

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE TAPONES INFLABLES PARA CONTENCIÓN DE INUNDACIONES EN TÚNELES¹

Eduardo M. Sosa², Ever J. Barbero³, Gregory J. Thompson⁴

Resumen: La protección de túneles ferroviarios y viales usados por sistemas de transporte masivo de pasajeros es de suma importancia para departamentos de transporte y autoridades de tránsito. La ocurrencia de desastres naturales o eventos provocados por el hombre pueden afectar significativamente la funcionalidad de dicha infraestructura subterránea. Eventos naturales como el paso del huracán Sandy en 2012, que produjo la inundación de siete túneles de metro y tres túneles vehiculares en la ciudad de Nueva York, han demostrado la necesidad de desarrollar métodos alternativos para mitigar las vulnerabilidades o, al menos, reducir al mínimo las consecuencias de esos eventos. Este artículo presenta parte del trabajo realizado por la Universidad de Virginia Occidental para el desarrollo de tapones inflables capaces de contener la propagación de inundaciones en túneles típicos de sistemas ferroviarios urbanos. En particular, se presenta el trabajo experimental realizado para simular a escala real el despliegue, inflado, presurización de un prototipo instalado en un simulador de inundación de túneles. El grado de adaptabilidad, o conformidad, del inflable a una sección de túnel típica, así como la estabilidad axial y el caudal de agua filtrada durante la simulación de inundación se midieron y se utilizaron como indicadores de desempeño. Los resultados experimentales demostraron la factibilidad de instalación y posterior despliegue de un tapón inflable, así como la capacidad del mismo para sellar una sección de túnel manteniendo la estabilidad axial con un nivel relativamente bajo filtración de agua que es típicamente manejable con equipos de drenaje convencional.

Palabras clave: estructura inflable, inundación, tapón, túnel.

DESIGN AND TESTING INFLATABLE PLUGS FOR FLOOD CONTAINMENT IN TUNNELS

Abstract: The protection of underwater and underground assets, like rail and road tunnels, is a high priority. Man-made or natural disasters can significantly disrupt the functionality of such critical civil infrastructure. Events such as the 2012 flooding of New York City, when Hurricane Sandy caused seven subway tunnels and three vehicular tunnels to flood and remain inoperable for several days, have demonstrated the need of methods to mitigate vulnerabilities or, at least, minimize the consequences of those events. This paper present the work performed at West Virginia University for the development of alternative solutions such as inflatable plugs capable of sealing off and protecting an underground system by stopping hazards, such as flooding. Tests at full-scale comprised deployment, inflation, pressurization, and flooding simulation. Plug conformity, axial stability and leakage rates were used as indicators of performance. Test results demonstrated that an inflatable plug can be installed and deployed; it can also seal a tunnel section by holding test pressures while maintaining the axial stability with a relatively low level of water leakage, which is manageable with conventional equipment.

Keywords: flooding, inflatable structure, plug, tunnel.

¹ Artículo aceptado para publicación en septiembre 4 de 2014.

² Profesor Asistente de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Virginia Occidental, 395 Evansdale Drive, ESB-611D, Morgantown, WV 26506-6103, USA. E-mail: eduardo.sosa@mail.wvu.edu

³ Profesor, Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial, Universidad de Virginia Occidental, 395 Evansdale Drive, ESB-529, Morgantown, WV 26506-6106, USA. E-mail: drb@cemr.wvu.edu

⁴ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial, Universidad de Virginia Occidental, 395 Evansdale Drive, ESB-529, Morgantown, WV 26506-6106, USA. E-mail: gregory.thompson@mail.wvu.edu

INTRODUCCIÓN

Se estima que actualmente existen 337 túneles viales y 211 túneles ferroviarios activos en Estados Unidos. Diariamente, aproximadamente 11 millones de pasajeros de 35 áreas metropolitanas de 22 estados usan alguna forma de transporte masivo para asistir a sus trabajos y a diversas actividades (The Blue Ribbon Panel, 2003; Rabkin, 2007). La movilidad y la seguridad de tal número de pasajeros pueden verse severamente afectada ante la ocurrencia de eventos naturales excepcionales, como huracanes, tsunamis o terremotos, o de eventos provocados por el ser humano, tales como atentados terroristas o accidentes viales. En este contexto, los túneles que forman parte de sistemas de transporte masivo son objeto de especial preocupación dado que en el caso de ocurrencia de eventos extremos, como incendios o inundaciones, no solo se ve afectada una zona en particular, sino que las consecuencias pueden propagarse a lo largo del túnel y eventualmente afectar a todo el resto del sistema del que forma parte.

La protección de túneles construidos bajo cuerpos de agua como ríos o lagos, es de alta prioridad para las agencias gubernamentales. Estas han identificado por lo menos 29 túneles susceptibles de ser afectados por inundaciones (Rabkin, 2007; Parsons-Brinkerhoff et al., 2006). Algunos ejemplos de este tipo de incidentes incluyen la inundación de túneles de transporte de carga en Chicago en 1993 (Inouye y Jacobazzi, 1992), que obligó al cierre del sistema de metro y obligó a la evacuación de aproximadamente 250,000 personas del área afectada. Otro ejemplo es la inundación del túnel de *Midtown* en Virginia, en 2003 durante el paso del huracán Isabel, en el que aproximadamente 167 millones de metros cúbicos de agua provenientes del río Elizabeth inundaron el túnel en solo 40 minutos. La inundación dañó severamente el túnel y lo mantuvo cerrado por aproximadamente un mes para efectuar reparaciones (Post et al., 2005). En octubre de 2012, el paso del huracán Sandy por la costa noreste de Estados Unidos produjo la inundación de siete túneles del sistema de metro, así como también de dos túneles viales que requirieron bombeo permanente para drenarlos, lo que obligó a que permanecieran inoperables por 7 días, y en algunos casos hasta 30 días después del paso del huracán, con el consecuente trastorno para los usuarios y millonarias pérdidas económicas (The City of New York, 2013).

Los incidentes citados previamente, además de otros resumidos por Parsons-Brinkerhoff et al. (2006), han demostrado la necesidad de explorar alternativas para eliminar vulnerabilidades, o por lo menos minimizar las consecuencias de eventos extremos en la integridad y operatividad de diferentes tipos de túneles. Si bien es imposible prevenir absolutamente todas las situaciones que pueden conducir a una inundación parcial o total de un túnel o de un sistema de túneles, se puede reducir el daño minimizando la extensión de la zona afectada. A tal fin, un posible enfoque para abordar el problema de protección es la compartimentación del sistema. La compartimentación con fines de protección puede planearse en las instancias de diseño del túnel y luego implementarse durante su construcción. Sin embargo, en muchos túneles ya existentes, la integración de elementos de compartimentación puede resultar difícil, sino imposible, dependiendo de las características particulares del sistema en cuestión. Durante la construcción de túneles nuevos, una solución típica ha sido la implementación de compuertas metálicas de contención, operadas manualmente o automáticamente, e instaladas en sectores claves de un túnel. Sin embargo, en túneles con varias décadas de operación permanente, la implementación de esta solución ha demostrado tener limitaciones como la disponibilidad de suficiente espacio, el costo elevado de interrumpir el tránsito para la ejecución de las modificaciones, o la remoción de infraestructura circundante para la instalación del sistema de compuertas. Estas limitaciones han desalentado el uso de este tipo de solución como medio para incrementar la resiliencia de un túnel o sistema de túneles que actualmente se encuentran en operación.

Por otro lado, el desarrollo de fibras sintéticas de alta resistencia logrado en los últimos años ha permitido la fabricación de textiles de alto rendimiento que pueden emplearse en ambientes hostiles como en el espacio o en altamar. Además, el avance en la tecnología de fabricación de estructuras inflables complejas ha hecho posible la creación de estructuras inflables rápidamente desplegadas para usos civiles, militares y aeroespaciales. Estas estructuras se caracterizan por ser relativamente livianas, altamente plegables para su almacenamiento y portabilidad, así como por mantener la rigidez necesaria durante su uso. Estas características han impulsado el uso de inflables como barreras de contención de gases o para reparación de tuberías de oleoductos, gasoductos y hasta túneles con relativamente escasa modificación de la infraestructura existente. Entre los ejemplos de utilización de inflables en túneles se destacan la instalación de cortinas desplegadas e inflables a baja presión para la contención de propagación de gases y supresión del suministro de oxígeno en caso de incendio en el metro de Londres (Lindstrand, 2013); también la instalación de un tapón inflable de 7 m de diámetro para contener la inundación de una mina de uranio en Canadá (Stocking, 2013).

Desde 2007, la Universidad de Virginia Occidental (WVU, por sus siglas en inglés) ha estado trabajando en el desarrollo de estructuras inflables de rápido despliegue autónomo y que pueden presurizarse a relativamente alta presión con el objetivo de crear un tapón inflable en una sección de túnel. Esta solución se desarrolló como parte del Proyecto de Túnel Resiliente (o *Resilient Tunnel Project*, RTP, por sus siglas en inglés) (Barrie, 2008; Fountain, 2012) en el cual WVU desarrolló una solución consistente en la instalación de uno o más tapones inflables a lo largo de un túnel, capaces de ser activados y desplegados remotamente con el objetivo de aislar uno o más segmentos de un túnel en un evento de inundación (Martínez et al., 2012; Barbero et al., 2013-a). El tapón inflable está diseñado para adaptarse al perímetro de la sección transversal del túnel en el que se despliega, creando un sello capaz de contener la propagación de agua o gases. El concepto de rápido despliegue de estructuras inflables en túneles es similar al despliegue de bolsas de aire (“airbags”) usados actualmente en la industria automotriz o aeroespacial. Sin embargo, la principal característica que diferencia las estructuras inflables usadas para la protección de túneles de las empleadas para otras aplicaciones, es el confinamiento creado por la superficie interna del túnel en contacto con la superficie del inflable, lo que modifica el comportamiento estructural de la misma. En términos generales, un tapón inflable confinado está sujeto a una combinación de esfuerzos membranales y fuerzas friccionales (Barbero et al., 2013-a). Esta combinación de esfuerzos requiere no solo de membranas altamente plegables, con la capacidad de resistir presurización casi instantánea y de mantenerla durante periodos prolongados, sino también con la capacidad de proveer suficiente resistencia friccional para mantener el inflable estable durante su funcionamiento.

