

RESPUESTA DINÁMICA DE VIGAS METÁLICAS SOMETIDAS A IMPACTO

DYNAMIC RESPONSE OF METALLIC BEAMS SUBJECTED TO IMPACT

Fabián Fiengo Pérez^a, Oscar Dip^a, Domingo Sfer^a y Bibiana M. Luccioni^{a,b}

^a*Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina,*
<https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

^b*CONICET, Av. Rivadavia 1917, C1429DDA Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina,*
<http://www.conicet.gov.ar>

Palabras clave: Ensayo de impacto, aceleraciones, fuerza de impacto, propagación de ondas.

Resumen. En este trabajo se estudia numéricamente la respuesta dinámica de vigas metálicas a ensayos de impacto de tipo “Drop Weigth Impact Test” mediante un hidrocódigo comercial. En primer lugar, los resultados numéricos se contrastan con mediciones experimentales de aceleraciones y cargas lo cual permite validar las herramientas y modelos numéricos utilizados. Luego se evalúan la magnitud y duración de las fuerzas de impacto en función de la masa y altura de caída del elemento que impacta y su relación con la historia de aceleraciones de este elemento. El análisis presentado resulta de utilidad a la hora de interpretar resultados experimentales de este tipo de ensayos que se utilizan para caracterizar el comportamiento material y estructural bajo cargas de impacto.

Keywords: Impact test, accelerations, impact force, wave propagation.

Abstract. The dynamic response of metallic beams subjected to “Drop Weigth Impact Test” is numerically studied using a commercial hydrocode in this paper. First, the numerical results are compared with accelerations and loads experimentally measured to validate the numerical and models used. Then, the magnitude and duration of the impact forces are assessed according to the mass and fall height and its relation to the accelerations’ time-history of this element. The presented analysis is useful when interpreting experimental results of this type of tests that are used to characterize both the structural and material behavior under impact loading.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la respuesta dinámica de elementos estructurales sometidos a impacto despertó el interés de científicos e ingenieros durante décadas ya que se trata de un problema de relevancia que se presenta con frecuencia tanto en la industria civil como militar. Por otro lado, la respuesta estructural frente a este tipo de acciones permite inferir el comportamiento del material bajo altas velocidades de carga.

Schweiger (1965), Stronge (2000) y Goldsmith (2001), estudiaron analíticamente la respuesta dinámica de una viga metálica simplemente apoyada sometida al impacto de una esfera de acero y propusieron expresiones analíticas para determinar tanto la fuerza de impacto como el desplazamiento transversal de la viga. Estas expresiones permiten obtener resultados adecuados en el caso de impacto de baja velocidad, en el que se excita predominantemente el primer modo flexional de vibración. Sin embargo, se ha probado experimentalmente que la respuesta material y estructural frente acciones impulsivas es marcadamente distinta de la respuesta estática y, salvo casos muy simples, no puede ser predicha mediante métodos analíticos simplificados. Las herramientas numéricas actuales permiten simular el comportamiento bajo cargas de impacto de elementos estructurales. Sin embargo, los estudios numéricos del problema de impacto disponibles en la bibliografía están orientados principalmente al estudio de la respuesta dinámica de vigas de hormigón simplemente apoyadas. En este trabajo se estudia numéricamente la respuesta dinámica de una viga metálica a ensayos de impacto de tipo “Drop Weight Impact Test” mediante un hidrocódigo comercial, con la finalidad de estudiar en detalle la fuerza de impacto, la distribución de aceleraciones a lo largo de la viga, la reacción en los apoyos y la influencia de la masa que impacta y su velocidad o altura de caída.

2 ESTUDIO EXPERIMENTAL

El espécimen ensayado consistió en una viga de acero de sección transversal cuadrada de 12.7 mm de lado y 1 m de longitud. Fue colocada sobre dos apoyos metálicos de forma tal que estuviese simplemente apoyada, siendo la luz libre entre apoyos igual a 762 mm (ver Figura 1).

