



Ensayos de tapas troncocónicas de PRFV

Tests on GFRP truncated cone covers

Leonel O. Pico, Guillermo A. Santillán, Lucas P. Chiesa, Luis M. Arrien

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electromecánica, Área Mecánica,
Av. Del Valle 5737, Olavarría, Argentina

(Recibido 4 de marzo de 2025, para publicación 29 de marzo de 2025)

Resumen – En este trabajo se muestran los ensayos realizados a tapas troncocónicas de plástico reforzado con fibras de vidrio (PRFV) que son empleadas como dispositivos de cubrimiento y de cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos. Se realizaron ensayos físicos y numéricos sobre tapas planas para caracterizar el material. Luego, con el material caracterizado, se realizaron ensayos físicos y numéricos sobre tapas troncocónicas de PRFV, simulando las condiciones de funcionamiento reales. Los resultados obtenidos permiten inferir que las tapas troncocónicas certifican las clases A15, B125 y C250 que establece la norma UNE-EN 124-1:2015.

Palabras clave – Ensayos, tapas troncocónicas, PRFV.

Abstract – This paper presents the tests carried out on truncated cone covers made of glass fibre reinforced plastic (GFRP) that are used as covering and closing devices for circulation areas used by pedestrians and vehicles. Physical and numerical tests were carried out on flat covers to characterise the material. Then, with the characterised material, physical and numerical tests were carried out on GFRP truncated cone covers, simulating real operating conditions. The results obtained allow us to infer that the truncated cone covers certify the A15, B125 and C250 classes established by the UNE-EN 124-1:2015 standard.

Keywords – Tests, Truncated Cone Covers, GFRP.

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina no existe una normativa que regule los ensayos de dispositivos de cubrimiento y de cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos. Por tal motivo, se recurre a la norma española UNE-EN 124-1:2015 [1] para la realización de los ensayos físicos sobre este tipo de dispositivo (tapa troncocónica).

Entre los materiales utilizados para este tipo de dispositivos se pueden citar la fundición de hierro y aceros. Sin embargo, por requisitos de ergonomía y de economía, cada vez más son reemplazados por materiales alternativos compuestos y livianos como el plástico reforzado con fibras de vidrio (PRFV).

Para conocer el comportamiento mecánico de estos dispositivos o tapas es posible realizar simulaciones numéricas con elementos finitos, a modo de reemplazo de ensayos físicos. Sin embargo, el problema habitual que se presenta es que no se cuenta a priori con valores precisos de resistencia mecánica ni con datos de rigidez de materiales tan heterogéneos como los PRFV, los cuales dependen fuertemente del proceso de fabricación y de la proporción de fibras en la matriz.

El desafío consiste, pues, en conocer previamente las propiedades mecánicas del material a ensayar.

En el marco teórico de referencia se cuenta con la teoría de placas planas para materiales isótropos [2-3], que permite hallar sus esfuerzos y deformaciones si se saben las propiedades mecánicas del material constitutivo. Sin embargo, la teoría de placas planas requiere parámetros mecánicos que solo se pueden obtener a partir de ensayos mecánicos. De este modo, se pueden realizar ensayos físicos de flexión sobre tapas planas de PRFV para encontrar las propiedades del material constitutivo. Luego, realizando ensayos numéricos de calibración hasta lograr los mismos desplazamientos, se pueden obtener las propiedades del material comparando la respuesta física con la obtenida de las simulaciones numéricas.

Una vez determinadas las propiedades del material, es posible realizar posteriormente ensayos numéricos sobre geometrías no convencionales, como ser el caso de tapas troncocónicas de material PRFV, para conocer los estados de tensiones y deformaciones.

En este trabajo se muestran los ensayos físicos y numéricos realizados sobre tapas planas y tapas troncocónicas de PRFV utilizadas como dispositivos de cubrimiento y de cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos según lo estipulado por la norma UNE-EN 124-1:2015. Los resultados obtenidos permiten inferir que las tapas troncocónicas de este estudio se pueden certificar con calidad clase C250 de dicha norma, que exige que el dispositivo de cubrimiento deba resistir una carga mínima de 250 kN. Adicionalmente, la metodología abordada permite establecer los parámetros mecánicos del material PRFV que son requeridos para otras geometrías a analizar.

El propósito del artículo es mostrar los ensayos realizados sobre las tapas, la certificación de grado de calidad según la normativa de referencia y las ventajas del uso de PRFV en la industria como alternativa viable por su bajo peso y relativo bajo costo de fabricación.

