabla 3. Desplazamientos medidos para los 6 ensayos de la primera fase

		d max,muelles [mm]		
		Instrumentación		huella ruedas
Ensayo	Carga Explosiva [kg eq. TNT]	Esq. Inf.	Esq. Sup.	inf, max, ruedas
T1-I	10	130	+55/-55	145
T2-I	20	220/-420	+55/-55	360
T3-I	10	140/-250	+55/-55	-
T4-I	20	250/-300	+80/-80	-
T5-I	50	-	-	759(*)
T6-I	50	-	-	759 (*)

(*) recorrido máximo del muelle

Durante los ensayos se observaron dos comportamientos no previstos inicialmente:

- Por un lado, para las cargas explosivas mayores, se produjo un fenómeno no previsto de despegue de la chapa frontal del suelo. Este fenómeno produjo un impacto en la zona de las ruedas que dio lugar a un daño y eventual fallo del sistema de rodadura (ver **Figura 12**), tras las sucesivas explosiones. En parte el problema se debió a un apoyo desigual de las ruedas y a un diseño insuficientemente robusto
- Por otro lado, se observó un ligero daño en los anclajes del muro a la losa, debido a que la materialización de los apoyos en la primera fase de los ensayos no fue acorde a lo especificado en planos. En lugar de una placa de anclaje de 100x100x25, se dispuso una arandela que se deformó significativamente.

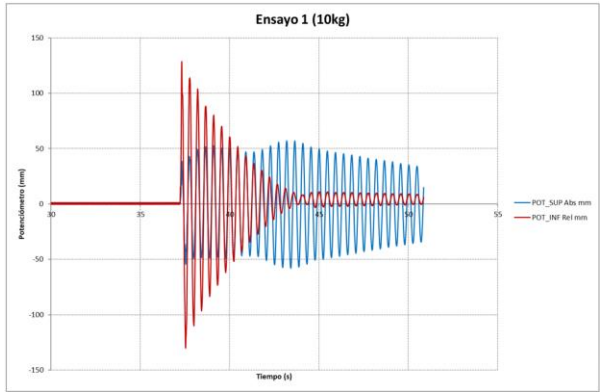


Figura 11. Desplazamiento de los muelles extremos medidos en el primer ensayo

Con objeto de resolver estos problemas, en la segunda fase se duplicó el número de ruedas, introduciendo dos ejes suplementarios y se modificaron los anclajes según los planos iniciales.

A pesar de ello, en la segunda fase de los ensayos volvió a fallar el sistema de rodadura debido a un apoyo desigual de las ruedas. En particular en la posición de las ruedas iniciales se habían formado en la losa de cimentación surcos que hacían que el peso de la chapa fuera soportando, inicialmente, solo por las ruedas nuevas. Estas volvieron a fallar debido a que el sistema no dispone de la ductilidad necesaria para redistribuir la carga sin fallar. Tampoco se resolvió adecuadamente el problema del anclaje debido a la fisuración por retracción y rotura del mortero de nivelación, previamente al inicio de la segunda fase de los ensayos. Por otra parte, en el penúltimo ensayo fallaron totalmente los anclajes del muro sin protección, y éste se desplazó muy significativamente de su posición inicial. Sin embargo, el muro protegido no sufrió ningún daño a pesar de haber recibido 12 cargas explosivas, lo cual demuestra la eficacia del sistema protector. Esto a pesar del fallo del sistema de rodadura. Tras este fallo la energía se disipó en desplazamiento bruscos de la chapa (como demuestran muescas dejadas en la losa de cimentación) y mediante oscilaciones de eje centrado en el punto de apoyo del muro.

En los últimos ensayos se produjo un cierto daño en uno de los muelles, en la esquina inferior. Esto se atribuye, en parte al fallo del sistema de rodadura y en parte a la superación de la capacidad del muelle en tracción, que habría producido plastificaciones en el muelle, y, por tanto, pérdida de forma. Aun así, queda claro que el objetivo de proteger el muro prefabricado se consiguió ampliamente, incluso con distancias escaladas muy pequeñas.