El trabajo realizado por WVU para el desarrollo de tapones inflables para la protección de túneles ha progresado en etapas que incluyeron el diseño conceptual del sistema, la selección de materiales, seguido por la verificación de factibilidad usando prototipos presurizados con aire a baja presión (Martínez et al., 2012), hasta la simulación de despliegue y presurización con agua de prototipos de diferentes escalas sometidos a presiones de inundación (Sill et al., 2013; Barbero et al., 2013-b; Sosa et al., 2014-a/b). Este trabajo resume las consideraciones tenidas en cuenta para el diseño, así como también los más recientes resultados de pruebas experimentales realizadas a escala 1:1 con el objeto de evaluar la capacidad de adaptación de la estructura en una sección de túnel representativa de una sección real, y la capacidad del tapón inflable de soportar presión de agua originada por una inundación simulada.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El uso de tapones inflables para el sellado temporal de tuberías es habitual en el mantenimiento o reparación de oleoductos y otros sistemas de tuberías de similares características. Sin embargo, para la implementación de tapones inflables para la protección de túneles ferroviarios o viales son necesarias consideraciones adicionales para asegurar un funcionamiento adecuado.

En este tipo de túneles el inflable puede preinstalarse en una sección predeterminada del interior del túnel, dentro de un contenedor que mantiene el inflable plegado de manera compacta con el objeto de minimizar el volumen de almacenaje. La posición del contenedor en la sección transversal del túnel varía según las características del mismo y de la disponibilidad de espacio para evitar que el contenedor interfiera con la envolvente dinámica asociada al tráfico de trenes o vehículos. Una vez pre posicionado el tapón plegable permanece en estado latente hasta que sistema de monitoreo detecta un evento que requiere el despliegue y posterior inflado. Cuando el tapón ha llegado a la forma final, este se presuriza y el inflable es capaz de soportar la presión externa ejercida por el fluido que actúa en una de las caras del inflable expuesta al evento que inició el proceso de despliegue. Este proceso se ilustra conceptualmente en la Figura 1, donde un par de tapones inflables se encuentran plegados y pre-posicionados en la parte superior del interior de un túnel (Figura 1-1). La detección de un evento propicia el despliegue, inflado y presurización de ambos tapones (Figura 1-2), que posibilita la creación de un sistema de contención que aísla la región afectada por el evento del resto del sistema (Figura 1-3). La geometría del inflable es tal que esta se ajusta a la geometría interna del túnel a ser sellado, que no es necesariamente la de un cilindro perfecto.

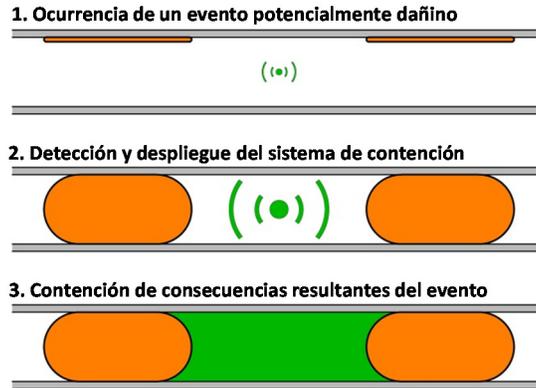


Figura 1: Principio de operación de tapones inflables para protección de túneles (Martínez et al., 2012).

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA INFLABLE

Diseño geométrico

Una de las geometrías más simples con las que es posible implementar estructuras inflables que puedan utilizarse de acuerdo al principio de operación descrito en la sección anterior, y asumiendo que se quiere sellar un segmento de túnel de sección transversal circular, consiste en la combinación de un segmento cilíndrico cerrado por dos casquetes hemisféricos en los extremos. La región cilíndrica es la que está en contacto con las paredes interiores del túnel y, por lo tanto, es la región del inflable que sirve el propósito de sellar el túnel. Los dos extremos hemisféricos proveen la forma más eficiente de cerrar la porción cilíndrica de manera gradual reduciendo la presencia de tensiones flexionales o de concentración de esfuerzos resultantes de la presurización. Sin embargo, los túneles ferroviarios o viales no son perfectamente circulares e incluso pueden ser rectangulares. Además, por lo general, el interior de estos túneles contiene múltiples elementos adicionales tales como tuberías, cables de energía, de telecomunicaciones, rieles y conductos agrupados en las paredes laterales del túnel que afectan el perímetro de su sección transversal. Estos elementos adicionales requieren un reajuste de la geometría del inflable, especialmente en la zona de contacto, para que esta pueda adaptarse a las características particulares de la sección de túnel en la que el tapón inflable deberá funcionar.

En el diseño geométrico de la porción cilíndrica, la presencia de elementos adicionales se tiene en cuenta través del perímetro de contacto real al cual la porción cilíndrica tendrá que adaptarse. El perímetro de contacto real es siempre mayor que el perímetro nominal del túnel y sirve para determinar el diámetro equivalente del segmento cilíndrico del inflable. Idealmente, un inflable fabricado con una porción cilíndrica de diámetro equivalente sería suficiente para lograr el máximo contacto con todo el perímetro de la sección del túnel. Sin embargo, ensayos preliminares demostraron que la secuencia de despliegue, la extensibilidad y la textura del material influyen en como la membrana del inflable se distribuye y adapta al perímetro del túnel. Pruebas experimentales a escala 1:1 (Martínez et al., 2012; Barbero et al., 2013-b) demostraron que es necesario incrementar el perímetro total de la porción cilíndrica para compensar imperfecciones en el contacto que típicamente se producen durante el despliegue y que reducen la calidad del contacto perimetral. Por otro lado, en términos de fabricación, la creación de un segmento cilíndrico con diámetro equivalente demostró ser más simple que la fabricación de un segmento cilíndrico con entalladuras creadas para mejor adaptación del inflable a la zona de contacto (Martínez et al., 2012).

Diseño Estructural

Una vez desplegado y posicionado en el túnel, el tapón inflable estará sujeto a una presión de inflado, P_{int} , y a una presión externa, P_{ext} , originada por el fluido que el tapón debe contener (Figura 2-a). La magnitud de la presión externa puede ser originada por gases, generados por ejemplo por un incendio, en donde el objetivo es agotar el oxígeno disponible dentro de la zona de sellado; la presión externa será la que se genere en exceso de la presión atmosférica. Cuando la presión está originada por un líquido, típicamente agua, la magnitud de la presión externa

que deberá soportar el tapón inflable corresponde a la columna hidrostática medida en la ubicación del inflable. Considerando este último escenario, el tapón inflable desplegado y presurizado en condiciones de confinamiento estará sujeto a una presión interna y externa que generan los siguientes esfuerzos membranales (Figura 2-b): a) en la zona de interacción del fluido a contener con uno de los casquetes hemisféricos, los esfuerzos membranales son relativamente bajos dado que la presión de inflado debe ser por lo menos igual o mayor que la presión externa para mantener la forma hemisférica; esto genera que el diferencial de presiones sea relativamente bajo resultando en esfuerzos membranales de baja magnitud; b) en el extremo opuesto, el casquete hemisférico estará sujeto a los máximos esfuerzos membranales generados por la presión de inflado P_{int} ; c) en la porción cilíndrica del inflable, asumiendo la existencia de contacto óptimo, los esfuerzos circunferenciales se transfieren directamente a la estructura del túnel por el efecto de confinamiento, por lo que son nulos o de muy baja magnitud; en tanto que los esfuerzos longitudinales son, como máximo, similares a los esfuerzos membranales asociados a la presión interna P_{int} en el extremo hemisférico no sujeto a la presión externa P_{ext} .

La estructura inflable no sólo tiene que sellar el túnel, sino que también tiene que mantenerse estable en la sección del túnel en la que se encuentra desplegada. En un escenario de contención de agua, la fuerza axial ejercida por la columna de agua sobre la superficie hemisférica en contacto con el agua, puede ser lo suficientemente alta como para inducir el desplazamiento axial, lo que implica la falla del sistema de contención. Consecuentemente, la estabilidad axial se convierte en una condición crítica del proceso de diseño. La estabilidad axial de la estructura inflable en el túnel se puede mantener de dos maneras: 1) a través del uso de anclajes mecánicos que conectan el inflable a la sección de túnel y que impiden su desplazamiento durante el funcionamiento; 2) a través de la fricción generada por el contacto entre la porción cilíndrica del inflable y el perímetro interior del túnel. Con los anclajes mecánicos siempre existe el riesgo de concentración de tensiones, principalmente en la membrana del inflable que pueden inducir la falla local de la estructura. Por otro lado, el desarrollo de fuerzas friccionales requiere de una cierta longitud para equilibrar la resultante de fuerza axial generada por la presión externa, pero minimiza la generación de concentración de tensiones que originaría la presencia de anclajes y por ello se adopta para el diseño. De esta forma, la condición mínima de estabilidad axial estará asegurada cuando la resultante de las fuerzas friccionales f , desarrolladas a lo largo de la zona de contacto sea mayor o igual que la fuerza axial resultante de la presión externa F_{ext} (Figura 2-c)

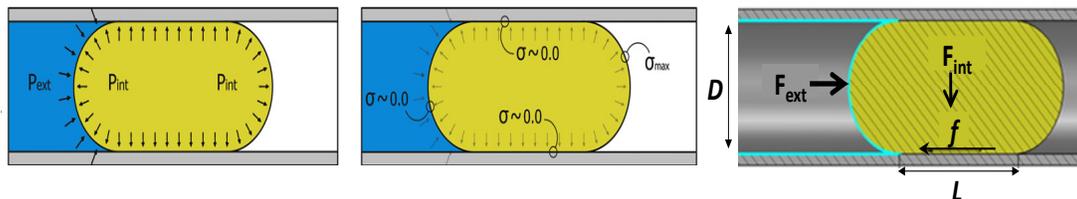


Figura 2: (a) Presiones intervinientes en el sistema; (b) Esfuerzos membranales originados por las presiones intervinientes; (c) Fuerzas resultantes de las presiones intervinientes (Martínez et al., 2012).