2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PLACAS CIRCULARES

En el estudio de la placa circular sometida a flexión se utilizan coordenadas polares r y θ . Los desplazamientos w de la placa son funciones de las coordenadas, de la rigidez flexional de la placa D y de la carga aplicada q por unidad de área. La ecuación diferencial de la elástica de cuarto orden de placas circulares en función de la carga y de la rigidez elástica está dada por la ecuación (1) [2-3].

$$\nabla^4 w_{(r,\theta)} = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w_{(r,\theta)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_{(r,\theta)}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w_{(r,\theta)}}{\partial \theta^2} \right) = \frac{q(r,\theta)}{D} \quad (1)$$

Por simetría axial [5], el problema se vuelve independiente de la coordenada θ . En consecuencia, los desplazamientos w perpendiculares al plano medio de la placa solo dependerán de la posición radial. Integrando y considerando las condiciones de borde de una placa circular simplemente apoyada en todo su contorno, se tiene la solución de la función de desplazamientos, ecuación (2), para una carga concentrada W en una región de radio r_0 en torno del centro de la placa, ecuación (3), con la rigidez D dada por la ecuación (4).

$$w_{(r,\theta)} = -\frac{W}{16\pi D} \left[\frac{3+\nu}{1+\nu} (a^2 - r^2) - 2r^2 \ln \frac{a}{r} \right] \quad (2)$$

$$W = q\pi r_0^2 \quad (3)$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

donde h es el espesor de la placa, E es el módulo elástico de Young, ν es el módulo de Poisson y a es el radio máximo de la placa. La Fig. 1 muestra un esquema de la sección de una placa plana circular simplemente apoyada, con las reacciones de apoyo V . Se muestra también la configuración de la elástica de deformación w .

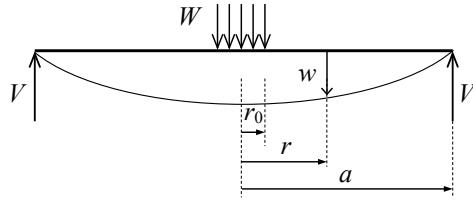


Fig. 1. Esquema de la sección de una placa plana circular de radio a simplemente apoyada.

Las expresiones de los momentos flectores [5] en las direcciones radial y transversal (por unidad de longitud) están dadas por las ecuaciones (5) y (6), respectivamente.

$$M_r = \frac{W}{16\pi} \left[4(1+\nu) \ln \frac{a}{r} + (1-\nu) \left(\frac{a^2 - r^2}{a^2} \right) \frac{r'^2}{r^2} \right] \quad (5)$$

$$M_t = \frac{W}{16\pi} \left[4(1+\nu) \ln \frac{a}{r} + (1-\nu) \left(4 - \frac{r'^2}{r^2} \right) \right] \quad (6)$$

con

$$r'_0 = \begin{cases} \sqrt{1,6 r_0^2 + t^2} - 0,675 t & \text{si } r_0 < 0,5 t \\ r_0 & \text{si } r_0 \geq 0,5 t \end{cases} \quad (7)$$

Por consiguiente, las tensiones radial y transversal (por unidad de longitud) de la placa están dadas por las ecuaciones (8) y (9).

$$\sigma_r = \frac{6M_r}{h^2} \quad (8)$$

$$\sigma_t = \frac{6M_t}{h^2} \quad (9)$$

3. DESCRIPCIÓN DE TAPAS Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS

3.1. Tipología de la tapa troncocónica de PRFV

El dispositivo de cubrimiento a certificar consiste en una tapa troncocónica de una sola pieza y un marco exterior donde se aloja dicha tapa. El material de construcción es PRFV laminado, modelo MPR600. La Fig. 2 muestra una imagen de esta tapa y la Fig. 3 ilustra la geometría de la tapa con detalle del encuentro de la tapa con el marco exterior de apoyo, donde las dimensiones se encuentran expresadas en mm. La configuración de la tapa y el material son diseñados por la empresa fabricante con materias primas comerciales. El material está constituido por una matriz polimérica termoestable, que tiene incorporada una fase de refuerzo de fibra de vidrio superior al 60%.