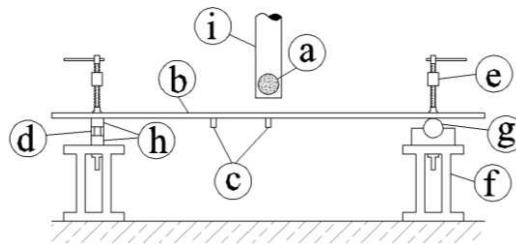


Figura 1: Montaje del ensayo de impacto a) Esfera de acero b) viga de acero c) acelerómetros d) anillo de fuerza e) prensa tipo “c” f) vigas de acero debajo de los apoyos g) rodillo de acero que emula el apoyo móvil h) planchuelas metálicas i) tubo de pvc.

Como proyectil se empleó una esfera de acero de 47.4 mm de diámetro y 441 g de masa. Para lograr que la esfera impacte en la mitad de la luz libre, se empleó como guía un tubo de PVC de 60 mm de diámetro y 1 m de longitud. Se fijó el tubo a un trípode y se verificó su verticalidad y alineación con respecto a la viga por medio de un nivel de mano electrónico y una plomada. Para evitar que la viga se levante de los apoyos durante el impacto, fue fijada por medio de prensas tipo “C” a vigas de acero de 60 cm de longitud y 52 Kg de masa ubicadas debajo de los apoyos.

Para alturas de caída libre de la esfera de 1.0 y 1.5 m, se midieron la fuerza de impacto y las aceleraciones tanto en la mitad de la luz libre como a 254 mm del apoyo izquierdo. No se

pudo registrar las aceleraciones para alturas de caída libre mayores a 1.5 cm ya que sus valores superaban la capacidad de los acelerómetros empleados. Por otra parte, para alturas de caída libre de la esfera de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 90 cm se midió la reacción en el apoyo izquierdo. Para medir las aceleraciones, se empleó un acelerómetro piezoeléctrico PCB modelo 353B03 capaz de registrar aceleraciones de hasta 500 veces la aceleración de la gravedad (g) y provisto de una sobrecarga de protección de 10000g. Tanto la reacción en el apoyo como la fuerza de impacto se midieron con un anillo de fuerza piezoeléctrico PCB modelo 203B. En la [Figura 2](#) se muestra el montaje del anillo de fuerza sobre la viga de acero para medir la fuerza de impacto.

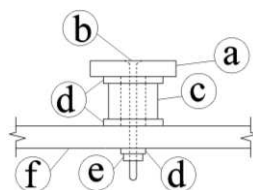


Figura 2: Montaje del anillo de fuerza sobre la viga de acero a) planchuela de acero de 9 mm de espesor b) tornillo de cabeza plana c) anillo de fuerza d) arandelas metálicas e) tuerca metálica f) viga de acero.

Tanto para el acelerómetro como para el anillo de fuerza se utilizó un acondicionador de señales PCB modelo 482C05 que se conectó a una placa de adquisición de señales *Measurement Computing* modelo USB-1608FS. El procesamiento de las señales se realizó con un software de desarrollo propio. Para obtener resultados con la mayor precisión posible y teniendo en cuenta la reducida duración del impacto, se empleó el equipo de adquisición de señales a su máxima capacidad. Se utilizó en cada ensayo un solo canal de la placa de adquisición de señales con una tasa de muestreo de 50×10^3 Hz.

3 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

La modelación numérica consistió en un análisis dinámico explícito llevado a cabo por medio del hidrocódigo LS-Dyna ([LSTC, 2018a](#)). Se modelaron tanto la viga de acero como la esfera. Se restringieron los desplazamientos de los nodos de la malla de la viga coincidentes con los apoyos, de forma tal de simular un apoyo fijo de un lado y uno móvil del otro (ver [Figura 3](#)).

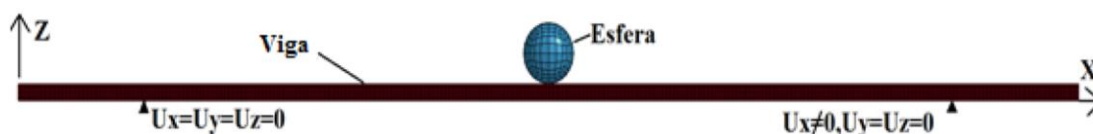


Figura 3: Modelo de elementos finitos del ensayo de impacto realizado.

Tanto la esfera como la viga de acero fueron modeladas como materiales elásticos lineales, con módulo de elasticidad igual a 2.1×10^5 MPa, un coeficiente de Poisson de 0.3 y una densidad de 7900 Kg/m^3 . Para definir la densidad de la malla de elementos finitos se realizó un estudio de convergencia, a partir del cual se decidió discretizar la viga con 78700 elementos cúbicos de 1.27 mm de lado.

