

## Tema A1a Diseño Mecánico: *Mecánica computacional.*

### “Elemento disipador de energía para magnitudes de protección de caídas”

*Bedolla J. <sup>a\*</sup>, Flores V. <sup>a</sup>, Szwedowicz D. <sup>b</sup>, Bedolla M. <sup>a</sup>, Mora C. <sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Apizaco, Carretera Apizaco – Tzompantepec, Esq. Con Av. Instituto Tecnológico s/n Conurbado Apzaco-Tzompantepec, Tlaxcala, México C.P. 90300*

*<sup>b</sup>Tecnológico Nacional de México – Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

*\*Autor contacto. Dirección de correo electrónico: [lbedolla@cenidet.edu.mx](mailto:lbedolla@cenidet.edu.mx)*

---

#### RESUMEN

*En el trabajo se presenta un concepto de disipador pasivo de energía cinética, que consiste principalmente en el acoplamiento de elementos estructurales tubulares. La magnitud de la energía cinética considerada para disipación corresponde a la que se genera por una potencial caída de un individuo, cuando éste realiza trabajo en alturas. Por medio de contacto, fricción y deformación plástica, se realiza la disipación de la energía en el sistema pasivo. Para analizar la condiciones en el sistema de disipación, se hace uso del software de elemento finito Abaqus®, en el que se simplifican las condiciones para representar la caída del cuerpo. La consideración del uso de elementos estructurales se basa en sus características propias de disipación por deformación, cuya condición limita el proceso reversible que se presenta en otros sistemas de protección contra caídas. Se presentan los resultados numéricos que muestran la correspondencia de la disipación de la energía cinética realizada por el mecanismo de disipación.*

*Palabras Clave: contacto, fricción, deformación, disipador.*

#### ABSTRACT

*A concept for the design of energy absorber system is presented, which consist basically of tube type structural elements coupled. The system considers the absorbed energy for levels of kinetic energy corresponding to similar fall arrest systems used to prevent injuries during fall incidents. The energy dissipation in the proposed passive system is developed by means of mechanical contact, friction phenomena and plastic strain. The analysis of conditions in the system is supported by the finite element software Abaqus, which permits the simplification of the body fall process. The application of structural elements in the system is based in its mechanical characteristic for energy dissipation by deformation. Plastic deformation in structural tubes is an irreversible process, which is a desirable condition for fall arrest systems. Finally, the numerical results to show the dissipation of kinetic energy in the proposed system are presented.*

*Keywords: contact, friction, strain, energy absorber.*

---

#### 1. Introducción

En sentido general el campo de aplicación de los absorbedores de energía es considerablemente amplio, y su principal propósito es proteger a los componentes vulnerables (pasajeros en transporte, trabajadores en alturas, hasta articulaciones de los deportistas) de lesiones, mediante la reducción de cargas dinámicas o desaceleraciones considerables causadas por eventos de colisión o impacto repentinos [1].

Un sinnúmero de actividades cotidianas se realizan a alturas considerables del piso. Ejemplos claros de eso se aprecian en diversos aspectos de la industria de la construcción. Otros ejemplos de trabajo en altura se

encuentran en actividades de mantenimiento, reparación y montaje que se realizan en las diversas industrias. También actividades poco frecuentes, relacionadas con mantenimiento en el hogar requieren de trabajo en alturas, y muchas de las veces éstas se realizan por personal sin ninguna capacitación para este tipo de trabajos.

Para tratar de prevenir daños y lesiones generadas por caídas relacionadas con trabajos en alturas, se cuenta con sistemas de protección contra caída. Esos sistemas representan la última defensa para personas cayendo de alturas. Donde dependiendo del nivel de la caída, los daños físicos a la persona pueden incluso ocasionar la muerte del individuo involucrado en ese evento.

Con el rápido crecimiento de la industria de la construcción y la reducción de los espacios disponibles

para tal fin, el número de trabajadores que desarrollan su actividad en altura también se incrementa. Por lo que se considera que en esa misma proporción son requeridos los sistemas de protección para trabajo en alturas. Los cuales tienen que considerarse como un equipo de protección personal indispensable para la realización de trabajos en alturas, y usarse con el fin de evitar lesiones, causadas por las elevadas fuerzas que se presentan durante la desaceleración que se presenta por el impacto contra una superficie rígida.

Las buenas prácticas en los procesos de seguridad, especifican que las caídas tienen que prevenirse como medida primaria para proteger la integridad física de los trabajadores ante cualquier riesgo; eso tienen que ser el enfoque en seguridad más que tratar de proteger al trabajador por medios médicos o legales después que la caída ha ocurrido [2]. Lesiones ocupacionales y decesos causados por caídas de ubicaciones elevadas son serios problemas en los lugares de trabajo [3]. Lo cual motiva el desarrollo de diversos sistemas de protección contra caídas, considerando esos sistemas como la primera medida de protección de los trabajadores en las prácticas de una buena seguridad. De acuerdo a la ANSI Z359-2007 [4] (Instituto Norteamericano de normalización, por sus siglas en inglés), en su subsección correspondiente a la norma ANSI Z359.1 contempla los “Requisitos de Seguridad para los Sistemas Personales, Subsistemas y Componentes para Detención de Caídas”. En ese sentido, los sistemas de protección contra caídas tienen que diseñarse para absorber y disipar la energía generada por el propio usuario a consecuencia de una caída accidental, que se produzca desde una altura determinada. Ya que las caídas de alturas resultan en fuerzas dinámicas y de impacto considerables que afectan la integridad física. Para que esos sistemas operen en forma segura, las capacidades de absorción de energía y carga dinámica tienen que considerarse de forma adecuada en su correspondiente diseño [3].

