

Modelos físicos y numéricos para la reconstrucción de hechos en ciencia forense: derrumbe de edificios



V. Torres Zúñiga¹, José Guadalupe Bañuelos Muñeton^{1,2}

¹Licenciatura de Ciencia Forense, Facultad de Medicina, UNAM, Ciudad de México, México.

²Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET-UNAM.

E-mail: vicentz@gmail.com

(Recibido el 20 de febrero de 2016, aceptado el 11 de abril de 2017)

Resumen

Analizamos un video del colapso de una estructura del complejo de las torres-gemelas, del año 2001. Encontramos que la aceleración de su parte superior se puede modelar adecuadamente como una caída libre. Para profundizar el estudio utilizamos tres modelos complementarios: en videos públicos similares, un modelo físico y una simulación computarizada. De hecho, de modo comparativo se analizaron otros cinco videos, de estructuras de más de 10 pisos, derrumbadas (de modo controlado) por medio de explosivos; encontramos que por momentos, algunas de sus secciones presentan un comportamiento dinámico similar. También se construyó un modelo físico simple (constituido por 6 plataformas y 12 pilares abatibles); por medio de un video-análisis en *Tracker* encontramos, una vez más, que la plataforma superior cae libremente. Finalmente, utilizamos una extensión para *Blender* para modelar cualitativamente la mecánica en la demolición de estructuras virtuales. Observamos que la simulación es congruente con lo observado los otros modelos. En todos los casos encontramos zonas y lapsos donde el colapso presenta un efecto mínimo de torca; es decir, una dinámica uniformemente acelerada. Con todo, el resultado más notable es la medición de aceleraciones cercanas a 9.8 m/s^2 . Tanto el análisis del video inicial, como los dos modelos complementarios, representan una propuesta didáctica para una actividad integral del tema de mecánica, en un contexto de una clase que conjunta las áreas de la física aplicada con la ciencia forense.

Palabras clave: Física forense, análisis de la demolición de edificios, modelo físico simple del colapso del WTC-2001.

Abstract

We analyze a video of the collapse of a structure of the World-Trade-Center, 2001. We found that the acceleration of its top can be adequately modeled as a free fall. To extend the study, we used three complementary models: 1) in similar public videos, 2) in a physical model, and 3) in a virtual model. In fact, in a comparative way, other five videos of structures over 10 floors, collapsed (in a controlled mode) by explosives were analyzed. We found that at times, some sections have a similar dynamic behavior. A simple physical model (consisting of 6 platforms and 12 folding pillars) was also built; by means of a video analysis on *Tracker*; once again, we found that the upper platform falls freely. Finally, we use *Blender*-*Python* to encode a virtual demonstration of higher and more sophisticated structures than the physical model; We observed a similar behavior, however, only in part of the collapse. In all cases, we found areas and times where the collapse has a minimum torque. However, the most important result in this study is the measurement of accelerations close to g . Both the initial video analysis, as the three complementary models, represent a didactic proposal for an integral activity of mechanics, in the context of a class that combines the areas of physics and forensic science.

Keywords: Physical forensic, Analysis of building demolition, simple physical model WTC-2001 collapse.

PACS: 01.50.Wg, 45, 46.50.+a, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2013, en la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM se aprobó el plan de estudios de la Licenciatura en Ciencia Forense LCF. Con un modelo educativo vanguardista que busca ayudar a mejorar el área de la impartición de justicia nacional. Entre sus asignaturas de primer semestre se encuentra: Física Mecánica. Esta materia requiere introducir temas de biofísica e ingeniería

con un enfoque aplicado a sucesos de interés forense. Es decir, donde la aplicación del conocimiento y métodos, propios de la física, se vinculen en la resolución de problemas de interés del área judicial y penal.

Encontrar tal punto de vista (tan multidisciplinar) es poco frecuente en los actuales libros de texto o publicaciones especializadas a nivel didáctico sobre física aplicada.

En la literatura se pueden encontrar algunas propuestas educativas sobre tiro parabólico donde están involucradas

personas [1], el uso de péndulos balísticos para medir la velocidad de impacto de proyectiles [2], colisiones inelásticas entre modelos de automóviles [3], o debilitamiento de materiales ante esfuerzos [4]. Sin embargo, su desarrollo es demostrativo (generalmente cualitativo) y poco escalable; es decir, la propuesta muestra pocas directrices para incrementar la profundidad de la investigación.