Se ubicó a la esfera 0.2 mm por encima de la viga con la finalidad de que no estuviera inicialmente en contacto con la misma al iniciar el análisis. No se dejó caer la esfera desde las alturas desde las cuales se la dejó caer en los ensayos experimentales ya que el fenómeno de caída libre es lento en relación al problema de impacto y, si se lo simula con un programa explícito, se requiere un tiempo excesivo e innecesario de cálculo. Por este motivo, se le asignó a la esfera velocidades iniciales de forma tal que después de recorrer los 0.2 mm que la

separaban inicialmente de la viga impactara contra la viga con la misma velocidad que en los ensayos experimentales.

Tanto para la viga como para la esfera se usaron elementos tipo *brick* de ocho nodos y un solo punto de integración. Su uso reduce significativamente el tiempo computacional pero conlleva la aparición de modos de deformación con energía interna de deformación nula. Para corregir este problema, se empleó la técnica de estabilización *hourglass* Flanagan – Belytschko tipo rigidez (LSTC, 2018a).

Para el contacto entre la esfera y la viga se empleó un algoritmo de penalización que calcula la rigidez del contacto teniendo en cuenta las masas de los nodos de la esfera y de la viga que entran en contacto. En este algoritmo las superficies de contacto son detectadas automáticamente a partir de la geometría de las partes que impactan.

Se consideró en el modelo el efecto de la fuerza de gravedad. Es conocido que esto produce oscilaciones espurias en la respuesta incluso antes de que la esfera impacte sobre la viga. Este problema fue corregido por medio de un procedimiento de relajación dinámica que se lleva a cabo antes del análisis del problema de impacto. Adicionalmente se aplicó a la viga de acero amortiguamiento tipo Rayleigh, ya que se observó en los registros experimentales que las aceleraciones se iban amortiguando en el tiempo. El coeficiente de amortiguamiento correspondiente a la matriz de masa a_0 se determinó por medio de la ecuación (1) (LSTC, 2018b).

$$a_0 = 2w_1 \quad (1)$$

Siendo w_1 la frecuencia fundamental de la viga que puede ser determinada por medio de la ecuación (2).

$$w_1 = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot A}} \quad (2)$$

Donde l es la luz libre entre apoyos, E es el módulo elástico del acero, ρ es la densidad del acero y A y J son respectivamente el área y el momento de inercia de la sección transversal de la viga. Para determinar el coeficiente de amortiguamiento correspondiente a la matriz de rigidez a_1 se empleó la ecuación (3) (Chopra, 2014).

$$a_1 = \zeta \frac{2}{w_i + w_j} \quad (3)$$

Donde w_i y w_j son respectivamente la frecuencia más baja y la más alta del rango de frecuencias en el que se aplicará este amortiguamiento. De acuerdo con (Chopra, 2014), el amortiguamiento no se mantiene constante en el tiempo, sino que para frecuencias mayores a w_j su valor aumenta. Se asignó a la frecuencia w_i el valor de la frecuencia fundamental $w_1 = 320.96$ rad/s. Para determinar w_j se realizó un análisis de Fourier a las aceleraciones registradas experimentalmente y se le asignó el valor de 5.42×10^4 rad/s ya que es uno de los más altos que se midió. De esta forma se cubre un rango amplio de frecuencias entre w_i y w_j .

Se asignó a la fracción del amortiguamiento crítico ζ un valor de 5% que es común para el análisis de estructuras (Chopra, 2014). De esta forma, los valores utilizados para definir el amortiguamiento de Rayleigh son $a_0 = 641.92$ rad/s y $a_1 = 1.8341 \times 10^{-6}$ s.

4 COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Fuerza de impacto

En la Figura 4 se presentan la variación de la fuerza de impacto en el tiempo medida en los ensayos mediante el anillo de fuerza (Fig.2) y su comparación con los resultados numéricos y

analíticos para dos alturas de caída. Tanto la magnitud del pico como las ramas prepico de las respuestas numéricas son similares a las experimentales. Existe cierta diferencia en las ramas postpico lo cual podría atribuirse a efectos no deseados producidos por el dispositivo empleado para la medición de la fuerza de impacto. La duración del contacto entre la esfera y la viga fue aproximadamente 4×10^{-4} s para ambos ensayos.