Todos los sistemas usados para prevenir caídas de alturas contienen componentes, que se unen con diversos elementos que se sujetan al cuerpo con el fin de disipar la energía de caída. Por lo que todos los elementos participantes entre el punto de anclaje y el individuo, influyen en las magnitudes de las fuerzas actuando durante el evento de caída. Un sistema típico de protección contra caída se compone de los siguientes subsistemas [3]: (1) arneses del cuerpo, (2) conectores, (3) cuerdas de seguridad, (4) absorbedor de energía, y (5) anclaje. Cada uno de esos componentes y su diseño se consideran críticos para la seguridad contra caídas, ya que éstas pueden resultar en considerables fuerzas de impacto para personal sin protección. Donde biomecánicamente se pueden presentar peligrosas cargas dinámicas con sistemas de protección contra caídas, si es que sus componentes no se diseñan apropiadamente [5]. Con el objeto de acotar el estudio, es este trabajo solo se analiza la propuesta de disipación de energía correspondiente a elementos que

realizan esa función de disipación en sistemas de protección contra caídas.

Al considerar la seguridad de usuarios de sistemas contra caídas, los procesos de protección por medio de disipadores de energía, pueden caracterizarse por dos parámetros principales [6]: a) la máxima elongación dinámica del equipo y b) la máxima fuerza actuando sobre el cuerpo del sistema que realiza la disipación de energía. Actualmente se reconocen dos métodos principales de cálculo para obtener la fuerza en los sistemas de protección contra caídas, los métodos analíticos y los métodos numéricos [7], donde la versatilidad de los métodos numéricos, permite basar el cálculo principalmente en análisis dinámicos dependientes de la historia del evento.

Para el propósito de disipación de energía cinética, como puede ser el caso de la energía en una caída, se cuenta con diversas alternativas, dentro de las que se considera la disipación por la deformación controlada o la destrucción de componentes estructurales del sistema de disipación de energía [1]. Variados sistemas de absorción y disipación de energía cinética de impacto realizan su función mediante la deformación plástica de sus componentes. Ejemplos de esto son sistemas con elementos estructurales de pared delgada, los cuales presentan varios beneficios en su diseño; como son: bajo peso, bajo costo, y facilidad de producción y ensamble. Los elementos estructurales de pared delgada incluyen geometrías simples como la circular, la cuadrada, la triangular o poligonal [8, 9]. De esas geometrías, de acuerdo con [10, 11] se considera que las secciones transversales más comunes en sistemas disipadores son la cuadrada y la circular, esto en función de su bajo costo, eficiencia y versatilidad de configuración. También indican en [10, 11] que actualmente la investigación en disipación se enfoca en elementos tubulares de sección circular. Los trabajos [12, 13] investigaron la absorción de energía en tubos de pared delgada con diversas secciones transversales, tales como, circular, cuadrada, rectangular, hexagonal, triangular, piramidal y cónica. Resultando que para tubos con el mismo volumen y altura la energía absorbida por unidad de masa es máxima en los tubos cilíndricos.

Dentro de las formas características de deformación plástica de elementos estructurales tubulares se encuentra la expansión, cuyos efectos se usan en sistema de absorción y disipación de energía. Donde el mecanismo presente de disipación se basa en la energía de deformación plástica y en la energía de fricción generada entre un dado rígido y un tubo cilíndrico [14]. La energía de deformación plástica en esas condiciones es proporcional a la relación de expansión del tubo. Una característica interesante de los tubos de pared delgada es que estos proveen un mecanismo de colapso plástico estable durante el impacto a través de la deformación plástica [15]. La absorción de energía mediante la expansión de tubos presenta ventajas como las siguientes [16]: a) la respuesta fuerza-deformación es más suave y sin pico inicial de carga sin fluctuaciones, contrario a los casos de tubos a compresión directa, b) es posible usar el sistema de expansión de tubos como un disipador de

energía en cargas axiales con ángulo de inclinación, donde normalmente los sistemas a compresión axial fallan por pandeo, c) la expansión de tubos como disipador de energía tienen menos requerimientos que la inversión de tubos, lo que facilita su diseño y adaptación en configuraciones, d) la estructura de tubos de expansión permiten el uso de tubos más gruesos para disipar más energía en el proceso no reversible.