Como ejemplo concreto, encontramos las propuestas de análisis del comportamiento dinámico de un edificio ante un terremoto [5] o el derrumbe de una chimenea alta [6]. Ambas se formulan desde una perspectiva de la física o la ingeniería, pero en ningún caso se introduce el componente forense *per se*.

En este trabajo, proponemos el video-análisis dinámico del colapso del *World-Trade-Center* (WTC-2001); esta actividad es el desencadenante de una investigación didáctica basada en modelos comparativos y escalables. Es decir, después de estudiar la mecánica del WTC-2001 se analizan videograbaciones similares en demoliciones controladas, y posteriormente se elabora un modelo físico simple de un edificio (basado en columnas y plataformas) de hasta 10 niveles.

I. OBJETO DE ESTUDIO Y MODELOS UTILIZADOS

A. Estudio del video de la caída del WTC-2001

La ciencia forense es un campo multidisciplinar donde el objeto de estudio es el indicio [7]. En una etapa de la actividad forense (en la mecánica de hechos) se debe "reconstruir un suceso ocurrido a partir de las huellas encontradas en el presente" [8]. Por ejemplo, los videos, disponibles en *YouTube* [9], del colapso del WTC-2001, cuentan con las típicas características propias del objeto de estudio en ciencia forense: constituido de datos parciales y del que es inviable la realización de experimentos directos. Es decir, solo conocemos algunos parámetros estructurales determinantes en la caída del edificio. Además, es impráctico la reconstrucción del rascacielos para posteriormente analizar su demolición. Sin embargo, como en otros campos científicos —*e.g.* astronomía— podemos recurrir a modelos y observaciones sistematizadas para obtener datos significativos. Adicionalmente a su importancia histórica, la caída de las "torres gemelas" es interesante por una dinámica poco vista: un rascacielos derrumbándose verticalmente sobre sus pisos, con un mínimo de efectos angulares.

B. Método de análisis de los videos

Por medio del software gratuito de análisis de video: *Tracker*, estudiamos la dinámica de la caída del WTC-2001, siguiendo el siguiente proceso:

1) Transformación de perspectiva original a una vista perpendicular, respecto al punto de referencia de la cámara.

2) Adecuación del eje coordenado y del punto de origen, marcando la esquina superior-derecha del edificio. El eje-*X* es paralelo a la dirección de la línea superior de la estructura del edificio.

3) Colocación de una vara vertical de calibración, a modo de testigo métrico. Por convención, un piso equivale a 3.5 m. Si bien, por normas internacionales, un piso debe ser mayor a 2.6 m [10], la regulación omite considerar el grosor de los materiales que forman el piso. Además, inferimos que esta medida se aproxima a la utilizada ampliamente en la arquitectura moderna de rascacielos.

4) Adquisición de datos. Registrando los puntos de interés cuadro a cuadro.

7) Análisis de datos recabados.

5) Comparación de los parámetros calculados con base a un marco teórico.

C. Estudio de videos de edificios demolidos mediante explosivos

La caída del WTC-2001 fue un evento único. Sin embargo, se puede comparar la dinámica de su caída observando otras videograbaciones similares. Por ejemplo, en edificios de más de 10 niveles, derrumbados de modo controlado utilizando explosivos. Localizamos y descargamos cinco videos (de la plataforma *YouTube* [11]) donde se presentaba la estructura completa durante todo el evento de demolición. A cada video, se le realizó el proceso de adecuación y registro de datos mencionado anteriormente.

D. Estudio de modelo físico sencillo

La comparación entre el video-análisis de un evento particular y otros controlados es un ejemplo de estudio a partir de modelos. Sin embargo, es insuficiente en el desarrollo de una representación más cercana a la realidad del objeto de estudio. Por ello se construyó un modelo físico, constituido de plataformas de acrílico ($0.3 \times 15 \times 2.5$ cm³) —con una abertura interior, para evitar efectos de arrastre vertical por fricción entre la plataforma y el aire; cada plataforma es sostenida por pilares de PVC (longitud = 6.5 cm, $\varnothing = 1/2$ in). Con este material se construyeron estructuras de hasta 6 niveles (cada nivel con dos pilares). De modo sistemático y súbito, los pilares de un nivel se retiraban, mientras la dinámica de la caída de los pisos superiores se videogrababa (usando una cámara Canon EOS, Rebel-T1i). Después de cada evento, se reconstruía la estructura; para después repetir el proceso en el nivel inmediato superior. Esto hasta que el proceso abarcó los seis niveles.