A partir de las de las consideraciones previas y para satisfacer el principio de operación descrito anteriormente, el diseño estructural de un tapón inflable para protección de túneles requiere cumplir, como mínimo, con las siguientes condiciones:

- 1) **Condición de forma:** Por un lado, la capacidad de sellado del inflable depende de la capacidad de la porción cilíndrica de adaptarse al perímetro real del túnel que incluye variados elementos que hacen que el perímetro de contacto no sea perfectamente cilíndrico. Por otro lado, si la presión externa P_{ext} es mayor que la presión interna P_{int} , la estabilidad geométrica del extremo hemisférico en contacto con el fluido se verá afectada cambiando el comportamiento estructural global así como la capacidad de sellado del inflable. Para mantener la funcionalidad del sistema, la presión interna P_{int} debe ser siempre mayor o igual que la presión externa P_{ext} . El factor de mayoración de la presión interna con respecto de la máxima presión externa esperada, dependerá de las condiciones particulares de operación, de la redundancia en el sistema de presurización y de su capacidad de recuperación ante un evento de despresurización repentina (Barbero et al., 2013-a).

- 2) **Condición de resistencia:** La resistencia R de la membrana debe ser suficiente para por lo menos resistir la presión de inflado inicial y la presión interna final provista por el sistema de presurización. La resistencia de la membrana también debe tener en cuenta la posibilidad de concentración de esfuerzos originados por las características de la superficie de contacto e irregularidades que se presenten la zona de despliegue del inflable. En el caso de un diseño consistente de un segmento cilíndrico con dos extremos hemisféricos, en el casquete hemisférico el máximo esfuerzo membranal es proporcional al radio de curvatura r de la semiesfera y a la presión interna P_{int} mayorada por un factor de seguridad que tiene en cuenta la variabilidad de la misma. Así, la resistencia membranal deberá ser $R > \sigma = (P_{int} FS_m) r / 2$, donde $FS_m > 1$ es el factor de mayoración de la presión interna. Sin embargo, la presión interna mayorada debería ser la menor posible para minimizar los esfuerzos membranales en el casquete hemisférico no sujeto a la presión externa (Figura 2-b). Por otro lado, el mismo esfuerzo membranal que actúa en los extremos hemisféricos se transfiere en la dirección longitudinal del segmento cilíndrico, por lo que la resistencia de la membrana en la zona de contacto queda definida con la de los extremos hemisféricos.
- 3) **Condición de estabilidad:** Para asegurar que el inflable no se deslizará a lo largo del túnel, la fuerza resultante de la presión externa debe ser menor que la resultante de las fuerzas de fricción. Del equilibrio de fuerzas planteado a partir de la condición de estabilidad y de las características friccionales del contacto entre la superficie externa del inflable con la superficie interna del túnel (Figura 2-c), se tiene que:

$$F_{ext} \leq F_f \quad (1)$$

donde F_{ext} es la fuerza resultante asociada a la presión externa P_{ext} y F_f es la resultante de las fuerzas de fricción desarrolladas en la porción cilíndrica del inflable a lo largo de la longitud de contacto L . La presión externa P_{ext} actúa sobre una de las caras hemisféricas del inflable cuya área transversal está definida por: $A_T = \pi r_e^2$, donde r_e es el radio equivalente obtenido a partir del perímetro actual de la sección transversal a cubrir y que está dado por $r_e = P/2\pi$, donde P es el perímetro actual de la sección transversal que tiene en cuenta la forma real del perímetro transversal y la presencia de todos los elementos del perfil transversal que estará en contacto con el inflable. Además, el área de contacto de la porción cilíndrica está definida por $A_C = 2 \pi r_e L$, donde r_e es el mismo radio equivalente usado para determinar el área transversal y L es la longitud de contacto del inflable. Luego, las fuerzas resultantes de la ecuación (1) se pueden expresar en términos de las presiones y áreas en las que estas actúan:

$$F_{ext} = P_{ext} \times FS \times A_T = P_{ext} \times FS \times \pi r_e^2 \quad (2)$$

$$F_f = \mu \times P_{int} \times A_C = \mu \times P_{int} \times 2\pi r_e L \times C_F \quad (3)$$

donde $FS > 1$, es un factor de mayoración de la presión externa que tiene en cuenta la variabilidad que pueda tener la magnitud de la misma; $C_F < 1$, es un factor de minoración del contacto por la presencia de arrugas o imperfecciones en el contacto que se pueden originar durante el despliegue del inflable. Para un contacto perfecto, el valor máximo de C_F será 1; μ es el coeficiente de fricción estático determinado experimentalmente y que es función de las características de la superficie de la membrana del inflable en contacto con la superficie del interior del túnel. Igualando y reorganizado las ecuaciones (2) y (3) se tiene que la longitud de contacto L está determinada por:

$$L \geq \frac{P_{ext} \times FS \times \pi r_e^2}{\mu \times P_{int} \times 2\pi r_e \times C_F} = \left(\frac{P_{ext}}{P_{int}} \times FS \right) \left(\frac{r_e}{2\mu \times C_F} \right) = \left(\frac{P_{ext}}{P_{int}} \right) \left(\frac{r_e}{2\mu \times C_F} \right) \times FS \quad (4)$$

De la ecuación (4) se pueden extraer las siguientes observaciones:

- 1) La longitud de contacto L depende del cociente entre la presión interna y externa actuantes en el sistema. De la condición de forma se tiene que la presión interna deberá ser siempre mayor o igual que la presión externa para mantener la forma del inflable mientras uno de los extremos hemisféricos está sujeto a la presión externa (Figura 2-a). El límite $P_{ext} = P_{int}$, en el cual el cociente es igual a 1, establece la longitud crítica de la porción del inflable en

contacto con el interior del túnel, que para un $FS = 1$, determina el límite después del cual el inflable comenzará a desplazarse a lo largo del túnel (Sosa et al., 2014-b).

2) La longitud L es inversamente proporcional a la magnitud de la presión interna del inflable, con lo cual una forma de reducir la longitud del inflable es incrementar la presión interna. Sin embargo, la magnitud de la presión está limitada por la condición de resistencia de la membrana que forma los extremos de la estructura.

3) La longitud L es también inversamente proporcional a la magnitud del coeficiente estático de fricción, con lo cual, mejoras en las características friccionales de las superficies de contacto permitirían reducir la longitud del inflable. De estudios experimentales realizados en muestras de material y prototipos a escala reducida se determinó que el coeficiente de fricción entre la superficie de textiles que pueden usarse como membranas estructurales y la superficie de revestimientos de hormigón que pueden encontrarse en túneles se encuentra en el rango de 0.2 a 0.8 dependiendo de las condiciones de las superficies en contacto (Molina, 2008; Sosa et al., 2014-b).

En las tres condiciones de diseño presentadas anteriormente se ha aplicado el criterio de esfuerzos o tensiones admisibles, en el cual se aplican factores de seguridad a cada condición para tener en cuenta las incertidumbres. Si bien este criterio es relativamente simple de implementar, también puede resultar en diseños conservadores y por tanto más costosos. Un camino alternativo sería implementar un criterio de diseño para estados límites, para los cuales existen procedimientos generales que han servido para el desarrollo de diseños de estructuras de acero, hormigón, madera, y otros materiales, para los cuales existen abundantes datos sobre su comportamiento para diversos tipos y combinaciones de cargas. La disponibilidad de esa información ha permitido una definición racional de factores de carga y resistencia aplicables a esos materiales y diseños. Sin embargo, este no es el caso para el diseño de estructuras inflables confinadas de gran escala, para las cuales no existen demasiados precedentes. Barbero et al. (2013-a) presentan un procedimiento de diseño de estructuras inflables confinadas basado en estados límites en el cual se tienen en cuenta la variabilidad de los parámetros de diseño, así como el nivel de confiabilidad que puede esperarse para diferentes factores de importancia asignados a las variables del diseño.

Prototipo a escala 1:1

El procedimiento presentado en la sección anterior se implementó para el diseño de un prototipo de escala 1:1. Se determinó que la presión externa o de inundación a la cual estará sometida el prototipo es de $P_{ext} = 80$ kPa. La presión interna a la que el prototipo estará sujeto es $P_{int} = 117$ kPa. El factor de seguridad al deslizamiento requerido es $FS = 1.5$. Una sección transversal de túnel como la ilustrada en la Figura 6 y las características friccionales de las superficies intervinientes reportadas en Sosa et al. (2014-b), se utilizaron para determinar las dimensiones globales del diseño. El diseño final consiste en una estructura inflable formada por un cilindro de 4.94 m de diámetro y de 4.64 m de longitud. Los extremos de la porción cilíndrica están cerrados por dos semiesferas de 2.47 m de radio. La longitud total del tapón inflable es de 9.58 m (Figura 3-a). El perímetro de la parte cilíndrica incluye un sobredimensionamiento del 5% para compensar la distribución no uniforme de material durante el despliegue e inflado inicial. Por otro lado, la membrana del tapón inflable consiste en un sistema de tres capas compuesta por una capa interna recubierta por una capa protectora intermedia, y esta a su vez recubierta por una capa externa formada por un macro textil creado a partir de correas (Figura 3-b). La capa interna es de tela de poliéster recubierta de uretano que le da características de impermeabilidad para estar en contacto directo con el fluido utilizado para el inflado y presurización. La capa intermedia es de tela de Vectran (Kuraray, 2012), sin recubrimiento, y cumple la función de proteger la capa interna. La capa externa consiste de un macro textil de tejido simple creado a partir de correas de 50 mm de ancho y 3 mm de espesor. Estas correas están formadas por fibras de Vectran (Kuraray, 2012) y cada correa tiene una capacidad máxima de 2.1 kN/mm. Desde el punto de vista estructural, la capa externa es la que tiene capacidad de absorber los esfuerzos membranales generados por la presurización. Las dos capas internas están sobredimensionadas para que no estén sujetas a los esfuerzos membranales y solo contribuyen a la masa y el volumen de la estructura. El peso total del tapón inflable es de aproximadamente 900 kg incluyendo los puertos de aluminio para inflado y drenado integrados en la membrana.