De la revisión realizada se observa la necesidad de sistemas disipadores de energía, en el caso particular de este estudio para la protección contra caídas. Un aspecto principal que se busca en este tipo de sistemas es que no exista “rebote” que pueda ocasionar “tirones” en sentido diferente al de caída. Lo anterior se estima puede lograrse con elementos estructurales trabajando con deformación plástica. También se encuentra que el uso de sistemas estructurales tubulares circulares para la absorción de energía es aún un campo en desarrollo e investigación. Por otro lado también se observa que el uso de tubos en disipadores se realiza preferentemente como expansión o compresión con comportamiento plástico, donde típicamente la carrera y velocidad de recorrido de un elemento rígido, son responsables de la deformación plástica. Pero aún es limitado los casos de análisis donde se considera al ensamble de elementos deformables que sustituyen a los rígidos. En función de lo anterior, el presente trabajo se centra en el estudio de un sistema disipador de energía cinética, para el rango de magnitud de caída de un individuo con menor a 108 kg. El sistema consiste de elementos tubulares deformables que realizan la disipación de energía por deformación plástica, contacto y fricción. El estudio se realiza con apoyo del software de elemento finito Abaqus, en cuyo proceso se consideran características dinámicas.

## 2. Sistema contra caídas

Un sistema de protección contra caídas de alturas es un equipo de protección personal que se diseña para disipar la energía generada por caída accidental del usuario, su propósito es minimizar el daño por caída al usuario. Aunque este sistema no es el preferido para control de riegos, se considera necesario en la prevención de daño en personal trabajando en alturas. Ya que cuando estos sistemas son correctamente diseñados, instalados y usados pueden limitar considerablemente las severidades de caídas. Un sistema típico de protección contra caída con línea horizontal se compone de [17, 18] los arneses que sujetan el cuerpo, conectores, línea horizontal, y la correspondiente línea de vida. La Fig. 1 muestra un esquema típico de ese sistema, donde el elemento 4 hace las veces del principal elemento disipador de la energía cinética de la caída.

En cuanto a los requerimientos de diseño, es práctica común que se presenten dos errores típicos en sistemas de

protección contra caídas [19], que corresponden a solo considerar aspectos de resistencia sin incluir efectos sobre el usuario, ni características dinámicas del evento. Para que un sistema proteja efectivamente, se requiere considerar condiciones dinámicas además de la resistencia de los componentes, y las carreras de caída mínimas. Por lo tanto incorporar medios adecuados de disipación de energía y limitadores de la fuerza máxima de caída es una característica necesaria, además de desarrollar esto prevenir impactos y evitar rebotes del usuario.

Dado que todos los elementos componentes de un sistema de protección contra caídas son partes críticas, para acotar el presente estudio, éste se centra solo en una propuesta del subsistema de absorbedor de energía (elemento 4 Fig. 1), donde los requerimientos del sistema contra caídas pueden ser fuertemente influenciados por ese subsistema. Ya que el mismo, dependiendo del diseño, disipa la energía cinética de caída, a lo largo de una carrera. Como se indicó en la introducción, los elementos que se ajustan a los requerimientos de un sistema de protección contra caída pueden obtenerse de elementos estructurales tubulares. Los cuales además de presentar ventajas como su facilidad de producción y variedad de tamaños y materiales, también incluyen características que los hacen apropiados para este tipo de diseños, en función de su deformación plástica [16]. Entre tales ventajas se encuentra: 1) fuerza reactiva constante y controlada, 2) carrera larga, 3) modo de deformación repetible y estable, 4) peso ligero y elevada capacidad de energía específica, y 5) bajo costo y fácil instalación.

En función de lo descrito, en la siguiente sección se presenta la aproximación usada para establecer un mecanismo disipador de energía pasivo con aplicación en los sistemas de protección contra caídas.

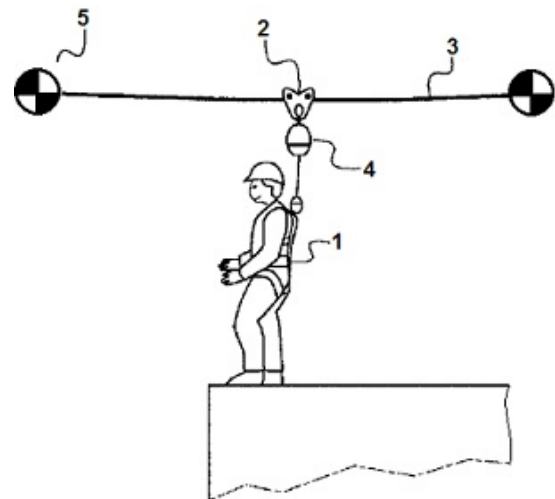


Figura 1. Esquema de un sistema de línea de vida horizontal, donde: (1) arneses del cuerpo, (2) conectores, (3) cuerdas de seguridad, (4) representación del elemento disipador de energía, y (5) anclaje

### 3. Sistema absorbedor de energía pasivo

Los disipadores de energía tipo tubo realizan su función a través de deformación plástica, en esta condición la conversión de energía es irreversible [20]; lo cual es deseable en sistemas contra caídas en los que se requiere evitar efectos de rebote. La deformación en tubos preferentemente se realiza a un tubo deformable con un dado rígido. Con el objeto de ampliar ese concepto de disipación en sistemas contra caídas, en el presente estudio se analiza la propuesta de ensamble con dos elementos tubulares deformables, para lograr su deformación plástica. Dado el nivel de cargas que se producen para la disipación de la energía de caída, los elementos estructurales corresponden a tubos de pared delgada, con características comerciales (materiales y dimensiones).