En este caso, el control de variables en el colapso del modelo físico es mayor que en los casos de los videos descargados de Internet. Así, al abatir ambos pilares de un nivel se trató de imprimirles una gran velocidad horizontal, con el fin de evitar añadir un efecto de torca. Al lograrse, es suficiente videograbar la sección longitudinal de la estructura, y analizarla mediante el proceso mencionado en párrafos anteriores.

E. Estudio de modelo virtual

Finalmente, con fines cualitativos para complementar el estudio, se programó una animación utilizando un software gratuito, que permite crear modelos dinámicos 3D: *Blender*. Extensiones del programa [12] permiten generar una estructura virtual y evento de caída, similar al del WTC-2001. Mediante sus algoritmos gráficos y físicos, la torre se puede derribar para observar su dinámica durante la caída. Si bien el modelo computacional simula con alta precisión y exactitud la cinemática del derrumbe estructural, nosotros lo utilizamos en este trabajo para introducir cualitativamente su uso.

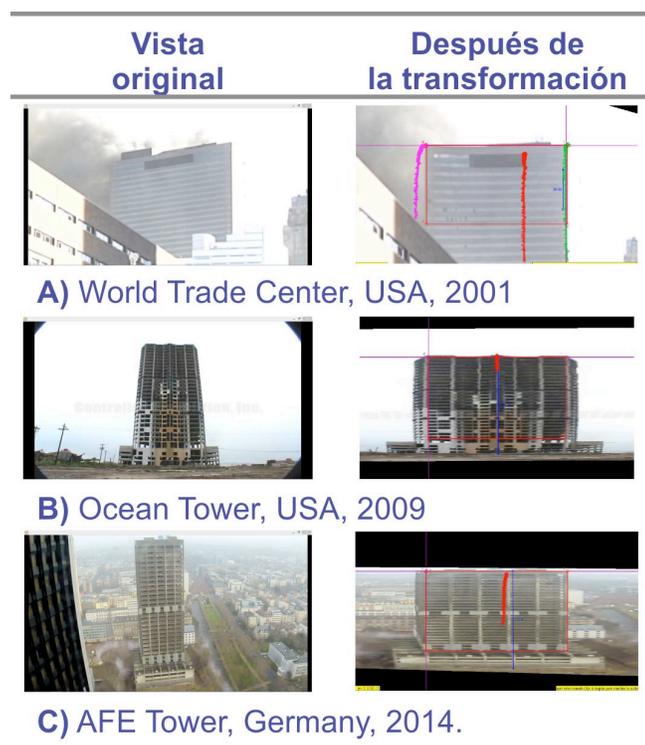


FIGURA 1. Vistas originales y cambios de perspectiva de tres videos analizados. Originalmente, las perspectivas de cada video eran diferentes, las funciones propias de *Tracker* permiten el ajuste de las imágenes que proporciona equivalencia entre los análisis.

II. RESULTADOS

A. Transformación de las perspectivas en videos

La Fig. 1 A) muestra una imagen del video original del evento del WTC-2001, que se compara con el ajuste de perspectiva; además en este cuadro se exhiben las marcas de los datos adquiridos. Mientras que la Fig. 1 B)-C) presenta dos casos con perspectivas originalmente diferentes. Después de los ajustes los tres casos son

B. Análisis de los datos obtenidos de los videos

La Fig. 2 exhibe la tendencia de los datos registrados de: **A)** el WTC-2001 y de **B)** Asbury Park, 2006. En ambas gráficas se presenta la distribución de datos del eje-*X* y -*Y* en función del tiempo, además de las correspondientes regresiones polinomiales de segundo grado.