El diámetro de la tapa es de 650 mm contando con un espesor de 24 mm en su parte superior y un volumen troncocónico macizo de PRFV con un espesor final en el centro de la tapa de 110 mm. El diámetro del cono truncado en su parte inferior es de 111 mm. El apoyo anular de la tapa sobre su marco estructural de soporte es de 25 mm (aleta de la tapa). El diámetro de pisada (apoyo simple sobre el marco exterior) es 600 mm, lo que está identificado como modelo MPR600.



Fig. 2. Tapa troncocónica de PRFV a certificar.

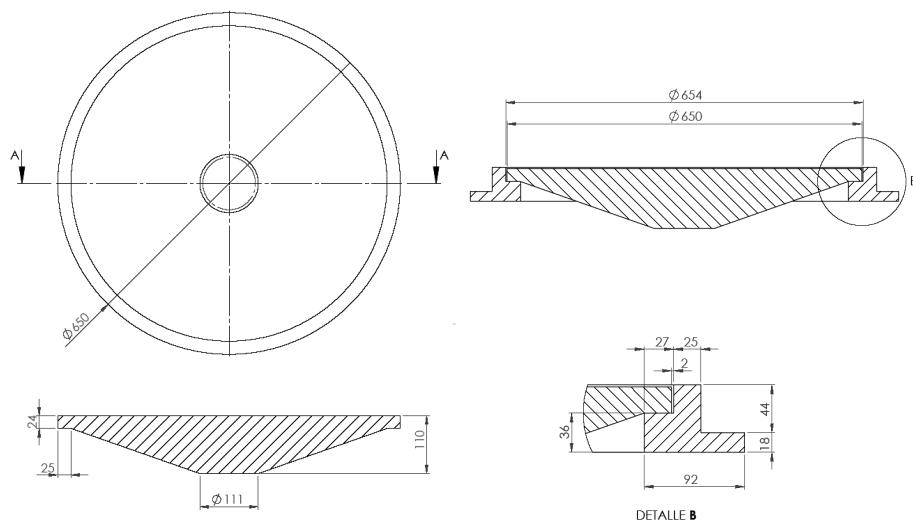


Fig. 3. Geometría de la tapa troncocónica. Vistas, secciones transversales y detalle de la tapa y del marco exterior.

3.2. Metodología de ensayos

3.2.1. Ensayos físicos

Para la realización de los ensayos físicos se utilizó una prensa hidráulica marca TIB de capacidad 60 t (600 kN) - serie Nº 76. La máquina de ensayo ha sido calibrada por INGENSA (entidad de certificación acreditada, con certificado M-140-01-22, de junio de 2024). La probeta de ensayos es la propia tapa, en escala 1:1 y los ensayos sobre las tapas se realizaron según la norma UNE-EN 124-1:2015. La magnitud de la fuerza aplicada se determina a partir de la presión observada en el manómetro instalado en la prensa (marca GV, rango: 0-140 bar). Los desplazamientos debidos a la deformación de cada tapa se miden con calibre pie de rey (rango 0-150 mm) a partir de una regla graduada indeformable. Se ensayaron 3 probetas del tipo tapa plana y 3 probetas del tipo tapa troncocónica, a fin de obtener resultados promedios. El ensayo de las probetas de tipo tapa plana tiene la función de caracterización del comportamiento mecánico del material constitutivo. Para simular las condiciones reales de funcionamiento, todos los ensayos se realizaron sobre cada conjunto de tapa y marco inferior de apoyo.

3.2.2. Ensayos numéricos-computacionales

Se asume la hipótesis de que las placas tienen un comportamiento aproximadamente isotrópico, dado que la disposición de las fibras en la matriz de PRFV durante su fabricación es aleatoria en el plano de la placa. Por otro lado, las tapas sometidas a la flexión se comportan como estructuras laminadas, de manera similar al comportamiento de elementos fibrados, como ser las vigas flexionadas. Por tal motivo, es pre-

ponderante el módulo elástico mayor E_{11} y se puede asumir que es el equivalente de un material isotrópico E . De igual forma, es preponderante el módulo de Poisson mayor, por lo que $\nu_{11} = \nu$ [4].