El análisis considera pares de elementos tubulares del mismo diámetro y material. Por lo que para generar el efecto deformación radial y prevenir la falla por pandeo, a causa de la carga axial de la energía de caída, a un tubo se le modifica un extremo, como se muestra en la figura 2. La geometría de campana solo se usa para permitir el enclavamiento inicial de tubos con igual diámetro nominal, y que mediante la energía cinética se presenta la deformación radial. Como lo muestran los resultados, la influencia de la modificación inicial no es significativa en el proceso de deformación radial plástica, con el que se logra el efecto de disipación de la energía de caída.

Por las características propias de la geometría de elementos tubulares cilíndricos, se toma ventaja de esta condición en la simulación del sistema de disipación, y se usan elementos finitos axisimétricos, que disminuyen el costo computacional del problema en estudio. En la Fig. 2 se presenta la geometría representativa de los elementos tubulares que se usan en el análisis. La Fig. 2a muestra los elementos completos y la Fig. 2b muestra un corte en su sección transversal de los mismos elementos. La Fig. 3 muestra la geometría discreta de los elementos del modelo. En los elementos tubulares cilíndricos, se usan elementos finitos axisimétricos lineales de 4 nodos. La forma axisimétrica de la Fig. 3 representa el perfil de los elementos estructurales que se aprecia en la Fig. 2. Para analizar el desempeño del sistema, se consideran diferentes materiales (acero y cobre), así como dos diferentes alturas de caída libre, lo que corresponde a dos diferentes valores de velocidad (5.5 m/s y 7.5 m/s) para el inicio de accionamiento del sistema de disipación.

Para las restricciones de movimiento del modelo el extremo inferior del tubo inferior se restringe en la dirección “y” (ver Fig. 3), de forma que permita deformación en la dirección radial “r”, pero no desplazamiento del extremo inferior en “y”. Para el tubo superior (elemento móvil) no se presentan restricción de movimiento y se le asigna velocidad inicial “V” a un elemento tipo masa (de 108 kg [21]), que se encuentra acoplado firmemente a los nodos del extremo superior del tubo móvil. La velocidad inicial V, se considera igual a la del cuerpo en caída, que corresponde al instante que se

obtiene cuando la cuerda (ver Fig. 1) que sujeta al elemento disipador se tensa e inicia la aplicación de carga en el sistema disipador. Para estimar el valor de la velocidad inicial se consideran dos longitudes de cuerda, que corresponden a los límites de la posición del centro de masa del cuerpo en caída. Los límites se definen para la cuerda con tensión cero (no hay caída) y cuando la cuerda tiene la tensión correspondiente a la cuerda completa extendida en la carrera de caída. En esa posición inicia la carga en el sistema de disipación, y por tanto inicia la deformación de los elementos tubulares. La carrera de caída del centro de masa del cuerpo humano considerado para la longitud de las cuerdas comerciales es de [21]: 1.83 m y 3.35 m. Las correspondientes velocidades iniciales para el instante en que se tensa la cuerda son [21]: 7.5 m/s y 5.5 m/s. Esa velocidad es la indicada como condición inicial del elemento masa en la simulación, en el instante que se aplica carga a los elementos tubulares para la disipación.

Posterior a que se establece la carga en los elementos tubulares, se presenta la condición de fricción y contacto en las paredes de los tubos. La deformación plástica junto con la fricción modifican la velocidad presente en el elemento masa unida al tubo superior móvil, de forma que la velocidad disminuye hasta cierto valor, que depende de la energía de deformación y la fricción presente en el sistema. Para la interacción de contacto en las paredes con fricción, se define en la interacción como superficie maestra la superficie interna del tubo con campana y como superficie esclava la superficie externa del tubo móvil (ver Fig. 3). Con esa configuración se previene que la superficie esclava pueda penetrar a la maestra, y por otro lado permita realizar la deformación en ambos tubos.

La geometría de los tubos corresponde a un espesor de 1.63 mm, con radio externo de 30.15 mm. La longitud cilíndrica del elemento fijo es de 90 mm, con un radio en la campana de 10 mm. La longitud del elemento móvil es de 50 mm. Las propiedades de los materiales en las simulaciones se presentan en la Tabla 1. Los valores se toman de [22] para considerar sus curvas plásticas, donde el acero se aproxima a un acero austenítico grado E, y el cobre a un UNS C28000. Una de las principales características de los elementos tubulares para la disipación de energía es su deformación plástica, la cual no es reversible para este proceso. Esto garantiza la disipación por deformación. Por tal razón la curva de deformación plástica del material tiene considerable importancia para el diseño del sistema de disipación. Los datos de la deformación plástica de los materiales considerados se presentan en las Tablas 2 y 3.

Como se muestra en los resultados solo una tercera parte del tubo móvil tiene efecto en el proceso de disipación de la energía cinética; mientras que la longitud del tubo con campana y la respuesta plástica de su material (ver tablas 2 y 3) la modifican la velocidad con la que el elemento masa carga al ensamble usado como disipador.

