

UNA MIRADA AL RIESGO SÍSMICO DE COMPONENTES NO ESTRUCTURALES Y ALGUNAS ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN

MIGUEL A. JAIMES TÉLLEZ

Los eventos sísmicos recientes muestran que los componentes no estructurales y equipos en muchas instalaciones importantes como fábricas de alta tecnología, hospitales, centros de respuesta de emergencia, centros de datos y de control de tráfico aéreo, laboratorios de ciencias, refinerías y parques eólicos son altamente vulnerables a la interrupción del servicio debido al mal funcionamiento o daño del equipo crítico. Además, los elementos no estructurales y contenidos juegan un papel importante en la ingeniería basada en el desempeño debido a que el daño para varios elementos no estructurales (tuberías, mallas de techo, caída de plafones y otros) y/o contenidos (equipos, muebles, esculturas y otros) en algunas construcciones se dispara para niveles de desplazamientos (implica distorsiones) o intensidades menores que aquellas requeridas para inducir daño estructural en las mismas construcciones. Aquí se presenta una mirada de algunos de los avances en el estudio

del comportamiento, en la vulnerabilidad y en el riesgo de contenidos, así como equipos fuera y dentro de las construcciones debidas a la acción sísmica. Al mismo tiempo, se establecen recomendaciones de medidas de mitigación para esos elementos basados en estudios costo-beneficio (C/B). Este vistazo al riesgo sísmico de componentes no estructurales se muestran considerando tres ejemplos ilustrativos: 1) (C/B) de barricas de vino considerando diferentes estrategias de mitigación, 2) riesgo de volcamiento de equipos eléctricos simplemente apoyados en su cimentación, anclados o apoyados en un aislador de base y 3) comportamiento de contenidos y esculturas en edificios considerando efectos asociados a la interacción suelo-estructura implementando también algunas estrategias de mitigación.

Análisis costo beneficio (C/B) de medidas de mitigación para apilamiento de barriles de vino

La evidencia sísmica del pasado muestra que las fallas en los contenedores de almacenamiento de vino no sólo provienen del daño estructural a los almacenes, sino también de un comportamiento inadecuado del equipo de almacenamiento del vino. Por lo anterior, en 2017 se condujo un análisis C/B de tres estrategias de medidas de mitigación para apilamiento de barriles de vino, con apilamientos que van desde tres a seis niveles de barricas, sujetos a movimientos

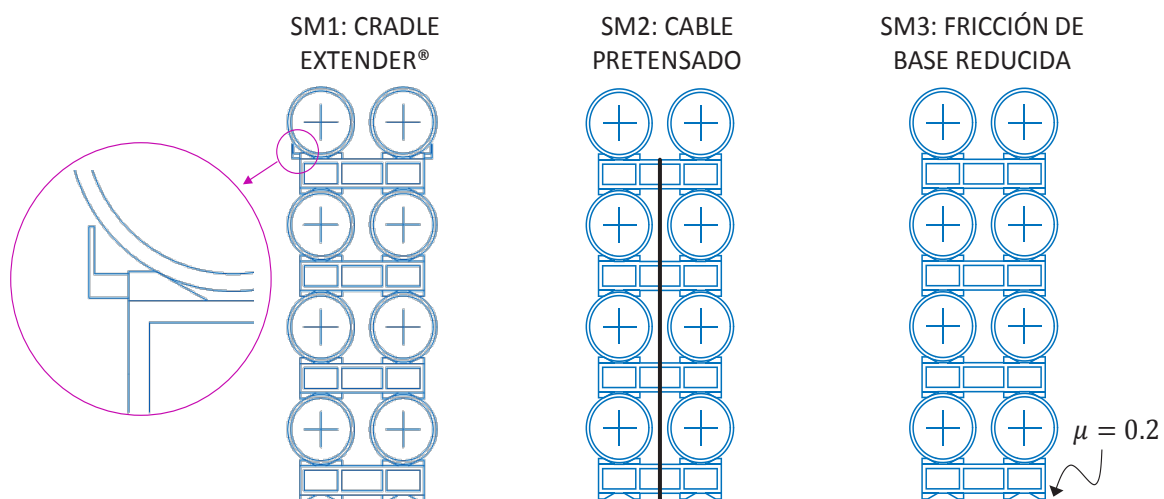


Figura 1. Imagen de las estrategias de mitigación de riesgo mostradas en una pila de barriles de vino de cuatro niveles: a) Cradle Extender o SM1, b) cable pretensado o SM2 y c) fricción base reducida o SM3