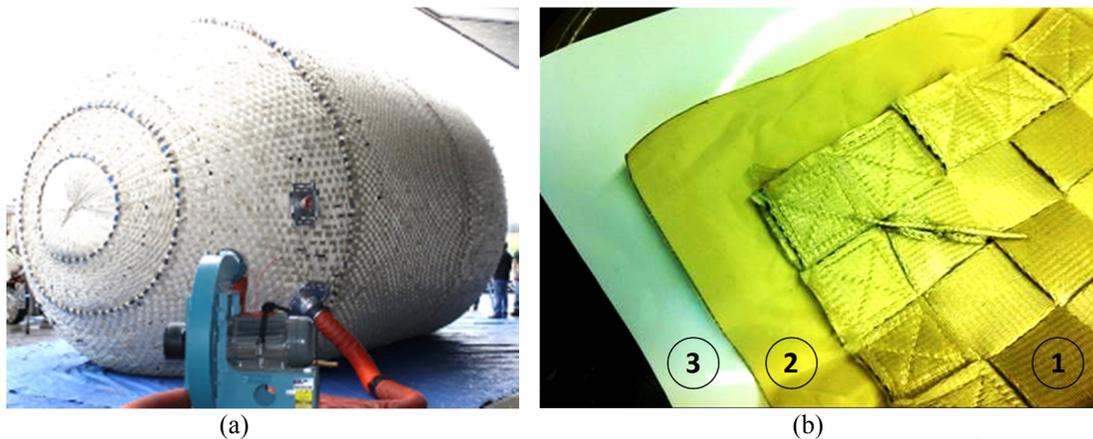


Figura 3: (a) Vista general de la estructura inflable; (b) Detalle de la membrana donde: ① Macro textil formado por correas de Vectran, ② Capa protectora intermedia y ③ Capa interna impermeable.

ENSAYOS A ESCALA 1:1

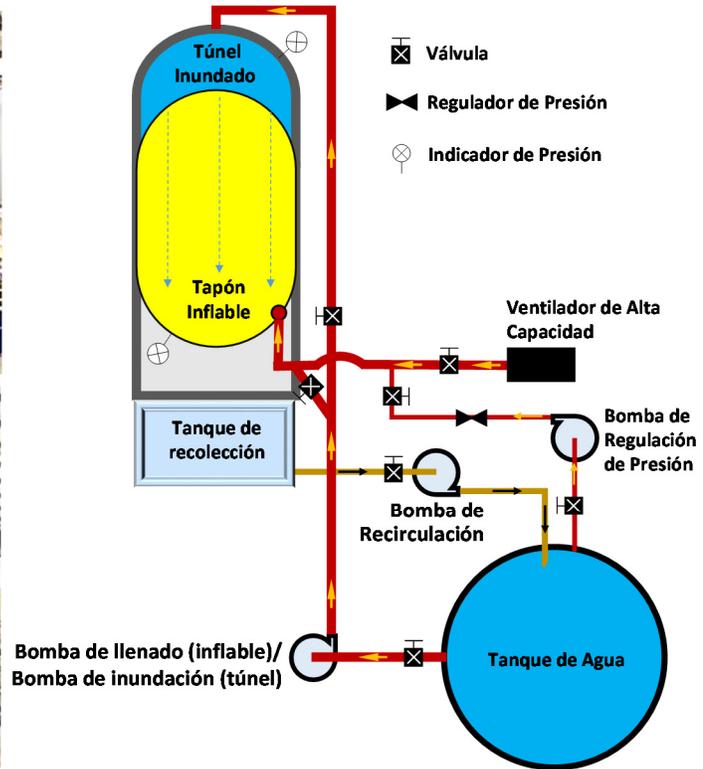
Configuración del simulador de inundación

El prototipo a escala 1:1 descrito en la sección anterior se ensayó en un simulador a escala 1:1 especialmente construido para representar un segmento de túnel sometido a presurización por inundación con agua. El simulador está constituido por los siguientes componentes principales:

1) Segmento de túnel cilíndrico 5 m de diámetro y de 15 m de largo, con un extremo cerrado y el otro abierto, constituido de una cáscara de acero revestido interiormente de hormigón con un espesor total de 5 cm y diseñada para soportar una presión interna de hasta 500 kPa. La sección transversal interior del túnel está reconfigurada para representar una sección transversal típica de túneles de metro (Figuras 4-a y Figura 6-a).

2) Sistema de inflado y presurización del tapón inflable: diseñado para operar inicialmente con aire durante el despliegue inicial e inflado a baja presión (3 kPa), seguido de presurización del tapón inflable con agua hasta alcanzar la presión de diseño. El despliegue e inflado inicial se completa con un ventilador de aire a baja presión y alta capacidad volumétrica (hasta 70 m³/min) que se mantiene activo hasta que el inflable esté completamente posicionado en el túnel. Luego, para la presurización, el inflable se llena con agua usando una bomba diésel de alta capacidad al mismo tiempo que se purga el aire usado para el inflado inicial. Cuando el tapón inflable está completamente lleno de agua, la bomba diésel se desactiva al mismo tiempo que se activa una bomba eléctrica de menor capacidad, que conectada a un regulador de presión, mantiene la presión interna del tapón inflable.

3) Sistema para inundación y presurización del túnel: para el llenado y presurización del túnel se utiliza la misma bomba diésel utilizada para el llenado del inflable, pero redireccionando el flujo de agua por medio de las válvulas instaladas en el sistema de tuberías. El agua de inundación que se escurre por la zona de contacto entre el interior del túnel y la porción cilíndrica del inflable se recolecta en un tanque ubicado en el lado abierto del túnel. Una segunda bomba diésel, devuelve el agua filtrada a un tanque de reserva de 320 m³ que alimenta todo el sistema. El sistema de control de presurización del inflable y de inundación del túnel está diseñado para proporcionar un flujo de agua constante y para recircular el agua filtrada recolectada en el tanque de recolección de modo que todo el proceso de presurización pueda estabilizarse para la realización de las mediciones. La Figura 4-b muestra un esquema del simulador indicando la posición relativa y función de sus componentes principales.



(a) (b)
Figura 4: Simulador de inundación de túnel; (a) Vista exterior del segmento de túnel; (b) Representación esquemática de los sistemas de inflado, presurización e inundación.

Preparación del tapón inflable

La preparación del tapón inflable para la ejecución de pruebas a escala 1:1 se completó en dos etapas. La primera etapa consistió en el plegado de acuerdo a una secuencia diseñada para facilitar el despliegue y expansión durante el inflado inicial a baja presión. La segunda etapa de preparación consistió en el posicionamiento del inflable plegado en un contenedor de almacenaje. En esta etapa se implementaron dos variantes de contenedor: uno fijo y preinstalado en el túnel en el cual el inflable se instaló ya plegado con ayuda de una malla de transporte y contención (Barbero et al., 2012-b); y otro portable en el que el inflable se almacena como parte del proceso de plegado para luego transportar el conjunto contenedor-inflable y finalizar su instalación en el túnel simulado. De la implementación de estas dos opciones se concluyó que la opción de utilizar un contenedor portátil es más factible de implementación en los sistemas reales dado las limitaciones de espacio y tiempo que impiden detener la operación diaria del túnel. Por otra parte, el proceso de plegado requirió la definición de una secuencia de pasos para sistematizar el proceso con el propósito de hacerlo repetible de manera consistente para la realización de las pruebas y que también fuera implementable en los sistemas reales. En términos generales, la preparación del tapón inflable requiere:

- 1) Inflado con aire a baja presión (menos de 1 kPa), en un espacio abierto y sin restricciones en el espacio circundante al inflable para inspección de la superficie, alineado y reposicionamiento, seguido de una deflación controlada. (Figura 5-1).
- 2) Conexión del inflable al contenedor portable e implementación de la secuencia de plegado (Figura 5-2 y 5-3).
- 3) Almacenaje del inflable plegado en el contenedor y cierre del contenedor (Figura 5-4).
- 4) Transporte, posicionamiento y asegurado final en el interior del túnel (Figuras 5-5 y 5-6).

La posición final en la zona lateral del túnel de los dos tipos de contenedor utilizados en las pruebas una vez finalizadas las tareas de preparación se ilustran en la Figura 6.



Figura 5: Secuencia de preparación del inflable (Sosa et al, 2014-a).

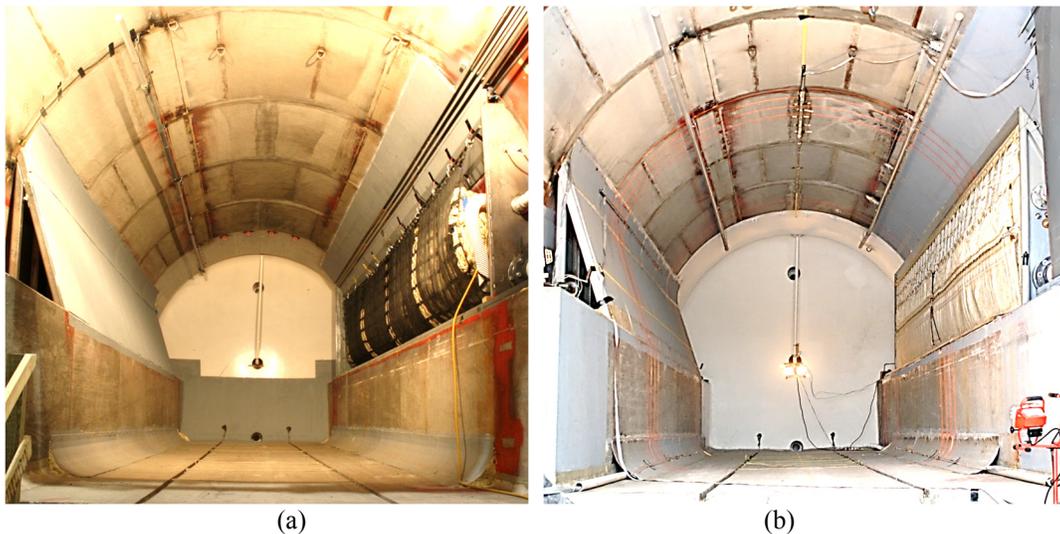


Figura 6: (a) Inflable instalado en un contenedor preinstalado en el túnel (Barbero et al., 2013-b); (b) Inflable instalado en contenedor portátil (Sosa et al, 2014-a).