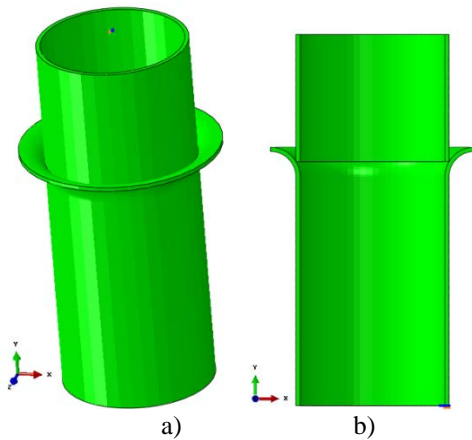


Figura 2. Geometría de elementos tubulares, donde: a) ensamble y b) sección transversal.

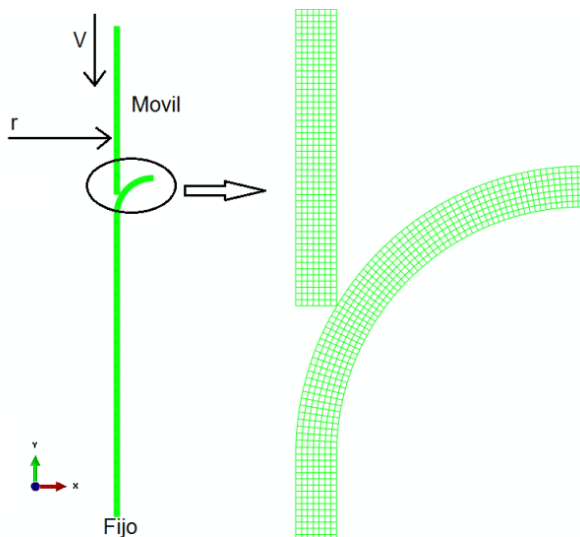


Figura 3. Geometría discreta de los elementos axisimétricos del modelo.

Tabla 1 – Materiales del modelo.

Parámetro	Cobre	Acero
Radio externo [mm]	30.15	30.15
Espesor [mm]	1.63	1.63
Longitud (del fijo) [mm]	90	90
Longitud (del móvil) [mm]	50	50
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	7764	7850
Módulo Elástico [GPa]	110	210
Límite de fluencia [Mpa]	33.3	200
Poisson	0.343	0.3
Coefficiente de fricción estático	0.3	0.51
Coefficiente de fricción cinética	0.2	0.44
Esfuerzo plástico [MPa]	Ver Tabla 2	Ver Tabla 3

Tabla 2 – Deformación plástica cobre.

Esfuerzo [MPa]	33.3	60	84	95	123	144
Deformation unitaria [mm/mm]	0	1.6	3.7	5.8	12.5	21.2

Tabla 3 – Deformación plástica acero.

Esfuerzo [MPa]	200	426	294	374	437	480
Deformation unitaria [mm/mm]	0	0.0235	0.0474	0.0935	0.1377	0.18

#### 4. Resultados y discusiones

De acuerdo a las pruebas realizadas, la geometría especificada para el material cobre resulta insuficiente para disipar toda la energía de caída, para ambos caso de la velocidad inicial de la masa. En la Fig. 4 se muestra se muestra el cambio de velocidad del elemento tipo masa, que simula al cuerpo en caída con una velocidad inicial de 5.5 m/s, para la fase de inicio de la disipación, y para material cobre de los elementos tubulares. Se observa la reducción de velocidad para tubos de cobre es solo del 8.6 % de la velocidad inicial (ver características en la Tabla 1). Se aprecia que la reducción de la velocidad de la masa se presenta en forma cercanamente lineal, pero sin lograr velocidad cero para este caso. Por lo que se estima que para estas condiciones (elementos de cobre) se requiere una longitud del tubo superior a 1 m, condición que queda fuera de los requerimientos característicos de un disipador por deformación plástica. Esto sin considerar efectos adicionales como el pandeo para tal longitud del tubo usado en el disipador.

Por otro lado para los elementos estructurales de acero, se logra la atenuación de la velocidad de la masa que simula el cuerpo cayendo, desde la velocidad inicial hasta lograr que la velocidad sea cero y se mantenga en esa condición. En la Fig. 5 se muestra la velocidad del elemento tipo masa que simula la carga del cuerpo en caída, para las velocidades iniciales de la masa tanto de 5.5 m/s como de 7.5 m/s, donde la disipación de energía se realiza con elementos tubulares de acero. A diferencia los resultados de la Fig. 4, para la Fig. 5, se obtienen en ambas condiciones de velocidad inicial la detención completa de la masa, para el tiempo de accionamiento del sistema disipador indicado en las respectivas curvas de la Fig. 5. La Fig. 6 muestra de forma representativa el proceso de disipación, cambio de velocidad y posición del elemento móvil del disipador, el cual se encuentra unido al elemento tipo masa que simula el cuerpo cayendo. Los resultados de la Fig. 6, corresponden a elementos tubulares de acero y para una velocidad inicial de la masa de 7.5 m/s y se relacionan con el tiempo de la respectiva curva que se presenta en la Fig. 5. Donde la figura 7c representa el tiempo y la posición final de desplazamiento del móvil, que es cuando la velocidad se hace cero.