En general, estos videos acondicionados proporcionan suficientes datos para obtener curvas de ajuste: entre 31-75 datos. Encontramos que sobre el eje-*X* la dinámica es pequeña, *i.e.* es un ruido insignificante (en las peores condiciones: < 3.3 m). En contraste, en el eje-*Y* observamos que un modelo parabólico ajusta apropiadamente a los datos (en el peor caso: $R^2 = 0.9972$). Más aún, comparando con la ecuación que describe el movimiento acelerado sobre el eje-*Y* [13]:

$$y = \frac{1}{2}at^2 + v_{0y}t + y_0 \quad (1)$$

Donde *a* es la aceleración del edificio al caer, v_{0y} es la componente vertical de la velocidad inicial, y y_0 es una corrección en el eje de las abscisas al punto de origen.

Obtuvimos que la aceleración en la caída de las edificaciones, por momentos y secciones, es muy similar a las condiciones en caída libre ($a = g = 9.8 \text{ m/s}^2$). En el caso del WTC-2001: 9.84 m/s^2 , (discrepancia con *g* de 0.41%), y el peor caso resulta con una aceleración de 8.84 m/s^2 (discrepancia con *g* de 9.8%).

En el Cuadro I se muestra un resumen de los parámetros obtenidos de los ajustes a las curvas e interpretaciones con la teoría de caída libre. En color rojo se marcan los rubros con mayor error.

Ahora bien, los parámetros obtenidos de la caída del WTC-2001 concuerdan con los resultados reportados por el NIST (año 2008) de más de un 70% [14].

CUADRO I. Comparación de los parámetros obtenidos de los ajustes realizados a la curva de los datos medidos. En color rojo se presentan los peores resultados.

Video	R^2	a (m/s^2)	V_{0y} (m/s)	Δx (m)	# datos
1. WTC, 2001	0.9998	9.84	12.35	2.5	75
2. Asbury Park, 2006	0.9972	9.82	7.41	0.6	52
3. Ocean Tower, 2009	0.9985	8.84	94.42	1.7	48
4. Pallas Hotel, 2012	0.9987	9.12	9.76	0.30	31
5. City Hall, 2013	0.9990	9.82	106.3	3.3	39

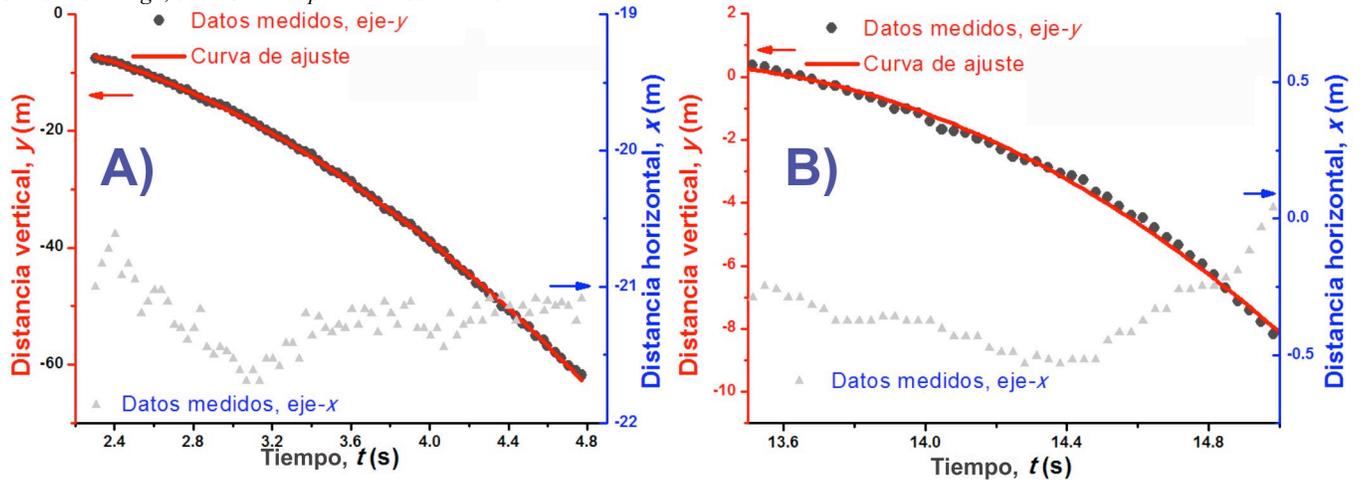


FIGURA 2. Cada gráfica presenta la dinámica sobre el eje-X y -Y, respectivamente. Ambas gráficas muestran una tendencia compartida; A) corresponde al colapso del WTC-2001 y B) a la demolición controlada de Asbury Park, 2006.