Para los ensayos numérico-computacionales [6] se consideraron modelos numéricos que simulan el comportamiento de tapa plana de espesor constante para caracterización de material y modelos numéricos que simulan el comportamiento de la tapa troncocónica (modelo MPR600). En ambos casos, se obtuvieron resultados numéricos de tensiones máximas principales en MPa y desplazamientos máximos en mm. Los resultados numéricos de los desplazamientos fueron contrastados con los resultados de desplazamientos de los ensayos físicos.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Resultados de ensayos físicos sobre tapa plana

Estos ensayos se realizaron sobre tapas planas de 650 mm de diámetro y 29 mm de espesor constante con el fin de caracterizar y determinar los parámetros mecánicos de comportamiento material del PRFV laminado. Se consideraron escalones de carga de 2 t (20 kN). Simultáneamente, se midieron los desplazamientos en el centro de la placa para cada escalón de carga. A fin de determinar el comportamiento material, se realizaron cargas y descargas para cada escalón. La Fig. 4 a) muestra la materialización del ensayo de placa plana de espesor constante. Esta metodología permitió establecer que el material de la placa es elástico lineal hasta la falla por compresión de la parte superior de la placa (límite elástico del material), Fig. 4 b). Para determinar los parámetros elásticos del material, por iteración, se probaron diferentes módulos elásticos E y ν hasta lograr que la diferencia entre los valores de desplazamientos físicos reales de las tapas planas y los valores de desplazamientos teóricos fuese inferior al 10 %. La Fig. 5 muestra la comparación de resultados experimentales promedios con la predicción obtenida utilizando la teoría de placas planas.



a)



b)

Fig. 4. Ensayo de placa plana; a) montaje en marco experimental; b) falla por compresión en la parte superior de la placa.

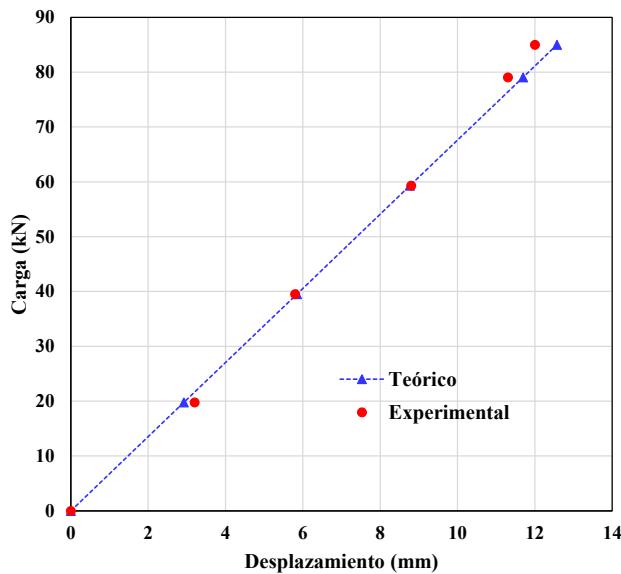


Fig. 5. Ensayo de placa plana en marco experimental para caracterización del material. Comparación de resultados promedios experimentales con resultados teóricos.

Los resultados obtenidos de la calibración de los modelos numéricos indican que el módulo elástico de Young del material PRFV analizado tiene un valor de 19,4 GPa. Similarmente, el módulo de Poisson es prácticamente nulo, dado que del ensayo físico de la tapa plana se desprende que no se observan deformaciones transversales antes de la rotura. A partir de estos datos, la rigidez a la flexión calculada con la ecuación (4) resulta ser $D = 39415$ Nm.

4.2. Resultados de ensayos numéricos sobre tapa plana

La Fig. 6 muestra los resultados numéricos de tensiones máximas y de desplazamientos máximos obtenidos de la tapa para caracterización del material PRFV laminado. Estos resultados se obtuvieron considerando modelos de elementos finitos contemplando la teoría de placas planas.

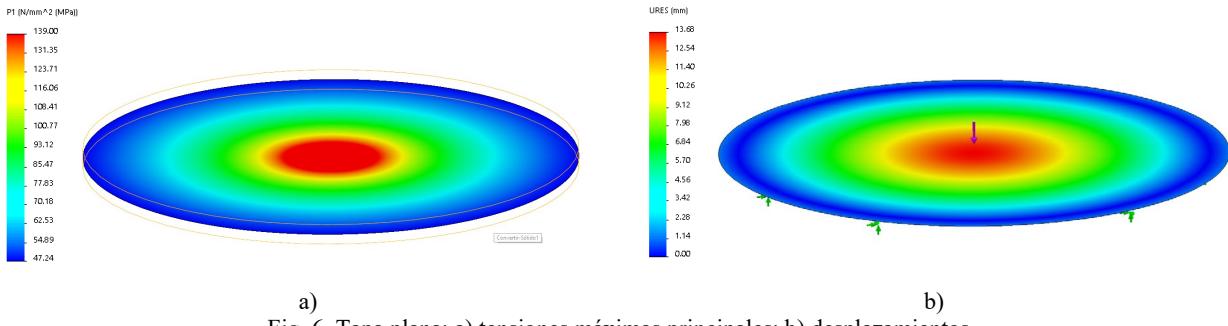


Fig. 6. Tapa plana; a) tensiones máximas principales; b) desplazamientos.