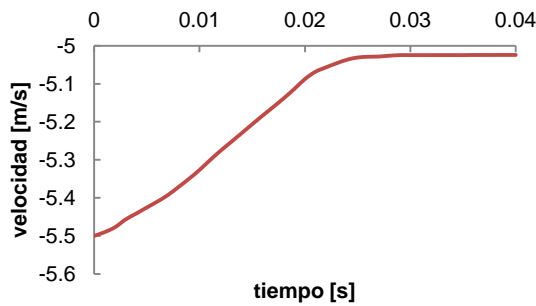


Figura 4. Velocidad del elemento masa para tubos de cobre.

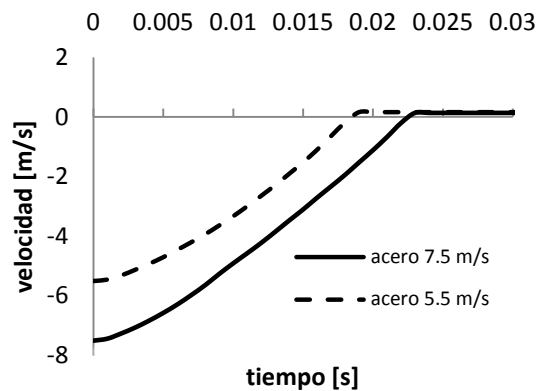


Figura 5. Velocidad del elemento masa con velocidad inicial de 7.5 m/s y 5.5 m/s para tubos de acero.

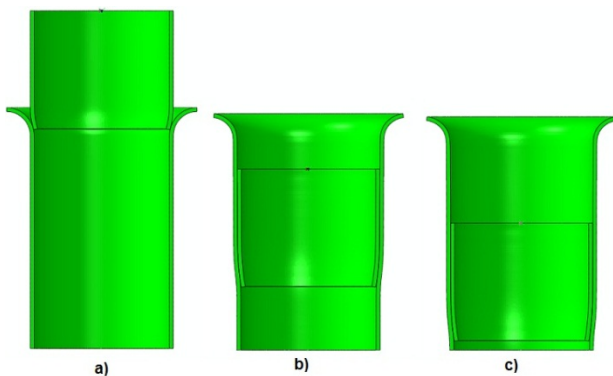


Figura 6. Proceso de desplazamiento de los elementos estructurales, donde: a)  $t=0.001$  s b)  $t=0.012$  y c)  $t=0.023$  s.

La Fig. 7 muestra la distribución de esfuerzos que se mantiene en la región progresiva que presenta la deformación plástica de los elementos tubulares de acero. La Fig. 7a presenta la sección transversal del ensamblaje y la Fig. 7b es una ampliación de la zona donde se presenta la deformación de expansión-contracción de los tubos. Los resultados corresponden a elementos de acero, con velocidad inicial de la masa de 7.5 m/s y para un tiempo de 0.003 s, que es cuando se alcanza la mayor deformación en la región inicial de contacto de los elementos estructurales.

Los máximos esfuerzos (Fig. 7) se presentan en la región donde se genera la progresiva expansión y contracción de los elementos tubulares, que es la condición que propicia la disipación de la energía de caída de la masa.

La Fig. 8 muestra una comparación de la energía cinética presente en el modelo, esta energía corresponde al movimiento del elemento masa que simula la caída, el cual a su vez transmite movimiento al elemento tubular móvil, y cuyo movimiento se transforma en carga y deformación tanto axial como radial de los elementos tubulares que participan en el sistema de disipación. Las leyendas de la Fig. 8 indican el material considerado de los elementos tubulares y la velocidad inicial del elemento tipo masa usado en la respectiva simulación.

Como se observa de la Fig. 8, la energía cinética en los sistemas que se constituyen con elementos tubulares de acero reducen la velocidad a cero, mientras que para el sistema con elementos de cobre se observa que el movimiento de la masa continúa contribuyendo con energía cinética, y al velocidad de la masa (y su energía cinética) llegan a tomar un valor constante que mantiene la caída.

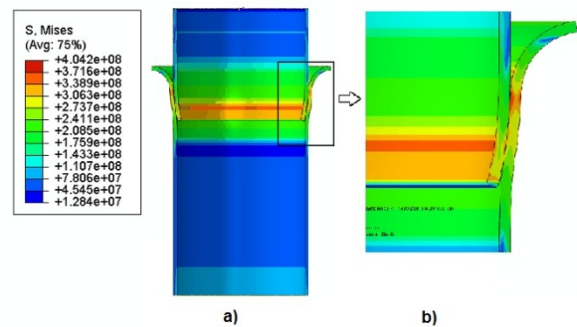


Figura 7. Esfuerzo en el sistema de disipación en [Pa] para un tiempo de aplicación de la carga de  $t=0.003$  s.