Procedimiento de ensayo

El procedimiento para simulación de despliegue e inflado y presurización del tapón inflable, seguido de inundación del túnel, consistió en los siguientes pasos:

- 1) Despliegue del inflable. Tras la activación del sistema de apertura de la cubierta flexible del contenedor, ésta se abre y permite el despliegue inicial del inflable por acción de su propio peso.
- 2) Inflado con aire a baja presión. El despliegue inicial es seguido por la activación automática del ventilador de aire configurado para proveer un flujo de aire de $42 \text{ m}^3/\text{min}$. El proceso de inflado continúa hasta que el tapón ha

completado su posicionamiento dentro de la sección de túnel en un tiempo de 2.5 a 3 minutos. Cuando el tapón está completamente inflado, la presión se mantiene constante en 2 kPa.

3) Evaluación de contacto local y global. Con el inflable completamente posicionado en el interior del túnel y manteniendo la presión constante, el nivel de adaptación del inflable a la superficie interior del túnel se evaluó mediante dos criterios:

Criterio I: basado en la inspección visual de puntos específicos en el perímetro del inflable accesibles desde el extremo abierto del túnel. Este indicador se creó con el objetivo de examinar la calidad de contacto local asignando calificaciones numéricas a zonas específicas consideradas críticas para proseguir con la prueba. Se identificaron nueve zonas críticas basadas en el potencial de permitir filtraciones de agua por deficiencias en el contacto (Figura 9-a). Cada zona se calificó usando una escala ponderada que califica en el nivel de adaptabilidad de la membrana del inflable a la superficie del túnel observado durante la inspección visual y la importancia de tener un buen sellado. En términos generales, un buen nivel de adaptabilidad implica un buen nivel de contacto, mientras que un bajo nivel de adaptabilidad implica bajo o ningún contacto en la zona en particular. Para cada prueba, la suma de los indicadores locales genera un indicador global del nivel de adaptabilidad que varía entre un máximo de 10, para un contacto óptimo, y un mínimo de 0, en cual el inflable está desalineado y con múltiples brechas o cavidades locales. Para esta última situación, la simulación de inundación no debería ejecutarse porque el caudal filtrado sería inmanejable para la bomba de recirculación y para el drenaje del tanque de recolección.

Criterio II: basado en la detección de contacto entre el inflable y el perímetro del túnel desarrollado a lo largo de la porción cilíndrica del inflable. El contacto se detectó utilizando sensores electrónicos de contacto colocados en seis grupos de ocho sensores cada uno, e instalados en lugares considerados críticos tales como esquinas, transiciones y cambios en el perímetro interno del túnel (Figura 10). El nivel de contacto se mide por el número de sensores activados durante la prueba con respecto al número total de sensores disponibles, expresado en porcentaje.

4) Llenado del inflable con agua y posterior presurización. Completada la evaluación local y global, el ventilador se desactiva y se aísla del resto del sistema de tuberías. A continuación se procede a llenar el inflable con agua usando una de las bombas diésel (Figura 4-b). Simultáneamente al proceso de llenado con agua, el aire contenido en el inflable se libera por el sistema de purgado de aire para mantener una presión constante de 20 kPag. Cuando todo el aire se ha eliminado, la bomba diésel usada para el llenado se desactiva y se sustituye por una bomba eléctrica que proporciona flujo a un regulador de presión, que mantiene la presión interna del inflable constante en 117 kPag por la duración del ensayo.

5) Simulación de inundación del túnel. Las válvulas del sistema de inflado se reposicionan para redirigir el flujo de agua proveniente del tanque de reserva hacia la parte posterior del túnel con el objeto de llenar la cavidad creada entre el inflable y la parte cerrada del túnel. La misma bomba usada inicialmente para llenar el inflable con agua, se usa ahora para llenar el túnel. Una vez lleno, la presión de inundación se mantiene constante en 80 kPag por la duración del ensayo.

6) Mediciones. Los ciclos de llenado y vaciado del tanque de recolección permiten realizar mediciones del caudal de filtración al mismo tiempo que las presiones del inflable y del túnel se mantienen constantes durante al menos 75 minutos. Simultáneamente a la medición del caudal de filtración se monitorea el desplazamiento axial horizontal del inflable para verificar la estabilidad del sistema.

7) Despresurización y extracción del inflable. Completadas las mediciones, se procede al despresurizado y drenado del túnel manteniendo la presión del inflable constante. Completada el drenaje de túnel se procede a la despresurización y drenaje del inflable. Finalmente, el inflable se extrae del túnel y se inicia el proceso de preparación para la ejecución de otro ensayo.

Se realizaron un total de seis ensayos a escala 1:1. Cuatro de ellos incluyeron sólo el despliegue del inflable seguido del inflado y presurización con aire a 1.7 kPag siguiendo los pasos 1 a 3 y 7 descritos anteriormente. Estos ensayos se designaron como T1A a T4A. Los dos ensayos restantes incluyeron el despliegue del inflable, inflado inicial con aire, presurización del inflable y túnel con agua para simulación de inundación, de acuerdo a los pasos 1 a 7 descritos previamente. Estos dos ensayos se denominaron T5AW and T6AW.

RESULTADOS

Despliegue e inflado con aire a baja presión

El despliegue comenzó con la activación automática del mecanismo de apertura de la cubierta flexible del contenedor que a su vez produjo la liberación y desenrollado del inflable por su propio peso. Simultáneamente se comenzó con el inflado con aire en dos etapas: 1) Inflado inicial con un flujo de $42 \text{ m}^3/\text{min}$ hasta alcanzar una presión de 2 kPag; 2) Alcanzada la presión de 2 kPag, esta se mantuvo constante y el flujo de aire se redujo a $1.4 \text{ m}^3/\text{min}$ para mantener la forma del inflable dentro del túnel. El tiempo total de despliegue e inflado se midió en todos los ensayos y resultó en promedio de 2.9 minutos. Un aspecto clave para el posicionamiento correcto del inflable es la liberación secuencial del material que constituye la membrana del inflable. Esta liberación secuencial se logró a través de la creación de pliegues de material ligados con bridas de nylon, con capacidad de fallar a tensión para una fuerza axial de 800 N, e instaladas de forma puntual a lo largo de la superficie cilíndrica del inflable durante el proceso de plegado. La ruptura por tensión gradual de las bridas produjo la liberación secuencial del material de la membrana del inflable asegurando una cobertura relativamente uniforme del perímetro interno del túnel. La Figura 7 muestra un ejemplo de la secuencia de despliegue e inflado inicial con aire a baja presión. La Figura 8 muestra un ejemplo de la evolución del flujo de aire y de la presión interna durante el proceso de inflado.



Figura 7: Secuencia de despliegue e inflado inicial (T6AW) (Sosa et al., 2014-a).

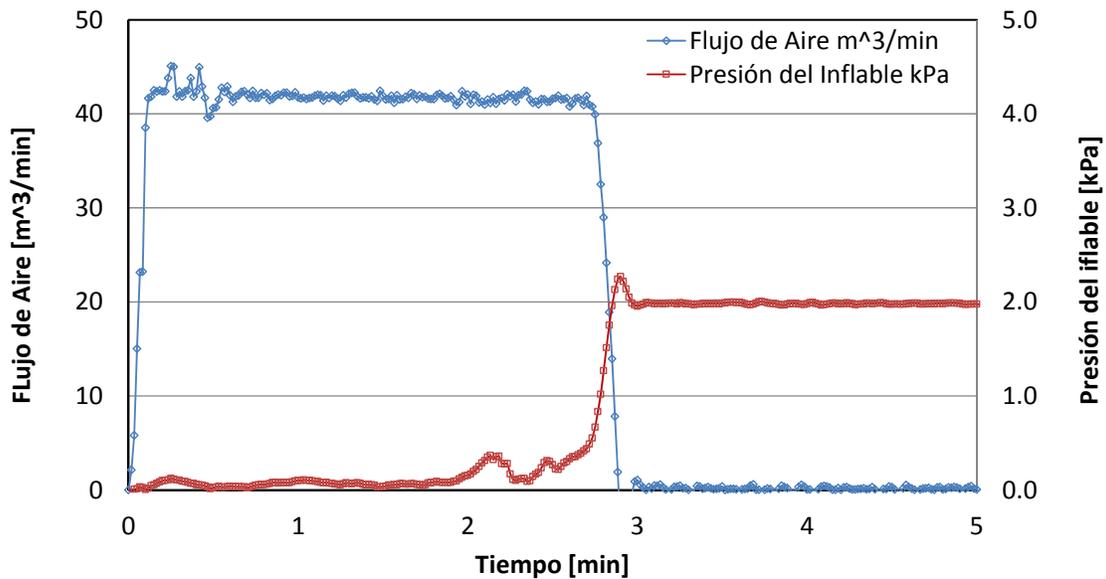


Figura 8: Evolución de flujo de aire y presión interna para el ensayo T6AW.

Evaluación de contacto

El nivel de contacto o adaptabilidad del inflable a la sección del túnel se evaluó al final del inflado con aire. El Criterio I, basado en inspección visual, se implementó en todos los ensayos. A cada punto de inspección se le asignó una calificación parcial que contribuye a una calificación global indicativa de la calidad del contacto. Ensayos preliminares mostraron que para proceder con la simulación de inundación del túnel es necesario una calificación mínima de 7/10. Para la serie de ensayos reportados en este trabajo, las calificaciones variaron entre 7.5 y 9.3, con un promedio de 8.4. Estos resultados son indicativos de un nivel aceptable de contacto del inflable con la superficie interior del túnel. La Figura 9 muestra un ejemplo de los puntos de inspección y la Tabla 1 resume los resultados obtenidos en todos los ensayos.