C. Análisis de los datos obtenidos del modelo físico

La Fig. 3 ilustra el modelo físico constituido de columnas y plataformas simples. La misma figura muestra imágenes instantáneas de la dinámica en su derrumbe.

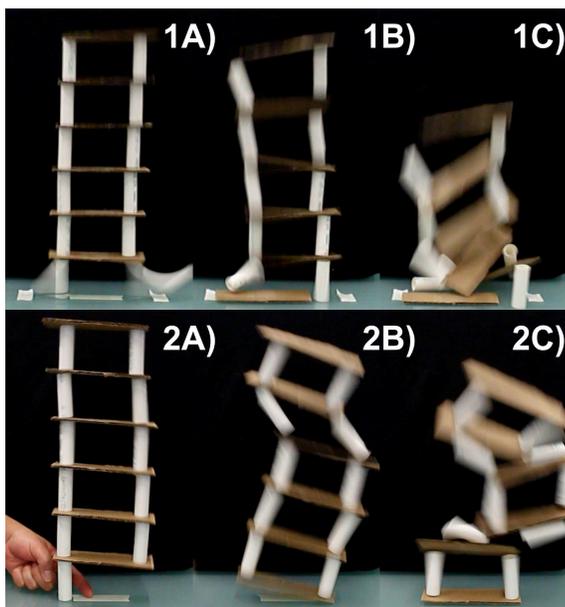


FIGURA 3. Fotografías del modelo físico para dos casos de derrumbe (1 y 2) mostrados en tres etapas: A) al momento de retirar las columnas de la base B) al inicio de su derrumbe C) casi al final de su movimiento.

La Fig. 4 muestra gráficas del comportamiento dinámico (sobre el eje-Y) de la caída de cada piso del modelo físico. La Fig. 4 se construyó con base al análisis del evento donde se retiraron las dos columnas inferiores al primer piso, como se ilustra en la Fig. 3 2A). La remoción de este soporte conlleva a que solo el piso superior muestra una

aceleración cercana a 9.8 m/s^2 , con una excelente correlación de datos. Es de señalar que cuando un piso superior colisiona con un inferior los datos se ignoraron, pues implican una dinámica física adicional, fuera de los objetivos de este trabajo.

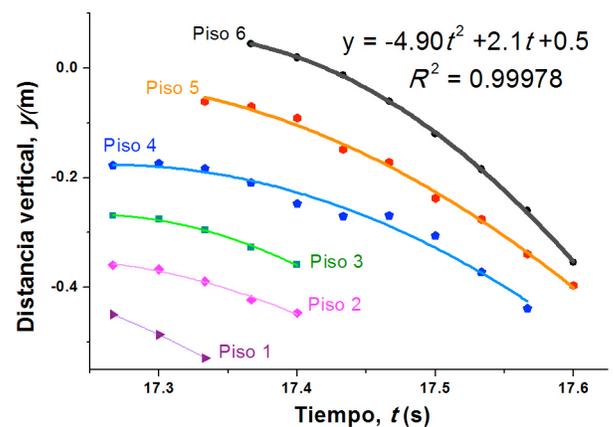


FIGURA 4. Gráficas de la dinámica vertical de la caída de cada piso. Todas las curvas corresponden al mismo evento: retirar las columnas inferiores al primer piso. Únicamente se muestra la ecuación de ajuste del piso más alto.

En el Cuadro II se resume el análisis en 5 eventos. Es decir, cinco veces se armó y derribó el modelo físico. La diferencia entre cada desplome reside en el piso abatido, siempre se analizó el piso superior de la estructura. En este caso el cuadro ofrece mayor información que una gráfica, pues a diferencia de la Fig. 4, los puntos registrados se acumulan alrededor de una curva, ya que cuentan con parámetros físicos similares. El cuadro muestra los parámetros de ajuste de las curvas y sus errores asociados, interpretados con base a la Ec. 1.

CUADRO II. Comparación de la aceleración del piso superior de la estructura en función del nivel derribado. En rojo se marcan los peores resultados. Los valores omitidos de R^2 son por insuficiencia de datos estadísticos.