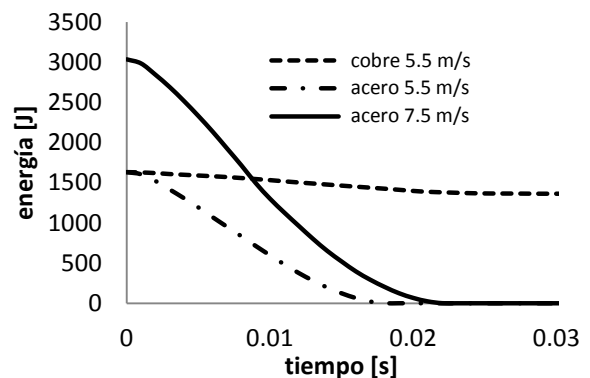


Figura 8. Energía cinética presente en el sistema disipador para diferentes velocidades iniciales y materiales.

De forma análoga a los resultados de las Figs. 4 y 5, la reducción de energía cinética para el sistema con elementos de cobre es de solo el 16.5 %; mientras que para los elementos estructurales de acero se disminuya a cero la energía cinética del sistema, llegando a detener por completo el movimiento de la masa que simula la caída. Resultados análogos se encuentra para el caso de la disipación de energía por disipación plástica que se presenta en el conjunto de elementos estructurales. La Fig. 9 presenta la disipación por la condición plástica de los respectivos materiales y geometrías. Donde de forma similar a la Fig. 8, el sistema con cobre es el que presenta la menor cantidad de disipación de energía de la caída, al relacionar esto con los datos de la Fig. 4 se obtiene que la energía disipada es insuficiente para eliminar el movimiento del elemento masa con elementos tubulares de cobre. Dado que la masa usada es la misma en todas las pruebas, y que la velocidad inicial de 5.5 m/s se aplica tanto para el sistema de cobre como para el sistema con tubos de acero (de los resultados presentados en la Fig. 5), se requiere que la energía disipada por el sistema con cobre alcance los valores de energía de la curva marcada como “acero 5.5” para lograr que elemento masa detenga su movimiento de caída. La Fig. 10 muestra la diferencia porcentual para la disipación de energía por deformación plástica y fricción entre el sistema disipador constituido por elementos de acero, contra la disipación de elementos de cobre, para una velocidad inicial de accionamiento del sistema de 5.5 m/s. Para obtener la diferencia porcentual se considera como referencia los datos de la curva de acero para una velocidad de 5.5 m/s (ver Fig. 9) y se obtiene la diferencia porcentual con los resultados de la disipación con elementos de cobre. Los resultados de la diferencia porcentual se presentan en la Fig. 10, en esta comparación la geometría y carga aplicada es la misma para ambos ensambles tubulares (acero y cobre). La diferencia porcentual entre esas curvas muestra diferencias hasta de 83 % en la fase inicial de la deformación (ver Fig. 10), y en la región donde se estabiliza la magnitud de la energía de deformación la diferencia se mantiene superior al 72 %.

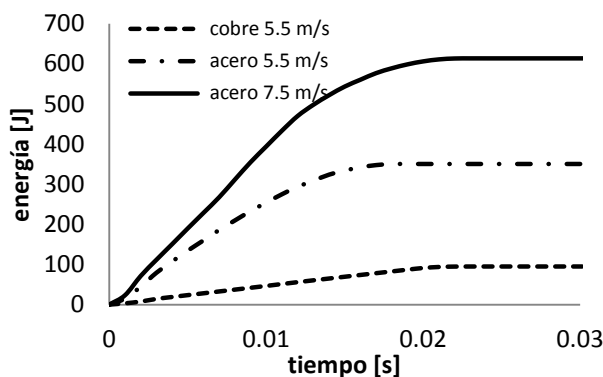


Figura 9. Energía por disipación plástica para los materiales y velocidades iniciales considerados en la disipación (tablas 1, 2 y 3).

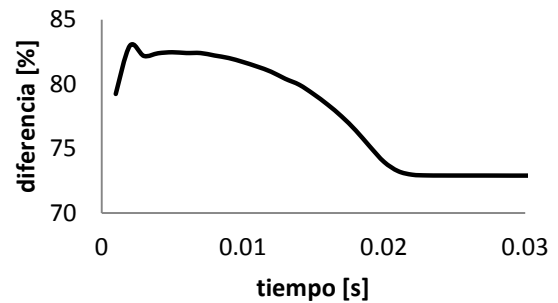


Figura 10. Diferencia porcentual de disipación entre el acero y el cobre para velocidad inicial de la masa de 5.5 m/s.

Bajo esas condiciones, el sistema disipador con tubos de cobre no elimina el movimiento de la masa. Por lo que para las cargas y geometrías analizadas, el acero estructural es el que permite realizar la disipación de la energía de caída, en una carrera relativamente corta y sin presentar recuperación de la energía disipada por deformación.

## 5. Conclusión

Se presentó un análisis de ensamble de elementos estructurales tubulares cilíndricos, para usarse en condiciones de disipación de energía por caída para trabajos en alturas. Se analizó la característica estructural de los sistemas, para condiciones de deformación plástica, así como contacto y fricción, obteniéndose que los sistemas planteados efectivamente disipan la energía de caída, considerada como energía cinética de una masa en caída. Pero dependiendo del material y la geometría para los casos planteados, solo el sistema con elementos estructurales de acero restringe a cero el movimiento de la masa. La velocidad inicial de las pruebas se consideró para una masa de 108 kg en caída.