Figura 12. Daños en el sistema de rodadura (fase de ensayos I)

4. Metodología de proyecto

A efectos de proyectar el sistema para unas condiciones específicas se establece una metodología que se resume en la **Figura 13**. El primer paso es definir el escenario, es decir cuál es la carga explosiva que se debe resistir y cuál es la distancia mínima de esa carga respecto de la estructura a proteger. Con estos datos se puede definir la acción. Para ello existen dos niveles de aproximación:

- Utilizar métodos simplificados tales como los descritos en el manual UFC-3-340 del DoD [2]
- Utilizar un programa de que modele la onda de presión mediante dinámica de fluidos (CFD), por ejemplo, VIPER [3]
- Como dato adicional se requiere disponer del espacio que se puede dejar entre la pared y la chapa protectora
- Con estos datos se puede predimensionar la rigidez de los muelles y la masa de la chapa metálica mediante métodos simplificados como el descrito en [4].
- Para verificar el comportamiento del sistema se desarrolla un modelo de elementos finitos. Éste puede o no incluir la estructura a proteger. Si no la incluye, ésta debe ser objeto de una verificación independiente a partir de las

solicitaciones estimadas en el modelo. Por el contrario, si la estructura se incluye en el modelo, y el análisis de esta es no lineal su comportamiento puede evaluarse forma integral. Si el daño que se genera en la estructura es admisible el proceso termina. En caso contrario, se debe redimensionar ya sea la rigidez de los muelles ya sea la masa de la chapa o ambas.

En el caso de la estructura simulada en los ensayos, se desarrolló un modelo utilizando el software SOFISTIK [5]. Tanto el muro de hormigón como la chapa frontal se modelaron utilizando elementos placa de cuatro nodos. El tamaño de los elementos es de $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Esta discretización se considera suficiente dado que el comportamiento no lineal es muy limitado. La chapa está apoyada verticalmente sobre muelles de gran rigidez ($k=1\text{E}+30 \text{ kN/m}^3$). Este apoyo se dispone para poder simular el

rozamiento en las ruedas de los muelles que es función de la carga vertical, y por tanto del peso de la chapa. Los muelles apoyan la chapa y por tanto se dispone de la carga vertical actuante. En los resultados que se presentan a continuación el coeficiente de rozamiento supuesto es del 5%, que corresponde a una hipótesis en la que el sistema de rodadura funciona adecuadamente. La **Figura 14** muestra una vista del modelo. La zapata se apoya en una fila de apoyos trasera que se supone rígida, pero la fila de apoyos que representa los anclajes frontales se modeliza mediante un muelle con rigidez muy elevada a compresión y una rigidez a tracción que representa la rigidez de los anclajes (EA/L) donde se adopta una longitud deformable de 370 mm (el canto de la zapata más la mitad de la longitud de anclaje).