Nivel abatido	R^2	a (m/s^2)	V_{0y} (m/s)	Δx (cm)	# datos
0	0.9998	4.90	0.1	0.7	8
1	0.9999	4.88	0.3	0.8	8
2	0.9997	4.80	1.4	0.3	6
3	0.998	4.96	0.8	0.8	6
4	-	4.90	0.7	0.4	4
5	-	4.70	0.5	0.4	3

D. Análisis del modelo virtual

El modelo virtual muestra una gran flexibilidad en la construcción de estructuras altas. Además, ilustra adecuadamente el uso de modelos numéricos, para la creación de animaciones que asemejan a la realidad. Sin embargo, su uso didáctico solo fue demostrativo. Por ello, en la actividad se mostraron animaciones pre-programadas, se presentó un video tutorial y se compilaron algunas estructuras sencillas, pues el software. En computadoras convencionales, la compilación puede requerir un par de horas para completar una animación de un par de segundos. La Fig. 5, muestra A) la interface de trabajo y B) una imagen instantánea de la animación después de compilarla.

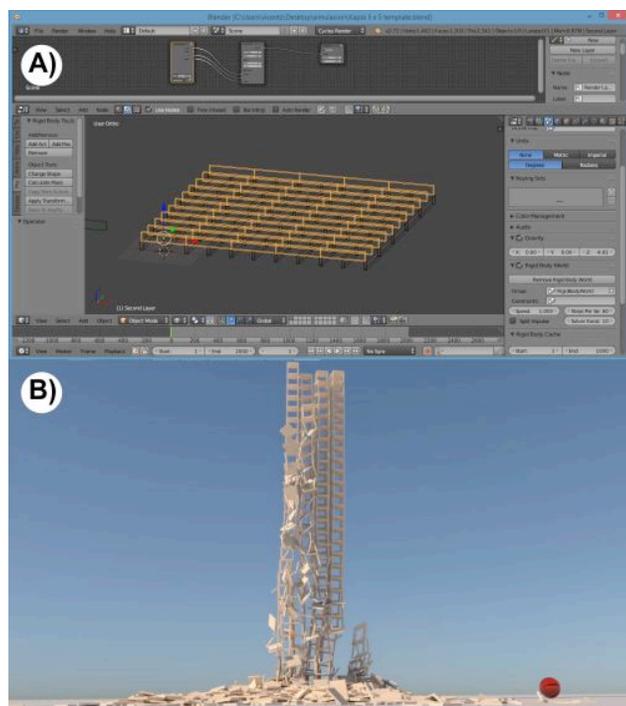


FIGURA 5. Capturas de pantalla de A) interface de trabajo en Blender y B) una vista de la cinemática que simula la caída de una torre formada por pisos y columnas virtuales [12].

III. DISCUSIÓN

A. Sobre el video del WTC-2001

La única meta de utilizar, como objeto de estudio, un video de la tragedia del WTC-2001 es realizar un análisis físico-forense orientado a la didáctica y academia.

De este estudio y de sus modelos, obtenemos ciertos parámetros, pero las interpretaciones extra-académicas de las cifras, están fuera del alcance de este documento. Con todo, es singular que la aceleración medida en el video del WTC-2001 sea equivalente a la aceleración en caída libre. Como si la oposición de los niveles inferiores y sus estructuras fuera despreciable. Admitimos que esta observación inicial es el motivante de la búsqueda de modelos de comportamiento similar. Por tal razón se recurrió: a videos de demoliciones controladas, después a un modelo físico y, finalmente, una observación en un modelo virtual.

B. Sobre los videos de demoliciones controladas

En realidad, es difícil obtener videos con escenas adecuadas para comparar con el WTC-2001. La escena debe captar un edificio completo, de estructura exterior poco compleja y a un ángulo fijo. Son pocos los videos que cumplen con todos estos requisitos.