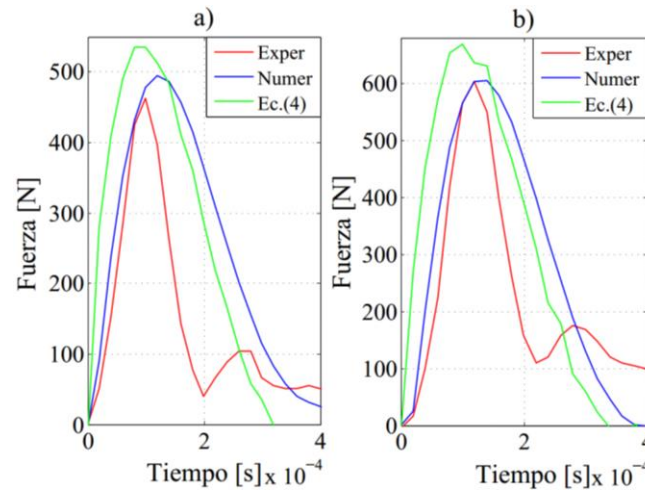


Figura 4: Fuerzas de impacto para diferentes alturas de caída libre de la esfera a) altura de caída: 1 cm b) altura de caída: 1.5 cm.

Durante la medición experimental de la fuerza de impacto, existió la posibilidad de dañar el equipo que se empleaba; por este motivo se estudió un procedimiento alternativo para obtener esta fuerza. En este procedimiento se intentó obtener la fuerza de impacto por medio de la aceleración de la esfera que impacta a la viga y se dedujo la ecuación (4) partir de la segunda ley de Newton.

$$F = m(a_e - g) \quad (4)$$

Donde m es la masa de la esfera, a_e es su aceleración y g es la aceleración de la gravedad. Durante los ensayos experimentales no fue posible montar un acelerómetro en la esfera, por este motivo la aceleración a_e fue obtenida de las modelaciones numéricas realizadas y corresponde a un nodo de la esfera ubicado en su parte central. Las fuerzas de impacto obtenidas por medio de la ecuación (4) se han representado también en la Figura 4 y puede observarse que son mayores que las registradas experimentalmente. Habel y Gauvreau (2008) y Yoo et al (2015), obtuvieron experimentalmente la fuerza de impacto a partir de la aceleración del proyectil. Cabe indicar que se aplicó el procedimiento propuesto a ensayos con diferentes velocidades de impacto del proyectil y los resultados obtenidos (no presentados en este trabajo) permitieron apreciar que este procedimiento da buenos resultados para velocidades de impacto bajas. La diferencia entre los resultados obtenidos por medio de la ecuación (4) con los numéricos y los experimentales aumenta para velocidades de impacto mayores ya que la esfera no es rígida y la aceleración de la misma incluye, no solo la aceleración de cuerpo rígido, sino también la aceleración debida a la deformación de la misma.

4.2 Aceleraciones

En las Figuras 5 y 6 se representa la historia de aceleraciones medidas en distintos puntos de la viga durante los ensayos y su comparación con los resultados numéricos. En general, se aprecia que los resultados numéricos aproximan bastante bien los resultados experimentales. El análisis de Fourier de las aceleraciones experimentales de la altura de 1cm, permitió apreciar

que sus frecuencias tienen amplitudes más altas que las frecuencias de su contraparte numérica. Por su parte, el análisis de Fourier de las aceleraciones de la altura de 1.5 cm mostró resultados similares. Las diferencias entre resultados numéricos y experimentales son más marcadas en los registros de aceleraciones del centro de la viga y pueden atribuirse a la diferencia entre la idealización que se hizo de los apoyos en el modelo numérico y los dispositivos utilizados en los ensayos que incluso se ajustaban a mano antes de los mismos.