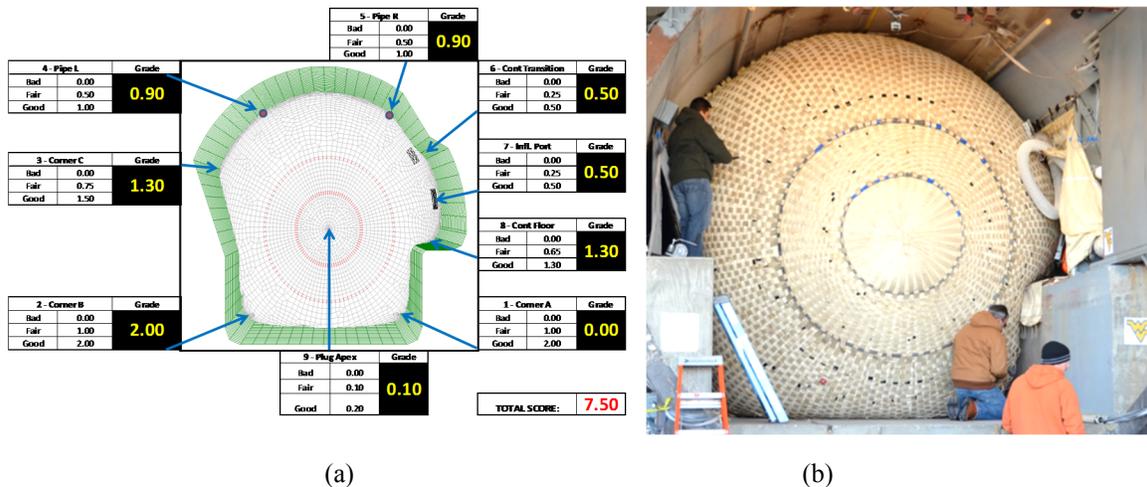


Figura 9: (a) Formato para evaluación local de nivel de contacto por inspección visual; (b) Inspección visual durante uno de los ensayos.

Tabla 1: Resumen de resultados de evaluación de contacto según el Criterio I.

Ensayo N°	Calificación Local									Total
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	
T1A	2.00	2.00	1.20	0.50	0.60	0.25	0.30	0.65	0.10	7.60
T2A	0.75	2.00	1.40	0.80	0.80	0.50	0.50	1.20	0.20	8.15
T3A	2.00	2.00	1.35	0.80	0.80	0.40	0.50	1.10	0.10	9.05
T4A	1.80	2.00	1.40	0.80	0.80	0.40	0.40	1.20	0.10	8.90
T5AW	0.00	2.00	1.30	0.90	0.90	0.50	0.50	1.30	0.10	7.50
T6AW	2.00	2.00	1.40	0.80	0.80	0.40	0.50	1.30	0.10	9.30
Promedio	1.43	2.00	1.34	0.77	0.78	0.41	0.45	1.13	0.12	8.42
Max Local	2.00	2.00	1.50	1.00	1.00	0.50	0.50	1.30	0.20	
% Promedio Local	71%	100%	89%	77%	78%	82%	90%	87%	58%	

Por otro lado, el nivel de contacto a lo largo de la porción cilíndrica del inflable se evaluó usando el Criterio II, basado en el contacto detectado por sensores electrónicos de contacto. Al final del inflado de aire, el contacto detectado por los sensores varió entre 60% y 94%, con un promedio de 78%. Con este criterio, porcentajes altos de contacto también son indicativos de un buen nivel de conformidad local en lugares que no son accesibles para inspección visual. Un aspecto importante de la información obtenida con los sensores de contacto es que el porcentaje de contacto total se mantuvo aproximadamente constante a medida que las pruebas progresaron desde el

inflado con aire (a una presión de 2 kPag) a la simulación de inundación (con una presión en el inflable de 117 kPag). Este resultado se atribuye a la inextensibilidad del sistema de tres capas que constituye la membrana y a la fricción de la membrana con la superficie del túnel. Se especula que si el contacto en la posición correcta no se origina al inicio del despliegue e inflado a relativamente baja presión, este no mejorará o se modificará significativamente con el incremento de presión, lo cual incrementa la posibilidad de creación de brechas o aberturas que luego no es posible cerrar con solo incrementar la presión interna del inflable. La Figura 10 muestra la posición de los sensores y un ejemplo de la información recolectada por los mismos. La Tabla 2 resume los resultados obtenidos con los sensores de contacto en todos los ensayos.

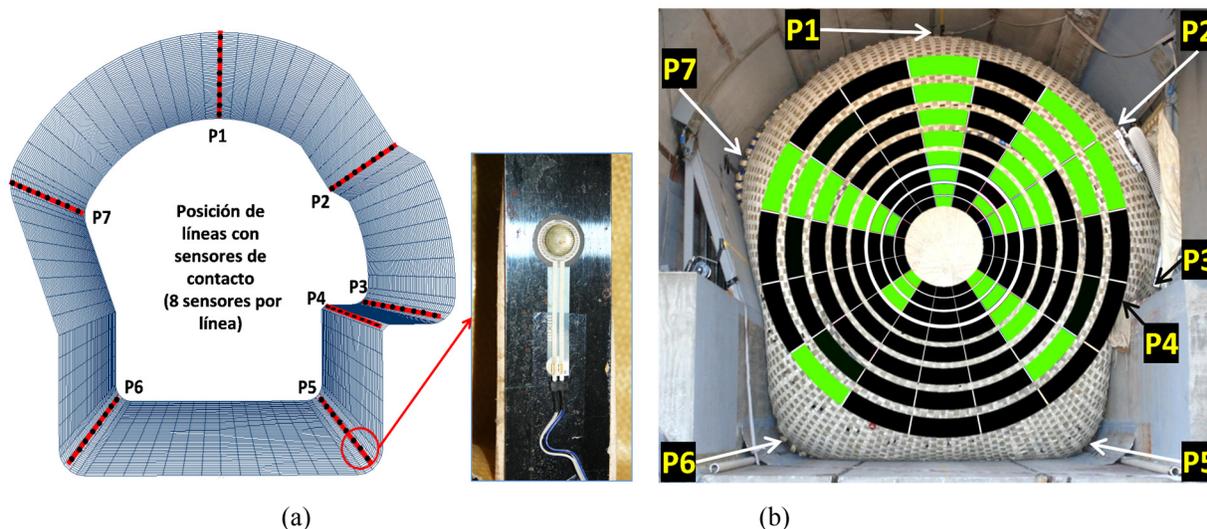


Figura 10: (a) Posición de sensores electrónicos de contacto dentro del túnel y detalle de un sensor; (b) Ejemplo de información provista por los sensores, donde el color verde para la posición P_i indica presencia de contacto a lo largo de la porción cilíndrica del inflable.

Tabla 2: Resumen de resultados de evaluación de contacto según el Criterio II.

Ensayo N°	Posición y número de sensores con señal							Total	N° Total de Sensores	% Contacto Global
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7			
T1A	6		0	6	6	3	8	29	48	60%
T2A	7		8	8	4	5	7	39	48	81%
T3A	8		8	8	6	7	8	45	48	94%
T4A	8		7	8	2	3	8	36	48	75%
T5AW	8	8	8		0	8	7	39	48	81%
T6AW	8	6	6		6	4	7	37	48	77%
Promedio	7.5	7.0	6.2	7.5	4.0	5.0	7.5	38	48	78%
Max N° de sensores	8	8	8	8	8	8	8	48		
% Promedio Local	94%	88%	77%	94%	50%	63%	94%	78%		

De ensayos preliminares (Barbero et al., 2013-b), así como de los resultados presentados en este trabajo, se encontró que la presencia de brechas o aberturas localizadas está influenciada por dos factores principales: 1) el sobredimensionamiento del perímetro de la porción cilíndrica del inflable con respecto al perímetro del túnel; 2) la forma de las transiciones en las esquinas y ángulos existentes en el perfil del túnel. Para el primer factor, se encontró que un sobredimensionamiento de al menos 5% es necesario para lograr niveles de conformidad local aceptables. Si bien se estima que porcentajes mayores de sobredimensionamiento podrían resultar beneficiosos para reducir la posibilidad de formación de brechas durante el despliegue, un exceso también puede resultar contraproducente, ya

que con el exceso de material se pueden formar grandes arrugas o pliegues de material que conducen a la formación de más distorsiones con el subsiguiente aumento en el flujo de filtraciones. Para el segundo factor, los ensayos demostraron que las transiciones redondeadas funcionan bien cuando el despliegue resulta prácticamente sin defectos; sin embargo, la repetición de las pruebas demostró la variabilidad en la calidad de contacto a nivel local. Una forma de reducir la posibilidad de formación de brechas es la implementación de transiciones planas o de baja curvatura en sectores con ángulos agudos y con cambios geométricos significativos. La determinación del límite superior de sobredimensionamiento y la implementación de transiciones modificadas requieren de pruebas adicionales a concretarse en futuras etapas del desarrollo del sistema.

Presurización y monitoreo de estabilidad

Una vez completada la evaluación de contacto local y global, se procedió a la presurización del inflable usando agua. El proceso de llenado del inflable consistió en la sustitución de aire utilizado para el inflado inicial por agua a un flujo de 4 m³/min manteniendo una presión interna constante de 20 kPag. Este proceso duró aproximadamente 35 minutos hasta que todo el aire en el interior del inflable fue sustituido por aproximadamente 132 m³ de agua. Con el inflable completamente lleno de agua, la bomba diésel de llenado se reemplazó por una bomba eléctrica conectada a un regulador de presión para ajuste fino y estabilización de la presión interna del inflable en 117 kPag medidos en la base del inflable en las posiciones P5 y P6 indicadas en la Figura 10-b.