Sin embargo, localizamos casos donde se cubren estos requerimientos. Tales videos corresponden a diferentes latitudes, contextos arquitectónicos y fechas de registro. Por ello, sus dinámicas pueden ser representativas. Pero la interpretación de su comparación requiere precauciones, tales como: **1)** el valor de la aceleración a debe registrarse solo con dos cifras significativas, de modo que el valor estándar de g es 9.8 m/s^2 . Más cifras pueden carecer de representatividad. **2)** Cada edificio cuenta con una estructura diferente y la planeación de la demolición es independiente de la comparación con el suceso del WTC-2001. Por ello, la dinámica de la demolición presenta efectos de desplazamiento angular, lo que implica que, por momentos, en ciertos puntos estructurales, se registren aceleraciones superiores a g . Tal efecto sucede cuando una estructura inelástica y alargada cae, manteniendo fijo su punto de rotación (en un extremo), mientras gira el resto de la estructura. Después del punto de percusión (desde el punto de rotación, se encuentra a $2/3$ de la longitud de la estructura) todos los puntos descienden con aceleraciones mayores como si fueran partículas independientes en caída libre. En consecuencia, la estructura alcanza un ángulo mínimo (35°) donde la componente vertical la aceleración supera el valor de g [16]. En trabajos futuros mostraremos modelos de edificios que permiten estudiar este efecto a detalle; por el momento este tema va más allá de los objetivos y metas de este artículo. Por todo lo anterior, sugerimos evitar el efecto de torca en este estudio; porque deriva en un fenómeno inobservable en el video del WTC-2001: rotaciones.

De este estudio, podemos encontrar valores singulares que físicamente indican un error. Por ejemplo: obtener una

U. Torres Zuñiga, José Guadalupe Bañuelos Muñeton

velocidad que implicara fenómenos asociados a velocidades supersónicas. En el caso del video del City-Hall, medimos una velocidad vertical inicial igual a 106.3 m/s, pero no se observan efectos de condensación en el ambiente, fenómeno asociado a objetos que superan la velocidad del sonido en el aire. Aunque este error es una llamada de atención al método de trabajo, solo representa un dato atípico aislado.

En suma, observamos que en demoliciones es factible obtener colapsos verticales con aceleraciones muy cercanas a las de caída libre, como en el caso del WTC-2001.

Es de esperar que en un futuro próximo aumente el número de videos con tales características, dado que los medios de videograbación y difusión cada vez son más populares. De ser así, se podrá enriquecer y mejorar esta colección de videos para ejercicios didácticos.

C. Sobre el modelo físico

Si bien, es elemental la estructura del modelo físico que refiere a un rascacielos como el WTC-2001, también es acertada para iniciarse en el tema de dinámica de estructuras colapsándose. Observamos que cuando mayor es el nivel desde donde se extraen las columnas de soporte, los resultados de la dinámica de la parte superior del edificio son más coincidentes con los del WTC-2001. Por la geometría de la estructura, los efectos de torca son minimizados.

El modelo físico propuesto es rápido de construir. Para un solo evento, cada nivel se puede analizar obteniendo resultados claros y representativos. Es prescindible especificar el agente provocador del derrumbe, lo que representa una ventaja. Pero además es un modelo cognitivamente accesible e ilustrativo para estudiantes con un nivel básico en conocimientos de mecánica de cuerpo rígido y métodos experimentales. Tal es el caso de los estudiantes de primer semestre la LCF-UNAM, quienes en su perfil multidisciplinar utilizan métodos de investigación con un enfoque pragmático del análisis fisicomatemático.

Sin embargo, se debe tener cuidado al abatir las columnas de un nivel. Este proceso debe realizarse sin añadir componentes horizontales a la velocidad inicial. De otro modo, se imprime una velocidad al sistema que puede involucrar torcas. Las torcas hacen que el modelo adquiera una dinámica diferente al del objeto de estudio. Si bien, se puede construir un modelo, donde un mecanismo abata un nivel (por ejemplo: usando agua para disolver soportes de sal o azúcar, o incluso emplear dispositivos electrónicos); estos aportan poco al análisis original. De hecho, un modelo más representativo debe implicar la compresión del piso inferior ante la caída del nivel superior.

D. Sobre el modelo computacional

Para el tema central de este estudio aprovechamos una extensión previamente realizada para reproducir virtualmente la caída de edificios impactados por esferas numéricas. Sin embargo, este sistema no fue programado para ser parte de un estudio forense, ni académico. Más

bien, tiene como meta ser parte de la industria del entretenimiento. El programa utiliza algoritmos y parámetros adecuados para visualmente mostrar una dinámica que puede suceder en la realidad. En este trabajo solo utilizamos este recurso de modo cualitativo —e introducir temas de programación en *Python* sobre la plataforma de *Blender*— pero sus posibilidades de simulación deben ser exploradas en trabajos futuros y comprarse con programas que se utilizan más tradicionalmente para realizar simulaciones físicas: *Matlab*, *Mathematica*, *Maple*, entre otros.