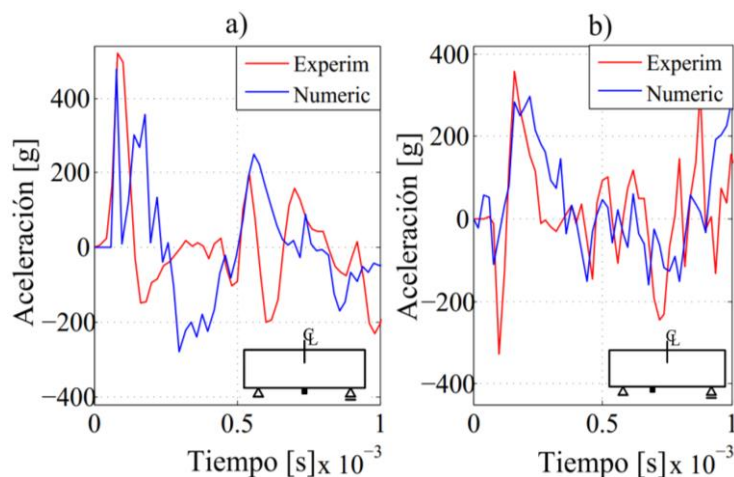


Figura 5: Aceleraciones en la viga para una altura de caída libre de la esfera de 1 cm a) medidas en la mitad de la luz libre entre los apoyos b) medidas a una distancia de 254 mm del apoyo izquierdo.

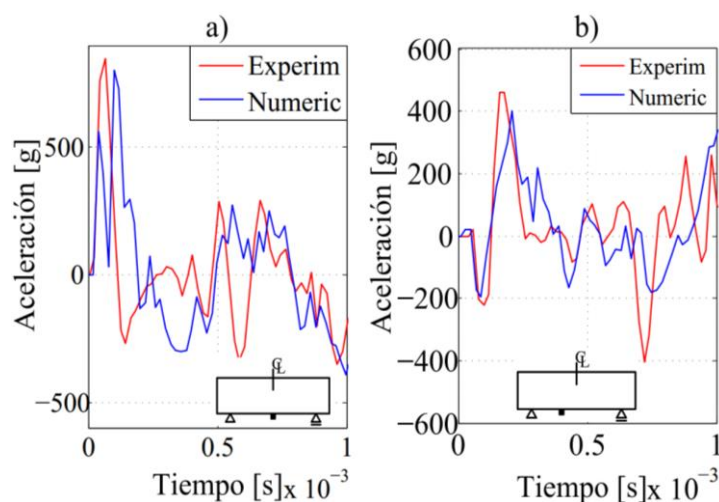


Figura 6: Aceleraciones en la viga para una altura de caída libre de la esfera de 1.5 cm a) medidas en la mitad de la luz libre entre los apoyos b) medidas a una distancia de 254 mm del apoyo izquierdo.

4.3 Cálculo de desplazamientos transversales de la viga

Para obtener el desplazamiento transversal de la viga se realizó la doble integración de las aceleraciones experimentales medidas en la mitad de la luz libre entre apoyos mediante la regla del trapecio. En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos de esta forma a partir de los resultados experimentales y su comparación con los resultados numéricos. Para la altura de 1 cm (Fig. 7a), los desplazamientos numéricos son ligeramente mayores a los experimentales. Por otra parte, para la altura de 1.5 cm (Fig. 7b) ambos resultados son similares. Las diferencias entre desplazamientos numéricos y experimentales se deben fundamentalmente a las diferencias ya observadas en los respectivos registros de aceleración.

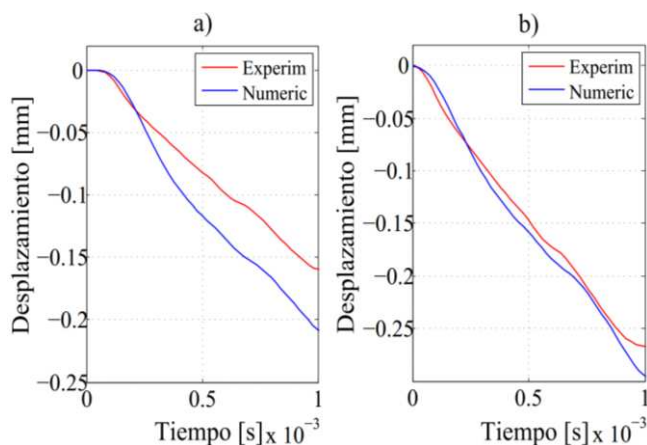


Figura 7: Desplazamiento transversal de la viga medido en la mitad de la luz libre entre apoyos, para diferentes alturas de caída libre de la esfera a) altura de 1 cm b) altura de 1.5 cm.