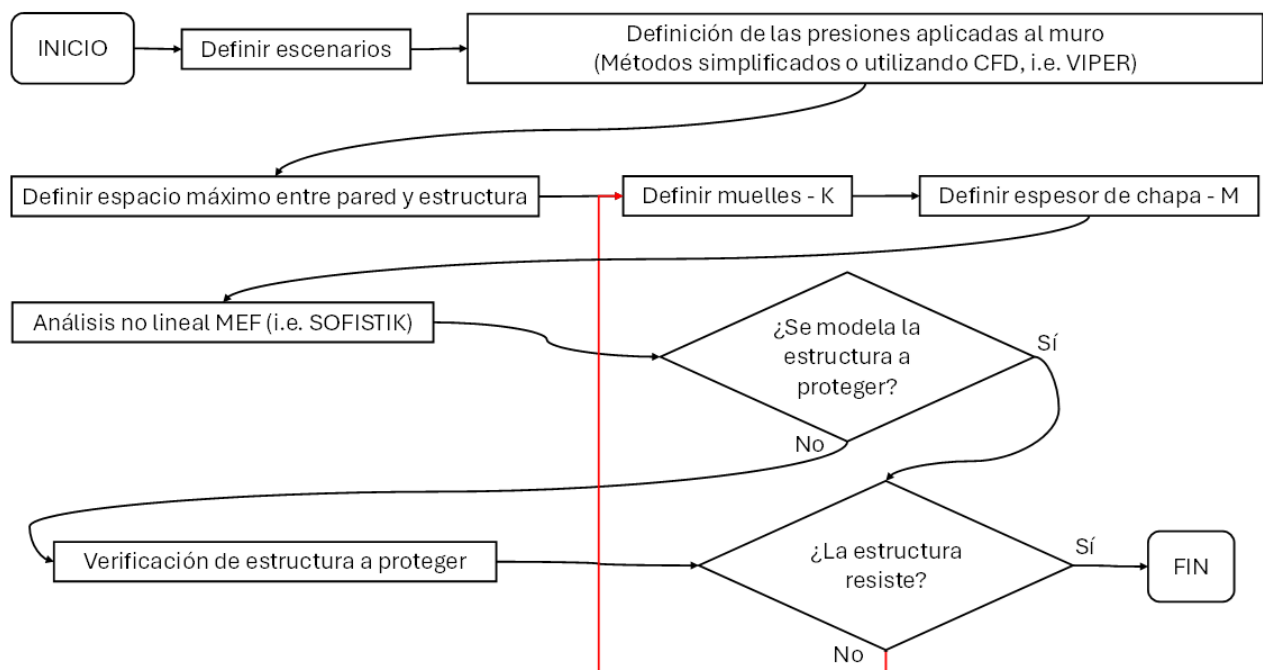


Figura 13. Metodología de proyecto

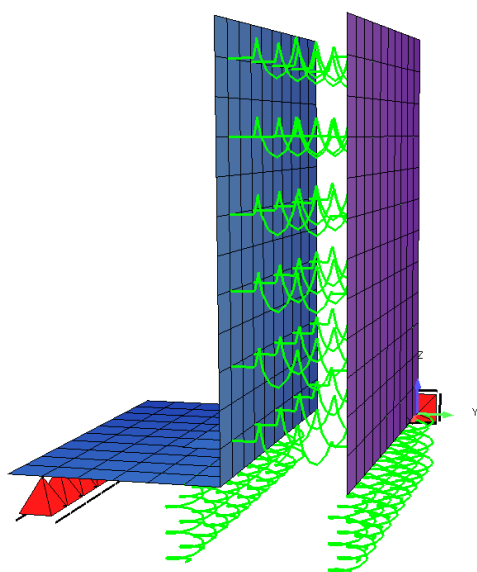


Figura 14. Vista del modelo de SOFISTiK

En cuanto a los materiales, se considera una ecuación tipo Sargin para el hormigón de clase C25/30 una ecuación bilineal para el acero de armar con valores medios de límite elástico de $f_{ym}=538$ MPa y tensión de rotura de $f_{um}=672$ MPa para una deformación del 7.5%. Para el acero estructural se considera una ecuación bilineal con un límite elástico de 355 MPa.

Los muelles de conexión entre chapa y muro se han modelado utilizando una ecuación constitutiva no lineal que tienen en cuenta que el recorrido del muelle se puede agotar en compresión y que el muelle se puede llegar a plastificar en tracción. La fuerza de plastificación en tracción es de 32.8 kN y se produce para un alargamiento de 1325 mm. La ecuación constitutiva se muestra en la **Figura 15**

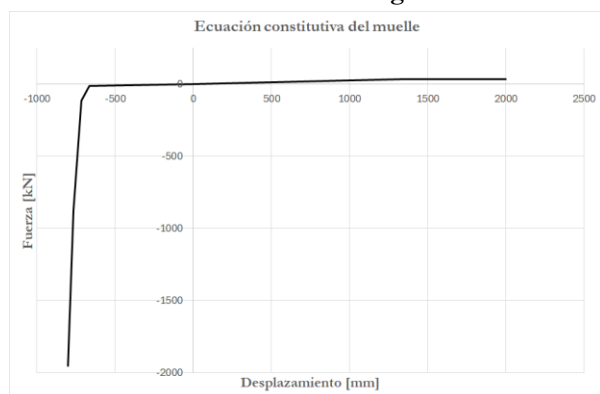


Figura 15. Ecuación constitutiva utilizada para los muelles de conexión en el análisis.

Las presiones se calcularon utilizando VIPER de tal forma que se determina la presión mediante CDF en el centro de cara elemento finito (ver **Figura 16** para la simulación del ensayo T1-I). En el caso del ensayo T1-I, se observan presiones significativamente más elevadas que el DoD, pero eso es debido a que estas presiones se obtienen a partir del impulso fijando una duración constante de la onda de sobrepresiones para todos los puntos debido a limitaciones SOFISTiK. En términos de impulso, el impulso que proporciona VIPER y el del DoD son sensiblemente similares.

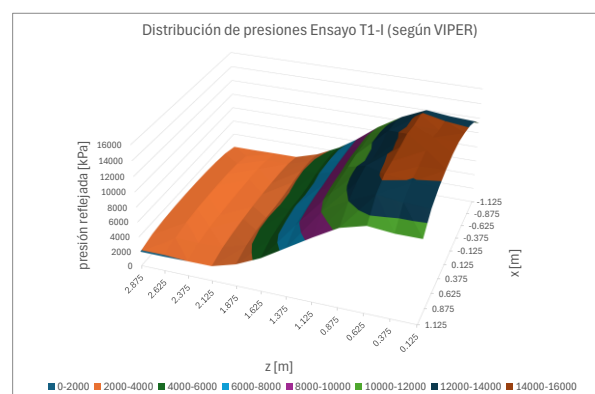


Figura 16. Distribución de la presión reflejada en el ensayo T1-I según estimación de VIPER