IV. CONCLUSIONES

Hemos presentado una actividad integral que conjunta a las áreas física y forense. A través del análisis inicial de un video, que muestra el colapso histórico de un rascacielos, propusimos utilizar modelos de diversos contextos para profundizar en la naturaleza fundamental de su dinámica. Los modelos utilizados fueron: **1)** cinco videos de características similares, pero donde una explosión controlada derrumba a cada edificio, y **2)** un prototipo simple de edificio de hasta 6 niveles, sostenido por columnas abatibles. De modo que cubrimos un espectro amplio para realizar un estudio exhaustivo de lo que inicialmente era solo un supuesto (usado comúnmente en otros medios de comunicación masiva para alimentar conjeturas suspicaces) [17].

La actividad propuesta es llamativa para estudiantes de diversos perfiles académicos (forenses, ingenieriles, físicos, entre otros) y niveles de estudio (bachillerato, licenciatura, etc.). Sin embargo, creemos que su mejor cualidad es que permite un escalamiento, que le brinda profundidad en el objeto de estudio, dotando a sus resultados de una mayor autoridad al emitir conclusiones.

Este trabajo preliminar, requiere nutrirse con otros ejemplos donde se conjuntan el área física y la forense, utilizando modelos y enfoques novedosos. Trabajamos en ello.

AGRADECIMIENTOS

VTZ y JGBM agradecen al financiamiento del programa UNAM-PAPIME-PE107216. VTZ agradece su beca postdoctoral UNAM-DGAPA.

REFERENCIAS

- [1] Fullerton, D., & Bonner, D., *Additional Crime Scenes for Projectile Motion Unit*, Phys. Teach. **49**, 554 (2011).
- [2] Freier, G. D. & Anderson, F. J., *A Demonstration Handbook for Physics*, "Mi-3. Ballistic Pendulum", (Ame. Asso. Physics Teach, 1996), p M-26.

- Resnick, R., Halliday, D. & Krane, K. S., Capítulo 10: Colisiones, 4^{ta} edición, (Compañía Editorial Continental, México, 1997), p. 241.
- [3] McElhaney, K. W., Linn, M. C., *Investigations of a complex, realistic task: Intentional, unsystematic and exhaustive experimenters*, J. R. Sci. Teach. **48**, 745-770 (2011).
- [4] Resistencia material
- [5] My science box
<<http://www.mysciencebox.org/shaketable>>, consultado: 4-dic-2015.
- [6] Varieschi, G., & Kamiya, K., *Toy models for the falling chimney*, Am. J. Phys. **71**, 1025-1031 (2003).
- [7] Moreno-González, L. R., (*Compendio de Criminalística*, Editorial Porrúa. México.)
- [8] artículo de problemas inversos (2006).
- [9] video *The Collapse of World Trade Center 7*
<https://www.youtube.com/watch?v=EUIEA7bi4_g>
consultado: 4-dic-2015.
- [10]
<<http://publicecodes.cyberregs.com/icod/ibc/2012/index.htm>>, consultado 4-dic-2015.
- [11] Canal de videos de demoliciones controladas utilizando explosivos
- <<https://www.youtube.com/user/TheLoizeauxGroupLLC>>, consultado 4-dic-2015.
- [12] Tower Destruction Simulations
<<http://www.mobymotionblog.com/2014/04/tutorial-tower-collapse-rigid-bodies-2.html>>, consultado 4-dic-2015.
- [13] Resnick, R., Halliday, D. & Krane, K. S., Capítulo 4: Movimiento bidimensional y tridimensional, 4^{ta} edición, (Compañía Editorial Continental, 1997), p. 62.
- [14] Gann R. G., *Final Report on the Collapse of World Trade Center Building 7, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster (NIST NCSTAR 1A)*, 2008. p. 46. Disponible en http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=861610
- [15] Resnick, R., Halliday, D. & Krane, K. S., Capítulo 4: Movimiento bidimensional y tridimensional, 4^{ta} edición, (Compañía Editorial Continental, 1997), p. 62.
- [16] Sitio-web: *Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations Falling Faster than 'g'*, <http://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/falling-faster-g>
- [17] Sitio web: 911speakout.org
<http://911speakout.org/?page_id=222> consultado: 4-dic-2015.