4.4 Fuerza de impacto y reacción en los apoyos

En las [Figura 8](#) se representa la fuerza de impacto y su comparación con las reacciones de los apoyos (ambos resultados son numéricos). En la [Figura 8a](#) se aprecia que existe un tiempo de retraso de aproximadamente 7×10^{-5} s entre la fuerza de impacto y la reacción en un apoyo. Analíticamente se determinó que este tiempo es similar al que tarda la onda elástica en recorrer la distancia "d" que existe entre el lugar donde la esfera impacta a la viga y el apoyo donde se mide la reacción. [Schwieger \(1965\)](#) indica que el tiempo de retraso entre las reacciones y la fuerza de impacto, permite considerar que las condiciones de borde empleadas en el análisis no influyen en la fuerza de impacto; ya que las ondas elásticas que se propagan hacia los apoyos llegan poco antes de que el impacto haya finalizado y retornan al sitio de impacto después de finalizado el mismo. En la [Figura 8b](#) se observa que la fuerza de impacto es mayor a la suma de las reacciones de ambos apoyos.

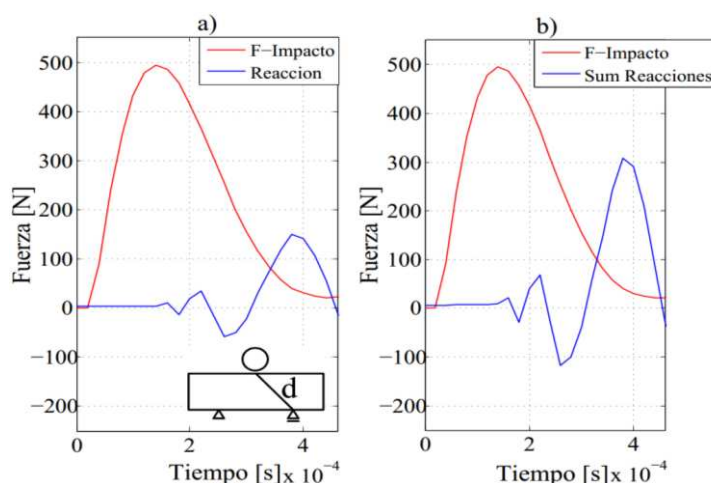


Figura 8: Fuerza de impacto y reacciones en los apoyos para una altura de caída libre de la esfera de 1 cm a) fuerza de impacto vs. reacción en un apoyo b) fuerza de impacto vs. suma de las reacciones de ambos apoyos.

4.5 Reacción en los apoyos

En la [Figura 9](#) se presentan la variación en el tiempo de las reacciones de apoyo registradas en los ensayos y su comparación con los resultados experimentales. El cambio de signo en estas reacciones evidencia la vibración de la viga que tiende a levantarse de los apoyos aun cuando

está restringida. Se observa que el pico negativo de los resultados numéricos crece con la altura de caída de la esfera. Sin embargo, los registros experimentales muestran un plafón bastante menor del lado negativo. Esto se debe a que previo a cada ensayo de impacto se ajustaban las prensas tipo “C” descritas en el apartado 2 de este trabajo. Esto impedía que la viga se levante del apoyo y como la celda de carga mide por deformación, el ajuste limitaba la fuerza registrada en la misma o, dicho de otra forma, el resto de la fuerza era soportada por la parte superior de la mordaza.