En la **Figura 17** se muestra el desplazamiento de los dos hilos extensométricos situados en la esquina inferior izquierda (mirando al muro) y la esquina superior opuesta. Se representa el caso del ensayo T1-I del cual ya se presentó el resultado de las medidas experimentales (**Figura 11**) en la misma escala para que ambos se puedan comparar. Se ve que el modelo captura bien la forma de las vibraciones y relativamente bien también el orden de magnitud. Sin embargo, el amortiguamiento en el ensayo es significativamente mayor. Respecto de los desplazamientos del muelle inferior, el cálculo teórico predice 140 mm frente a 130 mm medidos. Respecto del muelle superior el cálculo teórico predice 27 mm, frente a los 50 mm que se midieron.

En la **Figura 18** se representa el desplazamiento de la esquina superior del muro. Se observa que los desplazamientos máximos son muy reducidos, y, aunque queda una deformación remanente inferior al 1 mm, ésta se debe a la fisuración del muro, que no sufre ningún otro efecto no lineal.

Adicionalmente se presenta en la **Figura 19** y en la **Figura 20** las predicciones para el ensayo más extremo, correspondiente a la carga de 70 kg situada a 2 metros (Ensayo T6-II). Aunque en este ensayo no se pudieron medir los desplazamientos porque los sensores no aguantaron la presión y además no estaba ya en funcionamiento el sistema de rodadura, se presenta este resultado teórico porque con él se puede valorar el comportamiento del muro en un caso extremo, cuando se agota la carrera en compresión de los muelles extremos

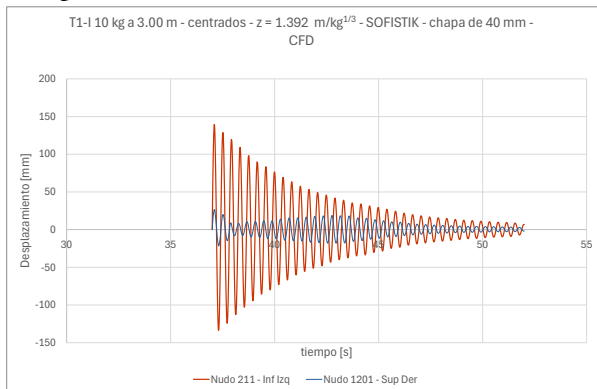


Figura 17. Desplazamientos relativos entre muro y chapa en la posición de los hilos extensométricos para el ensayo T1-I según estimación de SOFISTiK

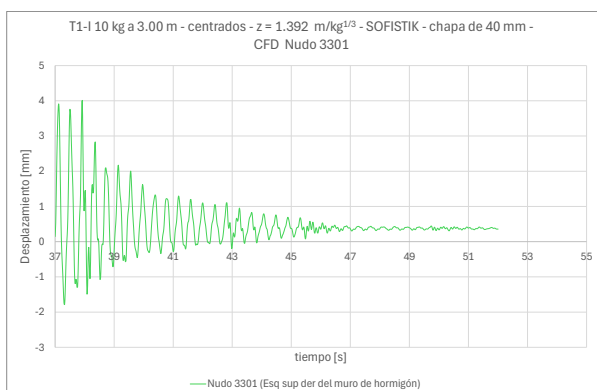


Figura 18. Desplazamiento absoluto en la esquina más solicitada del muro de hormigón para el ensayo T1-I según estimación de SOFISTiK

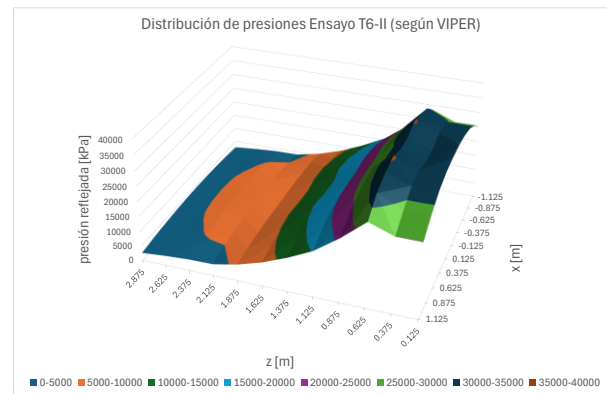


Figura 19. Distribución de la presión reflejada en el ensayo T1-I según estimación de VIPER