Se concluye que la deformación plástica de los elementos es el principal factor para el sistema de disipación de energía planteado. A partir de los resultados se concluye que los sistemas estructurales tubulares tienen aplicación en disipación de energía para los niveles de magnitud de caída, que se presentan en trabajos en alturas. En función del material y geometría se regula la distancia de carrera de caída que le toma al sistema para disipar la energía, también por el efecto de deformación plástica no se genera restitución de energía al sistema, lo cual resulta en una condición deseable para el diseño de sistemas contra caídas en los que se requiere evitar los rebotes.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México el apoyo económico otorgado para la realización de este



trabajo, como parte de los proyectos con clave: 5704.16-P y 6239.17-P.

#### REFERENCIAS

- [1] Bergmanna T., Heimbsa S., Tremmela G., Maierb M., 2014, Investigation of a Composite Tensile Energy Absorption Element Under Static and Dynamic Loading, ECCM16 - 16TH European Conference on Composite Materials, Seville, Spain, 22-26 June 2014.
- [2] Bobick T.G., McKenzie E.A., Kau T.Y. Evaluation of guardrail systems for preventing falls through roof and floor holes, *Journal of Safety Research*, 41 (2010): 203–211, 2010.
- [3] Miang-Goh Y, Love-Peter. Adequacy of personal fall arrest energy absorbers in relation to heavy workers, *Safety Science*, 48 (2010): 747–754, 2010.
- [4] ANSI/ASSE Z359 Fall Protection Code Package Version 3.0.
- [5] Martin D. A., Boron K., Obstalecki M., Kurath P., Horn G. P. Feasibility of Knots to Reduce the Maximum Dynamic Arresting Load in Rope Systems, *J. dynamic behavior mater.* 1(2005): 214–224, 2005.
- [6] Baszczyn'ski K., Influence of weather conditions on the performance of energy absorbers and guided type fall arresters on a flexible anchorage line during fall arresting, *Safety Science* 42 (2004), pp. 519–536.
- [7] Wang Q., Pin Hoe Y., and Miang Goh Y., 2014, Evaluating the Inadequacies of Horizontal Lifeline Design: Case Studies In Singapore, Proc. CIB W099 Achieving Sustainable Construction Health and Safety, Lund, Sweden, 2-3 June 2014, pp. 660-670.
- [8] Alavi Nia A., Parsapour M., Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections, *Thin-Walled Structures*, vol. 74(2014), pp. 155–165.
- [9] Obradovic J, Boria S., Belingardi G., 2012, Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures, *Composite Structures* vol. 94 (2012), pp. 423–430.
- [10] Rezvani M. J., and Damghani Nouri M., 2014, Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns, *Arab J Sci Eng* (2014), vol 39, pp. 2179–2190.
- [11] Zhang a X., Zhang H., 2015, Relative merits of conical tubes with graded thickness subjected to oblique impact loads, *International Journal of Mechanical Sciences* 98 (2015), pp. 111–125.
- [12] Alavi-Nia Ali, Haddad-Hamedani Jamal, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Structures* 48 (2010): 946–954, 2010.
- [13] Salehghaffari S., Tajdari M., Panahi M., Mokhtarnezhad F., Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures* 48 (2010): 379–390, 2010.
- [14] Won Mok C., Tae Su K., Hyun Sung J., and Jin Sung K., Study on Rupture of Tube Type Crash Energy Absorber using Finite Element Method, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 5 (4), 2011, pp. 821-826.
- [15] Niknejad A., Rezaei B., Hossein Liaghat G., Empty circular metal tubes in the splitting process – theoretical and experimental studies, *Thin-Walled Structures* 72 (2013), pp. 48–60.
- [16] Yang J., Luo M, Hua Y, Lu G., Energy absorption of expansion tubes using a conical–cylindrical die: Experiments and numerical simulation, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52 (2010), pp. 716–725.
- [17] Miang Goh Y., and Wang Q., Investigating the Adequacy of Horizontal Lifeline System Design through Case Studies from Singapore, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 141, Issue 7 (July 2015).
- [18] Spierings A.B., Stämpfli R., Methodology for the development of an energy absorber: Application to worker security ropes, *International Journal of Impact Engineering*, 32 (2006): 1370–1383, 2006.
- [19] Wang Q., Hoe Y.P., Goh Y., Evaluating the Inadequancies in Horizontal Lifeline Designs: Case Studies in Singapore.
- [20] Yan J, Yao S., Xu P., Peng Y, Shao S, Zhao S, Theoretical prediction and numerical studies of expanding circular tubes as energy absorbers, *International Journal of Mechanical Sciences* 105 (2016) 206–214.
- [21] Wu J., Powers J.R., Harris J.R., Pan C.S., Estimation of the Kinetic Energy Dissipation in Fall-Arrest System and Manikin During Fall Impact.
- [22] ASM International, Atlas of Stress-Strain Curves, second edition, 2002.