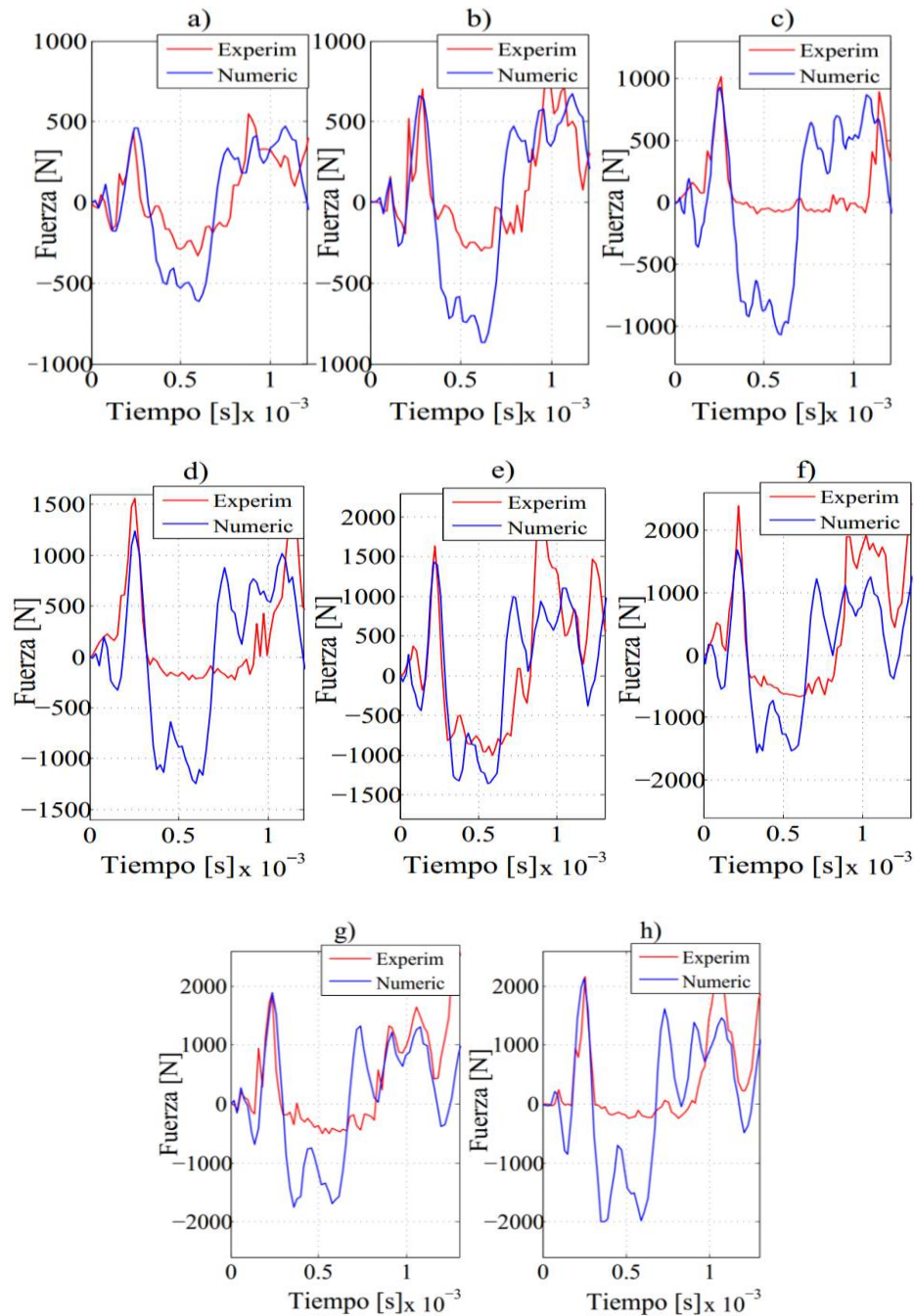


Figura 9: Reacción en el apoyo izquierdo para diferentes alturas de caída libre de la esfera a) altura de 10 cm b) altura de 20 cm c) altura de 30 cm d) altura de 40 cm e) altura de 50 cm f) altura de 60 cm g) altura de 70 cm h) altura de 90 cm

4.6 Influencia de la masa del proyectil y de su velocidad en la fuerza de impacto

En este apartado se estudió numéricamente la influencia de la velocidad y la masa de la esfera en la fuerza de impacto. Para este fin se modelaron dos series de ensayos. En la primera, se aumentó gradualmente la altura de caída libre de la esfera desde 1 cm hasta 50 cm y se mantuvo fija su masa. En la segunda serie, se aumentó la masa de la esfera hasta 50 veces su valor inicial de 441 gr y se fijó la altura de caída libre en 1 cm. Las series se diseñaron de manera que cada uno de los ensayo de la primera serie tuviera la misma energía potencial de caída que los de la segunda serie. En la [Figura 10](#) se muestran los resultados obtenidos. Las fuerzas de impacto fueron normalizadas con respecto al pico de la fuerza de impacto obtenida para 1 cm de altura ($F_0 = 495 \text{ N}$).