sísmicos del suelo (Jaimes *et al.* 2018a). Estas estrategias de mitigación o sistemas de mitigación (SM), consistieron en: i) un sistema denominado Cradle Extender® (una cuña colocada en la parte superior del apilamiento, fig. 1a) o SM1; ii) un cable pretensado fijo que va de la parte inferior a la superior de las barricas o SM2 (fig. 1b) y iii) un sistema de interface de fricción de base reducida o SM3 (fig. 1c). Los resultados de este análisis mostraron que las estrategias de mitigación SM1 o SM2 ayudan a evitar un gran número de caídas de barriles de vino en cada pila, por tanto, la inversión de reforzamiento se justifica económicamente.

Estudio del riesgo sísmico de volcamiento de equipo eléctrico

Los terremotos ocurridos en nuestro país en 2017 (sismo del 7 de septiembre con magnitud Mw 8.2 y el sismo del 19 de septiembre con magnitud Mw 7.1) exponen que las plantas de energía eléctrica son altamente vulnerables a interrumpir el servicio eléctrico resultante del daño en equipos como transformadores, estaciones de control y otros. Estudios sobre casos de fallas en centrales eléctricas durante sismos pasados han mostrado que el colapso del equipo eléctrico provoca no sólo pérdidas económicas directas debido a los costos de reparación y reemplazo de equipos dañados, sino también impactos socioeconómicos indirectos

como consecuencia del corte de energía. Por ejemplo, en el sismo del 7 de septiembre de 2017 de magnitud Mw 8.2, de profundidad intermedia de falla normal, ningún daño estructural fue reportado en la Refinería de Salina Cruz, Oaxaca, después del sismo; esta es la refinería más grande de México con una capacidad instalada de 330,000 barriles por día. Sin embargo, el sismo indujo desplazamientos laterales en los generadores eléctricos que alimentan la planta. Como resultado, la planta se cerró como precaución y la operación se reanudó casi 2.5 meses después, pero a menos de 70% de su capacidad. Por lo anterior, es necesario prevenir la interrupción del servicio de estos sistemas en el momento del desastre. Ellos deben continuar operando para atender la emergencia y las necesidades de la población. Es importante destacar que las normas actuales de diseño sísmico proporcionan recomendaciones, generalmente en forma de análisis pseudo-estáticos. Sin embargo, no existen pautas para evaluar la tasa anual de falla o para estimar la probabilidad de falla durante la vida útil de los equipos. En respuesta a la necesidad de esas guías, en Jaimes *et al.* (2018b) se evalúa la respuesta sísmica de equipos tales como transformadores, generadores de energía o gabinetes de control, con el fin de estimar su riesgo sísmico de volteo. Se consideran en el análisis tres diferentes configuraciones de equipos (figura 2): 1) equipo simplemente apoyado sobre una base fija o SM1 (figura 2a), 2) equipo anclado a una base fija o SM2