Una vez estabilizada la presión del inflable, se procedió al llenado del túnel para simular el proceso de inundación. El volumen de la cavidad creada entre un extremo del inflable y el extremo cerrado del túnel (Figura 4) se llenó también con agua a un flujo de 5.6 m³/min con el cual el túnel quedó completamente inundado en aproximadamente 8 min. La misma bomba diésel utilizada para el llenado del túnel, también se utilizó para estabilizar y mantener la presión en el túnel en 80 kPag medidos en las posiciones P5 y P6 indicadas en la Figura 10-b. Estabilizadas las presiones del inflable y del túnel, ambas se mantuvieron constantes durante aproximadamente 75 minutos para la evaluación del caudal de filtración. La Figura 11 muestra una secuencia de imágenes captadas durante el proceso de inundación del túnel. La progresión de las presiones interna e externa durante la fase de presurización se ilustra en la Figura 12-a.

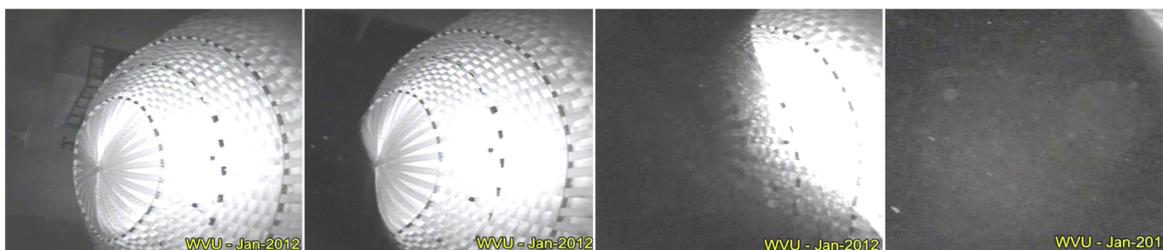


Figura 11: Secuencia de imágenes captadas durante el proceso de inundación.

La estabilidad del sistema se verificó mediante el monitoreo de desplazamiento axial del inflable a lo largo del túnel. El movimiento axial relativo se midió mediante un láser apuntando horizontalmente hacia el ápice de la semiesfera visible del inflable durante la totalidad de la secuencia de presurización. Un ejemplo de la evolución del desplazamiento se ilustra en la Figura 12-b. Los resultados muestran que después de la oscilación inicial producida por la fluctuación en las presiones al alcanzar los valores de ensayo, no hay movimiento significativo del inflable cuando las presiones están estabilizadas. Desde el comienzo hasta el final de la presurización del túnel, el desplazamiento axial osciló en ± 1.27 mm. Las oscilaciones observadas en la señal graficada en la Figura 12-b se atribuyen a la interferencia entre el agua escurriendo sobre la superficie del inflable con el láser utilizado durante las mediciones. Estos resultados confirmaron la estabilidad axial longitudinal del inflable dentro del túnel cuando las presiones se mantuvieron constantes en los valores de ensayo.

Evaluación del caudal de filtración

Durante la evaluación del contacto del inflable con el interior del túnel se observó que si bien el tapón inflable puede estar correctamente posicionado y aparentar estar sellando todo el perímetro, el contacto no es uniforme a lo

largo de la zona de contacto. Esto facilita la filtración de agua a través de la superficie externa del inflable y la superficie interior del túnel. Para medir el caudal de filtrado, se dejó llenar el tanque de recolección (Figura 4-b) al mismo tiempo que un medidor ultrasónico de profundidad registraba el cambio del nivel del agua en el tanque. Este cambio en el nivel del agua, junto con el volumen conocido del tanque de recolección se utilizaron para estimar el caudal de filtrado. Una vez que el tanque estaba lleno, una bomba de recirculación de agua se puso en marcha para drenar el tanque hasta que estaba casi vacío nuevamente, para luego desactivar la bomba y permitir que el tanque se llenara nuevamente con el agua proveniente del túnel. Este proceso de llenado y vaciado del tanque de recolección se repitió al menos quince veces con el fin de tener múltiples lecturas para la estimación del caudal de filtración a presión constante. Un ejemplo de los datos registrados para la evaluación del caudal de filtración se muestra en la Figura 12-c.

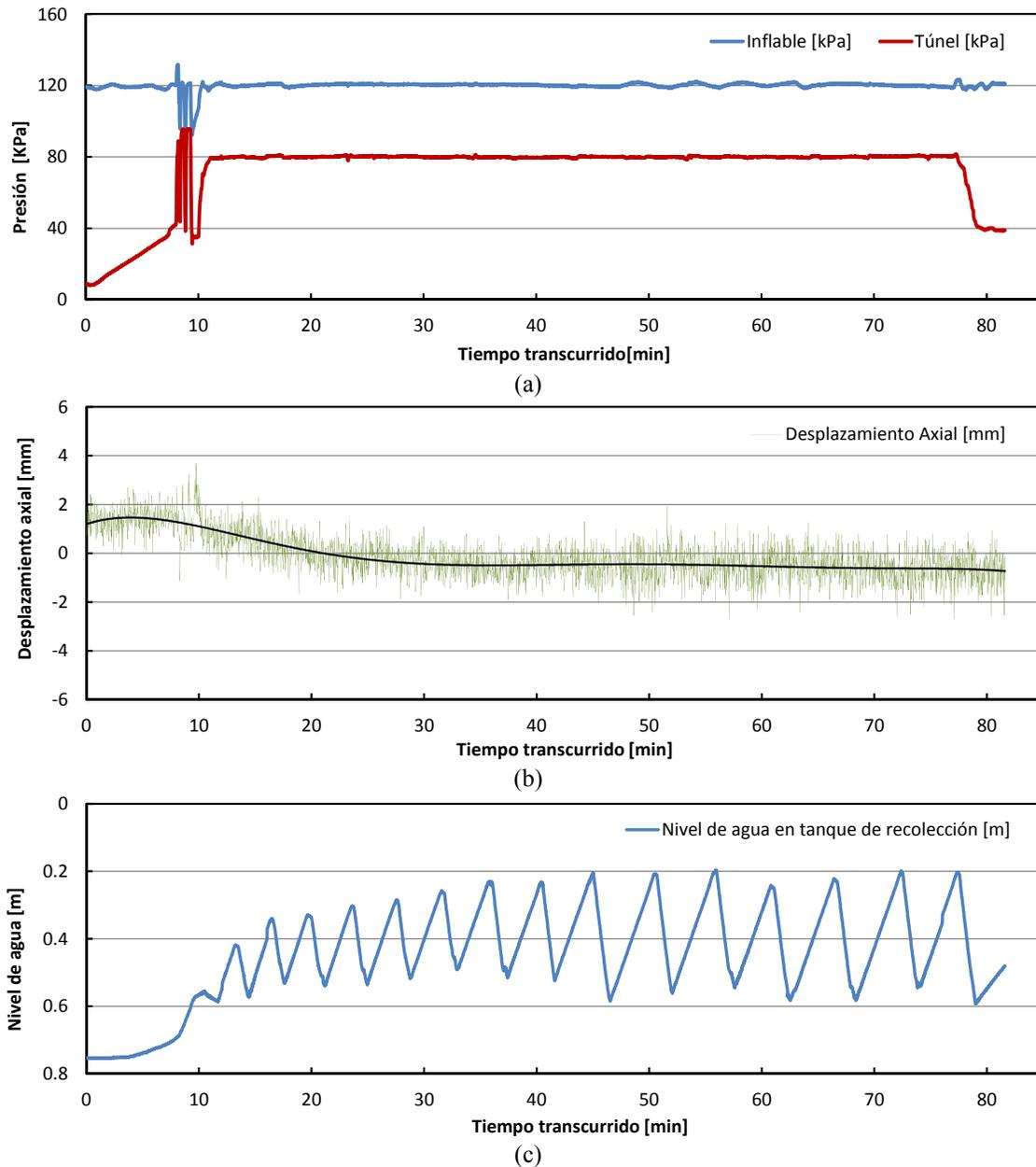


Figura 12: Ensayo T6AW: (a) Presiones interna y externa; (b) Desplazamiento axial; (c) Medición de caudal filtrado, ciclos de llenado y vaciado del tanque de recolección (Sosa et al., 2014-a).

El caudal promedio de filtración para el ensayo T5AW fue de 2.5 m³/min, mientras que para el ensayo T6AW, el caudal se redujo a 1.49 m³/min, que resulta en un promedio de aproximadamente 2 m³/min. La diferencia entre los resultados de las dos pruebas se atribuye a que durante el despliegue del inflable en el ensayo T5AW, se detectó la formación de brechas en dos sectores del perímetro, una en el interior del contenedor y otra al nivel del piso del túnel que facilitaron la filtración de agua. Por otro lado, en las tareas de preparación del ensayo T6AW, se instalaron juntas de neopreno con el objeto de reducir la formación de brechas en el interior del contenedor portátil y por lo tanto reducir el flujo de filtración proveniente de esa zona. Esta modificación, sumada al buen nivel de conformidad logrado durante el despliegue inicial contribuyeron a mejorar la capacidad de sellado del inflable. La Tabla 3 resume los caudales de filtración reportados en Barbero et al. (2013-b), en el que se utilizó un contenedor preinstalado (Figura 6) junto a los resultados reportados en este trabajo, en el que se implementó un contenedor portátil para almacenar el inflable.

Tabla 3: Resumen de caudal de filtración.

Prueba N°	Caudal de filtración	
	[m ³ /min]	[galones/min]
1*	1.70	450
2*	1.99	526
3*	2.76	729
T5AW	2.50	661
T6AW	1.49	393
Promedio	2.09	552

*Obtenido de Barbero et al. (2013-b).