4.3. Resultados de ensayos físicos sobre tapa troncocónica (modelo MPR600)

Estos ensayos se realizaron sobre tapas troncocónicas, modelos MPR600, apoyadas sobre el marco anular de sostén. Se cargó considerando escalones de carga de 2 t (20 kN). Simultáneamente, se midieron los desplazamientos en el centro de la tapa para cada escalón de carga, Fig. 7 a). A fin de determinar el comportamiento material, se realizaron cargas y descargas para cada escalón. Esta metodología permitió establecer que el material de la tapa es elástico lineal hasta la falla por desprendimiento de la capa de laminado inferior, Fig. 7 b). La inspección visual realizada luego del ensayo muestra que la recuperación de las deformaciones es total, sin apreciarse deformaciones plásticas permanentes en su parte superior. En cuanto al marco de apoyo de la tapa, no experimentó daños visibles, conservando su integridad estructural. La

Fig. 8 muestra los resultados promedios de cargas y de desplazamientos obtenidos para cada escalón de carga. De los resultados obtenidos, se infiere que la carga máxima promedio soportada por el modelo MPR600 (carga de rotura) es 26,2 t (257 kN), con un desplazamiento máximo promedio de 4,8 mm.



Fig. 7. Ensayo de tapa troncocónica; a) montaje en marco experimental; b) falla por desprendimiento del laminado inferior.

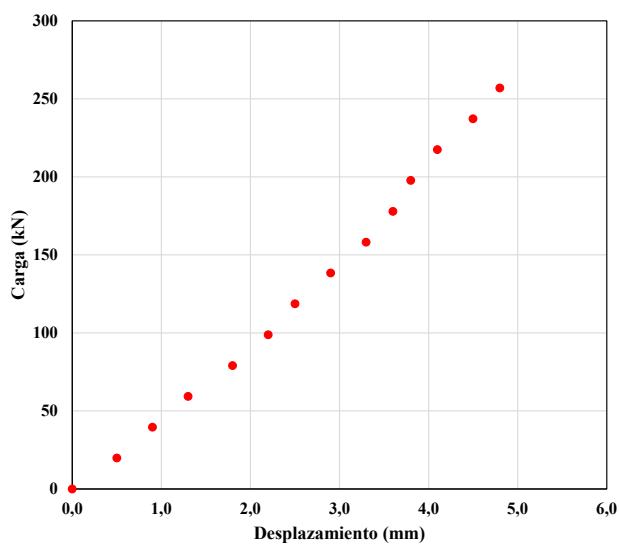


Fig. 8. Resultados experimentales promedios de cargas en función de los desplazamientos del modelo MPR600.

4.4. Resultados de ensayos numéricos sobre tapa troncocónica (modelo MPR600)

La Fig. 9 muestra los resultados numéricos de tensiones máximas y de desplazamientos máximos obtenidos para el modelo MPR600, con los datos de los parámetros mecánicos obtenidos de la caracterización del material PRFV laminado. Estos resultados se obtuvieron simulando la aplicación de la carga de falla promedio de 257 kN observada en los ensayos experimentales.

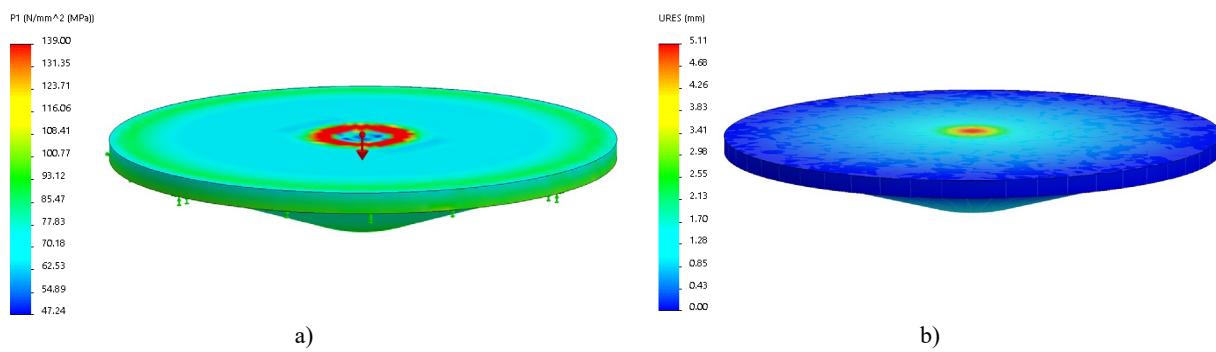


Fig. 9. Tapa troncocónica; a) tensiones máximas principales; b) desplazamientos.