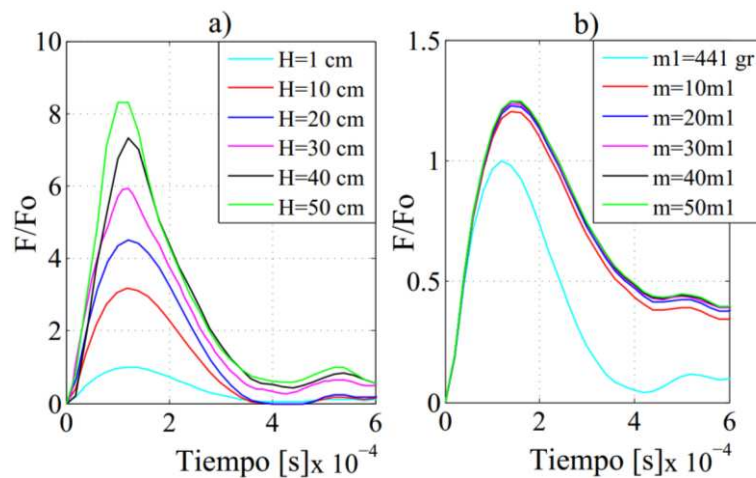


Figura 10: Análisis de la influencia de la velocidad y masa de la esfera en la fuerza de impacto. a) masa de 441 gr fija, altura variable b) altura de 1 cm fija, masa variable.

En la [Figura 10a](#) se observa que la magnitud de la fuerza de impacto crece con el aumento en la altura de caída libre y por ende de la velocidad de impacto. Por su parte, en la [Figura 10b](#) se aprecia que las fuerzas de impacto no crecen significativamente cuando se incrementa la masa del proyectil por arriba de un cierto valor.

En la mayoría de los casos analizados en la [Figura 10](#) la fuerza de impacto no se anula en el rango de tiempo graficado. Debido a la flexibilidad de la viga, luego del impacto, el proyectil y la viga permanecen en contacto vibrando juntos. Este efecto se observa también en los resultados experimentales mostrados en la [Figura 4](#). Cuando se considera que la viga es idealmente rígida, como en la ecuación (4), la duración del contacto es menor y luego del impacto, la fuerza de impacto se anula (ver [Figura 4](#)). El tiempo de contacto depende, tanto de la rigidez de los cuerpos que impactan, como de la masa y altura de caída del proyectil (ver [Figura 10](#)).

5 CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El modelo numérico empleado permite reproducir adecuadamente el comportamiento dinámico de la viga de acero sometida a impacto y resulta útil para el diseño de los ensayos de impacto y la interpretación de los resultados.
- Resulta factible obtener la fuerza de impacto a partir de las aceleraciones de la esfera.
- La comparación de las reacciones y aceleraciones numéricas y experimentales muestra que debe prestarse especial atención al diseño de los dispositivos que fijan la viga a los apoyos, ya

que las vibraciones ocasionadas por los impactos provocan que la viga se levante de los apoyos.
- Es importante conocer la forma en que trabajan los apoyos si se quieren usar los registros de las aceleraciones o reacciones para extraer conclusiones sobre el comportamiento estructural o material frente a cargas de impacto.

- El estudio de la influencia en la fuerza de impacto de la altura de caída y la masa de la esfera, muestra que la altura de caída que determina la velocidad de impacto es el factor que más influye en la magnitud de esta fuerza. Por otra parte, la masa de la esfera es el factor que más influye en la duración del contacto entre la esfera y la viga.

REFERENCIAS

Chopra, A., K., *Dinámica de estructuras*, Pearson, 2014.

Goldsmith, W., *Impact the theory and physical behavior of colliding solids*, Dover Publications Inc., 2001.

Habel, K., Gauvreau, P. Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC) to impact and static loading. *Cement and Concrete Composites*, 30:938-946, 2008.

LSTC, *LS-Dyna Theory manual*, Livermore Software Tech. Corp., 2018a.

LSTC, *LS-Dyna Keywords user's manual*, Livermore Software Tech. Corp., 2018b.

Schweiger, H., A simple calculation of the transverse impact on beams and its experimental verification. *Experimental Mechanics (1965)* 5:378, <https://doi.org/10.1007/BF02326086>

Stronge, W., J., *Impact Mechanics*, Cambridge University Press, 2000.

Yoo, D-Y., Banthia, N., Kim, S-W y Yoon, Y-S., Response of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 126:233-245, 2015.