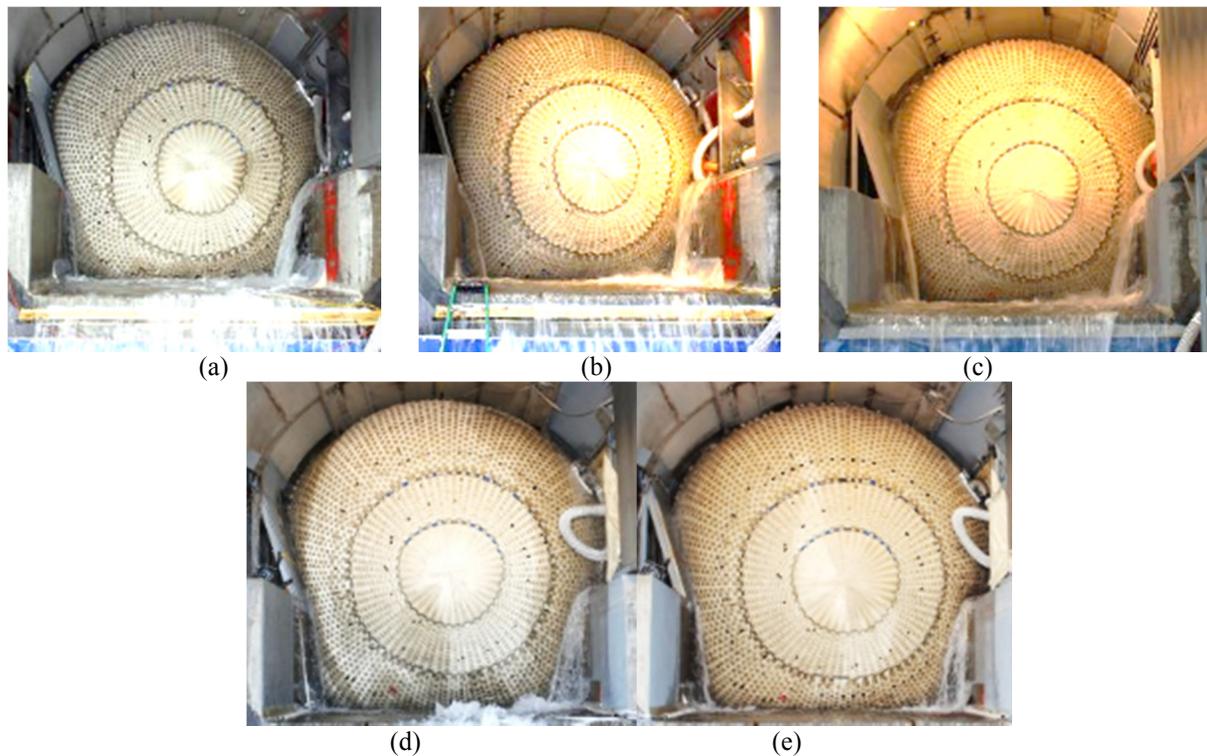


Figura 13: Ensayos de inundación de túnel a escala 1:1. (a) Prueba 1*; (b) Prueba 2*; (c) Prueba 3* (Barbero et al. 2013-b); (d) Prueba T5AW; (e) Prueba T6AW. (Sosa et al. 2014-a).

La Figura 13 muestra cualitativamente la diferencia entre los ensayos T5AW y T6AW durante la evaluación del caudal de filtración comparación con los resultados reportados en ensayos preliminares reportados en Barbero et al. (2013-b). Como puede verse en la Figura 13, el sector con aparente mayor caudal de filtración de agua se encuentra en base del contenedor. Si bien la implementación del juntas de neopreno contribuyó a mejorar la capacidad de sellado, todavía son necesarias modificaciones adicionales, sean geométricas o en la forma de conexión del inflable al contenedor, para reducir el flujo proveniente de esa zona. No obstante, los resultados todavía demuestran que la capacidad de bloqueo del tapón inflable es aceptable, teniendo en cuenta que este está conteniendo aproximadamente 45 m³ (12,000 galones) de agua a una presión de 80 kPa con un caudal de fuga de aproximadamente 2 m³/min que es manejable por la bomba de recirculación. Este caudal de fuga se compensó con la bomba diésel de simulación de inundación funcionando a una velocidad relativamente baja (1,000 rpm) con el fin de mantener constante la presión del túnel. Como referencia, una bomba de diésel de alta capacidad típicamente puede drenar un área inundada con caudales de bombeo que oscilan entre 11 a 19 m³/min sin inconvenientes. Estos resultados demuestran la capacidad del tapón inflable para contener el flujo de agua generado por la inundación del túnel.

CONCLUSIONES

El presente trabajo resume el proceso y consideraciones para el diseño y evaluación a escala 1:1 de una estructura inflable creada para la contención de inundaciones en túneles típicos de sistemas de transporte urbano masivo.

Los procedimientos desarrollados para la ejecución de pruebas en escala 1:1 demostraron la viabilidad de la instalación de un sistema compacto y desplegable dentro de los límites de espacio disponible dentro de una sección de túnel típica.

Los resultados de los ensayos a escala 1:1 presentados en este trabajo demostraron la factibilidad de desplegar automáticamente una estructura inflable de aproximadamente una tonelada de peso propio y de inflarla con aire a baja presión en aproximadamente 3 minutos.

Una vez posicionado y presurizado, el tapón inflable es capaz de soportar la presión de inundación del túnel sin deslizarse horizontalmente a lo largo del túnel. Si bien el diseño del inflable demostró poder contener la presión originada por la inundación del túnel, el sellado provisto por el inflable ocupando todo el perímetro interior del túnel no es completamente estanco. Las mediciones del caudal de agua filtrada entre la superficie del inflable y la del interior del túnel demostraron que el caudal filtrado no es despreciable, pero sí es completamente manejable con bombas de drenaje convenciones y normalmente disponibles en túneles actualmente en operación.

De las evaluaciones de contacto o adaptabilidad del inflable a las características particulares del interior de un túnel, se concluyó que la obtención de altos niveles de contacto global y local al inicio del proceso de despliegue e inflado con el aire a baja presión, es crítica para la reducción del caudal de agua filtrada durante el proceso de contención de inundación.

El porcentaje de sobredimensionamiento del perímetro de la membrana en contacto con el túnel, la secuencia de liberación contra la de la membrana del inflable durante el despliegue inicial para asegurar la máxima cobertura, así como la forma de las transiciones geométricas para suavizar el perfil interior del túnel, se identificaron como factores críticos factibles de optimización con el propósito de reducir el caudal de filtración y por tanto, maximizar la capacidad de sellado del tapón inflable.

RECONOCIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el patrocinio de este trabajo al Departamento de Seguridad Interior, División de Ciencia y Tecnología (US DHS S&T).

REFERENCIAS

- Barbero, E.J., Sosa E.M., Martínez X. y Gutiérrez J.M. (2013-a). “Reliability design methodology for confined high pressure inflatable structures”, *Engineering Structures*, Vol. 51, pp. 1-9.
- Barbero, E.J., Sosa, E. M. y Thompson, G. J. (2013-b). “Testing of full-scale confined inflatable for the protection of tunnels”, *Proceedings of the VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Structural Membranes 2013*, Munich, Germany.
- Barrie, A. (2008). “Going underground: homeland security works on tool to prevent tunnel disasters”. Recuperado el 6 de enero de 2013 de: <http://www.foxnews.com/story/0,2933,417461,00.html>.
- Fountain, H. (2012). *Holding back floodwaters with a balloon*, The New York Times/Science Supplement. Recuperado el 20 de noviembre de 2012 de: <http://www.nytimes.com/2012/11/20/science/creating-a-balloonlike-plug-to-hold-back-floodwaters.html>.
- Inouye, R.R. y Jacobazzi, J.D. (1992). “The great Chicago flood of 1992”, *Civil Engineering, ASCE*, Vol. 62, No. 11, pp. 52–55.
- Kuraray Co. (2012). *Homeland Security: A Big Plug for Vectran*. Recuperado de: <http://www.vectranfiber.com/NewsInformation/tabid/83/EntryId/23/Homeland-Security-A-Big-Plug-for-Vectran.aspx>.
- Lindstrand Technologies (2013). *Inflatable Tunnel Plugs*. Recuperado de: <http://www.lindstrandtech.com/innovation-centre-main/innovation-centre/inflatable-tunnel-plugs/>
- Martinez, X., Davalos, J., Barbero, E., Sosa, E., Huebsch, W., Means, K., Banta, L. y Thompson, G. (2012). “Inflatable plug for threat mitigation in transportation tunnels”. *Proceedings of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) 2012 Conference*, Baltimore, Maryland.
- Molina-Pombo, J.C. (2008). “Mechanical Characterization of Fabrics for Inflatable Structures”, M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering Department, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- Parsons-Brinckerhoff Quade & Douglas, Science Applications International Corp. e Interactive Elements Inc. (2006). “Making Transportation Tunnels Safe and Secure: Public Transportation Security”, TCRP Report 86/NCHRP Report 525, Transportation Research Board of the National Academies, Vol. 12, Washington, D.C.
- Post, Buckley, Schuh & Jernigan, Inc. (2005). *Hurricane Isabel Assessment: Review of Hurricane Evacuation Study Products and Other Aspects of the National Hurricane Mitigation and Preparedness Program (NHMP) in the Context of the Hurricane Isabel Response*, National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA).
- Rabkin, N.J. (2007). “Passenger Rail Security: Federal Strategy and Enhanced Coordination Needed to Prioritize and Guide Security Efforts”, Report GAO-07-583T, U.S. Government Accountability Office.
- Sill, J.J., Means, K.H., Sosa, E.M. y Barbero, E.J. (2013). “Friction and leakage characteristics of confined, reduced-scale inflatable structures”, *Proceedings of the VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Structural Membranes 2013*, Munich, Germany.
- Sosa, E.M., Barbero, E.J. y Thompson, G.J. (2014-a). “Testing of full-scale inflatable plug for flood mitigation in tunnels”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2014*, Vol. 2407, pp. 59-67.
- Sosa, E.M., Thompson, G.J. y Barbero, E.J. (2014-b). “Friction characteristics of confined inflatable structures”, *Journal of Friction*, Vol. 2, No. 4, pp. 365–390.
- Stocking, A.W. (2013). “An inflatable tunnel seal stops flooding of world's largest undeveloped uranium mine”. Recuperado de: http://www.petersenproducts.com/case_study/Large_Mine_Flooding_Remediation.aspx

The Blue Ribbon Panel on Bridge and Tunnel Security (2003). “FHWA Recommendations for Bridge and Tunnel Security”, Report FHWA-IF-03-036, U.S. Department of Transportation.

The City of New York (2013). “A stronger, more resilient New York”. Recuperado de:
<http://www.nyc.gov/html/sirr/html/report/report.shtml>.