Para validar las simulaciones numéricas, se contrastaron los resultados de desplazamientos numéricos máximos con los valores experimentales. La Tabla 1 muestra ambos resultados y el valor de la tensión principal máxima obtenida numéricamente.

Tabla 1. Desplazamientos y tensión máxima principal de tapa troncocónica.

Carga de falla (kN)	Desplazamiento máximo (mm)		Tensión máxima principal (MPa)
	Experimental	Numérico	
257	4,8	5,1	139

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Considerando los modelos numéricos realizados y aplicando las ecuaciones (6) a (9) se pudo determinar que la resistencia de falla o rotura de la tapa troncocónica es 139 MPa, correspondiendo este valor a la carga de falla de 257 kN.

Esta carga permite inferir que la tapa troncocónica de PRFV analizada se puede certificar que cumple con la clase C250, cuya carga mínima requerida es 250 kN, según la norma UNE-EN 124-1:2015.

Las simulaciones numéricas de la tapa troncocónica se validaron con los ensayos experimentales. Los desplazamientos máximos obtenidos no difieren en más del 7 %.

Por otra parte, se desprende que el modelo MPR600 cumple además con clases A15 y B125 que establece dicha norma, pues sobrepasa los valores de mínimos de 15 kN y 125 kN, respectivamente, para esas clases.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que la tapa troncocónica provista por el comitente, modelo MPR600 en condición simplemente apoyada, es capaz de soportar una carga de 257 kN (26,2 t). En consecuencia, cumple con la norma UNE-EN 124-1:2015 para clase C250, que exige que el dispositivo de cubrimiento deba resistir una carga mínima de 250 kN. La forma de rotura obtenida para esa carga se debe al desprendimiento de la capa de laminado inferior, observándose que la falla no es catastrófica, lo cual representa una ventaja respecto a la utilización de otros materiales usuales (fundición de hierro y de hierro dúctil).

Las tapas troncocónicas del modelo MPR600 también certifican clases A15 y B125, según la norma UNE-EN 124-1:2015.

Durante la realización de los ensayos físicos de las tapas troncocónicas, se pudo observar que luego de la aplicación de las cargas y antes de la falla, el comportamiento material obedece a régimen elástico li-

neal, lo cual implica que existe recuperación total de las deformaciones, sin apreciarse deformaciones plásticas permanentes en su parte superior.

De la inspección visual realizada luego de los ensayos, se puede afirmar que el marco de apoyo de la tapa no experimenta daños visibles, conservando su integridad estructural.

Los resultados obtenidos de los ensayos numérico-computacionales indican que la resistencia o tensión límite elástica de la tapa troncocónica es 139 MPa.

Se destaca la importancia de la utilización de métodos numéricos para caracterizar materiales y simular luego para otras geometrías de tapas.

Se resaltan también las ventajas del uso de este tipo de material debido a su bajo costo de fabricación y a su bajo peso, frente a otros materiales usuales como la fundición de hierro o aceros.

7. REFERENCIAS

- [1] UNE-EN 124-1:2015. Norma española. “Dispositivos de cubrimiento y cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos. Parte 1: definiciones, clasificación, principios generales de diseño, requisitos de comportamiento y métodos de ensayo” (2015)
- [2] Filonenko-Borodich, M., *Teoría de la elasticidad*. Segunda edición. Editorial Cartago. Buenos Aires (1966)
- [3] Ugural, A.C., *Plates and shells. Theory and analysis*. Fourth edition (2018)
- [4] Mittelstedt, C., “Theory of Plates and Shells”. Fachbereich Maschinenbau, Technical University of Darmstadt Darmstadt, Springer-Verlag, Germany (2023)
- [5] Young, W.C., Budynas, R.G., Sadegh, A.M., *Roark's Formulas for Stress and Strain*. Eighth Edition, Mc Graw-Hill (2012)
- [6] Algor Software, Finite Element Analysis (2009)