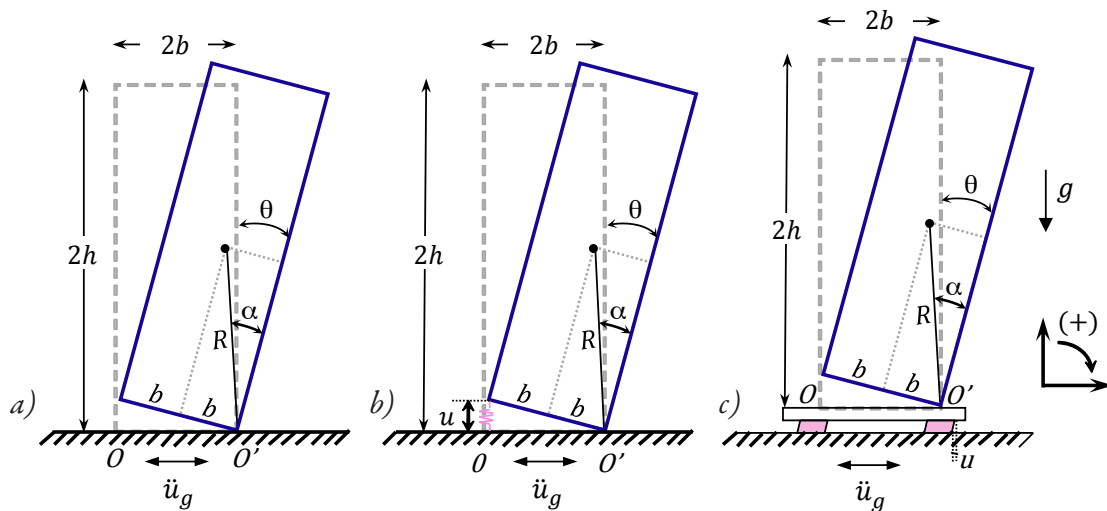


Figura 2. Vista esquemática del equipo eléctrico sujeto a movimientos sísmicos del suelo \ddot{u}_g , que genera cierta rotación angular θ : a) equipo simplemente apoyado sobre una base fija o SM1, b) equipo anclado a una base fija o SM2 y c) equipo simplemente apoyado en un aislador de base sísmica o SM3

(figura 2b) y 3) equipo simplemente apoyado en un aislador de base sísmica o SM3 (figura 2c). Nótese que una sencilla estrategia de mitigación es mantener el equipo simplemente apoyado (SM1), pues se ha observado que para ciertas configuraciones del equipo o contenido, un adecuado comportamiento sísmico se logra bajo esta condición. El estudio mencionado utiliza el entorno sísmico mexicano para ilustrar el efecto de movimiento sísmico del suelo \ddot{u}_g , de fuentes sísmicas cercanas y lejanas en las funciones de fragilidad (relación probabilidad de falla vs intensidad sísmica) para las tres configuraciones. Se proporcionan recomendaciones de diseño para el tipo de medida de mitigación de vuelco apropiada para estos diferentes entornos sísmicos. Finalmente, ese estudio proporciona valores de referencia del riesgo sísmico de volcamiento (fuentes sísmicas cercanas y lejanas) dado por las tasas anuales de falla, que varía principalmente con el ángulo de bloque $\alpha = \tan^{-1}(b/h)$ y tamaño del bloque $R = \sqrt{b^2 + h^2}$. La aplicación de esta metodología a otros entornos sísmicos es sencilla.

Comportamiento dinámico de equipos o esculturas en edificaciones considerando la interacción dinámica suelo-estructura

En general, como se ha mostrado en el análisis del comportamiento de apilamiento de bloques (caso de barriles de vino) y de equipos (transformadores, generadores de energía o gabinetes de control) entre otros, se observa que estos están localizados a nivel del suelo. Sin embargo, muchos otros contenidos y componentes no estructurales están dentro de las construcciones, localizados a diferentes niveles de piso de una construcción, por lo que otros efectos inducidos por la edificación deben ser considerados tales como la interacción dinámica suelo-estructura (IDSE) y la respuesta no lineal de la estructura, entre otros, para conocer cómo estos efectos podrían influir en el comportamiento sísmico de los componentes no estructurales (Jaimes *et al.* 2017). En el caso de IDSE, existen dos efectos como resultado de la presencia de una construcción desplantada en suelo blando: 1) la interacción cinemática que es resultado en el medio de propagación de la onda sísmica por densidad y elasticidad diferente debido a la presencia de la cimentación y 2) la interacción inercial debido al efecto del acoplamiento dinámico entre la construcción y su apoyo, cada una con propiedades elásticas e inerciales

propias, comportándose como un único sistema dinámico. En la figura 3 (izquierda) se muestra un esquema general del efecto de IDSE sobre equipos o contenidos (esculturas) en una edificación. El resultado de un análisis de la influencia de los efectos de la IDSE (Jaimes *et al.* 2017) mostró que la IDSE afecta el comportamiento de contenidos, esculturas en construcciones con base flexible provocando el volteo en niveles inferiores, acentuándose en niveles superiores, donde antes no se presentaba el volcamiento y cambiando la dirección de volcamiento, respecto al comportamiento que tendrían en construcciones con base rígida o desplantados en suelo firme. Finalmente, similar que en los ejemplos previos, se pueden generar recomendaciones de diseño para implementar SM apropiadas para el componente no estructural en estudio considerando la dinámica estructural de la construcción. Algunas de estas se ilustran en la figura 3 (derecha), tales como: a) SM1: mantener simplemente apoyada la escultura sobre una base fija, b) SM2: anclar la escultura