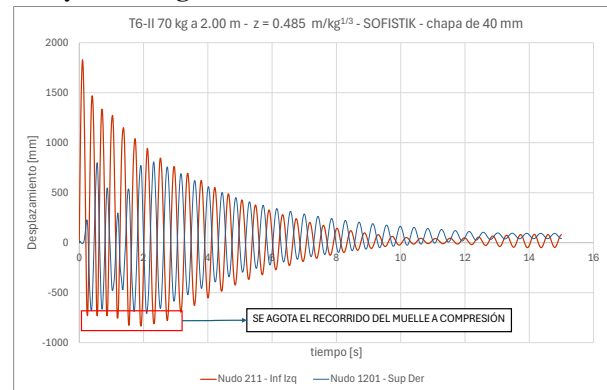


Figura 20. Desplazamientos relativos entre muro y chapa en la posición de los hilos extensométricos para el ensayo T6-II según estimación de SOFISTiK

Se observa en esta figura que los muelles llegan a su capacidad límite en compresión en varios de los ciclos iniciales y que el desplazamiento en tracción es suficiente para plastificar en tracción el muelle de la esquina inferior. Además, se observa que en la zona superior hay una deformación remanente en el muelle. Ésta se observa mejor representando el desplazamiento del nudo superior correspondiente del muro. Este gráfico se representa en la **Figura 21**. Se ve que el desplazamiento máximo es de 240 mm y el desplazamiento remanente de unos 65 mm. Estos valores son elevados, pero podrían considerarse admisibles en una situación tan extrema. Se hace notar que en el ensayo real no se produjo este nivel de daño, pero quizás porque parte de la energía se disipó mediante rozamiento de la chapa con la losa de cimentación al fallar el sistema de rodadura. En

todo caso esta situación se puede mejorar aumentando, por ejemplo, la masa de la chapa.

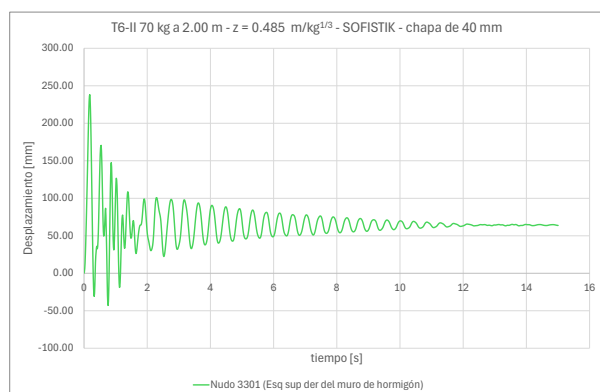


Figura 21. Desplazamiento máximo de la parte superior del muro de hormigón para el ensayo T6-II según estimación de SOFISTiK

5. Conclusiones

A partir de la discusión anterior, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Tanto los ensayos realizados como los estudios teóricos demuestran la eficacia del sistema planteado.
- El sistema requiere una mejora del sistema de rodadura, que debe ser sustituido por un elemento robusto, como, por ejemplo, un cilindro de acero sacrificando el bajo rozamiento del sistema comercial utilizado.
- En cálculo de presiones llevado a cabo con VIPER muestra que hay una variación importante de presiones en el muro con la altura. Este resultado es lógico en cuanto a que la parte inferior del muro recibe la onda de presiones reflejada del suelo, mientras que la parte superior recibe la onda de presiones directamente. Por tanto, para obtener una aproximación razonable cuando las distancias del explosivo al muro protector son bajas es necesario un cálculo de

CFD, siendo la aproximación del DoD demasiado simplificada.

- El modelo de elementos finitos resulta relativamente sencillo y permite evaluar el nivel de daño en el que incurre la estructura tras una explosión, pudiendo determinar no solo las deformaciones máximas en los materiales sino también, y más significativamente, las flechas remanentes.
- En caso de obtener resultados de daño superiores a los admisibles, se puede rediseñar el sistema aumentando, por ejemplo, la masa de la chapa frontal.

Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo en el contexto del Proyecto MADEX (IDI-20211067) parcialmente financiado por CDTI

Referencias

- [1] A. P. Caldentey, *Sistema de protección anti-explosiones para barreras de amortiguamiento*. Patente de la Unión Europea EP3604714B1, 28 03 2018.
- [2] DoD, UFC 3-340-02 *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, Washington D.C.: Department of Defense, 2008.
- [3] VIPER., *Viper Applied Science. Online Manual*:<https://www.viper.as/about>. [Accessed 13 01 2025].
- [4] A. Pérez Caldentey, "New mass-based system for control room protection," in *PROTECT 2019*, Whistler, Canada, 2019.
- [5] SOFOSiK, *SOFISTiK FEA Manual*, <https://docs.sofistik.com/2025/en/fea/index.html>. [Accessed 13 01 2025].