

DISEÑO DEL SISTEMA DE FRENADO DEL VEHÍCULO (POD), HYPERLOOP UPV

Anderson Sabogal(1), Federico Lluesma (2)

1. Hyperloop UPV, Colombia; 2. Hyperloop UPV, España;

Núcleo Temático: Diseño de Máquinas, Educación en Ingeniería

Resumen

En este paper se muestra el diseño de un sistema de frenado para un vehículo (POD) que logre cumplir con los requerimientos exigidos por la competencia realizada por la compañía norteamericana SpaceX.

Introducción

Cada año desde 2015 se dan cita universidades de todo el mundo para participar en la *Hyperloop Pod Competition* realizada en los Ángeles por la compañía SpaceX, con el fin de desarrollar la tecnología que se utilizará en lo que se conoce como el nuevo transporte del futuro “Hyperloop” [SpaceX, 2013].

La prueba consiste en desarrollar un vehículo (Pod) que se moverá dentro de un tubo al vacío de longitud 1.25 km y dispondrá en su interior de un perfil en I en aluminio. El objetivo es alcanzar la mayor velocidad posible frenando con seguridad.

En este trabajo se describe el proceso empleado para el diseño del sistema de frenado del prototipo de Hyperloop del grupo de estudiantes de la Universidad Politécnica de Valencia, cumpliendo con los requerimientos exigidos por la competición.

Se explica la metodología empleada para la obtención del modelo final, se detallarán las simplificaciones y modelos matemáticos empleados, el proceso de fabricación y ensamble, y por último se mencionan los ensayos realizados para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Metodología

Primero se presenta las restricciones de la competición. Luego se centra en la obtención de un modelo matemático que relacione la geometría y la cinética del sistema que permita minimizar la geometría y la fuerza de frenada utilizando un diseño de freno auto-energizante propuesto en [Shigley, 2015].

Se valida el modelo geométrico obtenido mediante el análisis de elementos finitos en el software ANSYS 18.2. Adicionalmente se presenta el proceso de

selección de la pastilla de freno y del sistema de actuación, el proceso de fabricación y ensamble, y por último se mencionan los ensayos realizados para garantizar el funcionamiento seguro del sistema.

Restricciones de la competición

SpaceX no proporciona ningún sistema de frenado, aparte de un "fondo con espuma" de emergencia situado al final del tubo. Por tanto, el Pod es responsable del sistema de frenado. Sujeto a las restricciones de a continuación, se permiten las técnicas de frenado de fricción, pudiéndose realizar con reacción contra las diferentes superficies que componen la sección transversal del tubo, entre ellas el propio tubo de acero o el raíl de aluminio.

Todas las operaciones de frenado deberán estar diseñadas para minimizar el daño a la superficie de la pista. Por tanto, el material en contacto con la pista deberá diseñarse para que se desgaste, en contraposición con el stick / slip, siendo la pastilla de freno de dureza inferior a la vía.

Por su parte, todas las configuraciones de frenado sobre el raíl deben ser auto-reactivas y simétricas, como se puede ver en la Figura 1. En otras palabras, la operación de frenado debe sujetar el riel con pastillas de freno opuestas.



Figura 1: Tipos de frenado aceptables.

Parámetros de diseño

Existe una serie de restricciones tecnológicas y de espacio que limitan la velocidad máxima a la cual puede llegar el Pod. Por lo tanto los valores estimados

para los cuales se inician los cálculos, se recogen en la Tabla 1.

Masa del Pod	250 kg
Deceleración del Pod	2 G's
Velocidad máxima	409 km/h
Tiempo de Frenada	5,71 s
Distancia de frenada	320 m

Tabla 1: Parámetros de diseño para el frenado del Pod.

Las simulaciones realizadas por el equipo de dinámica presentan el perfil de velocidades del Pod durante todo un recorrido, recogidas en la Figura 2.

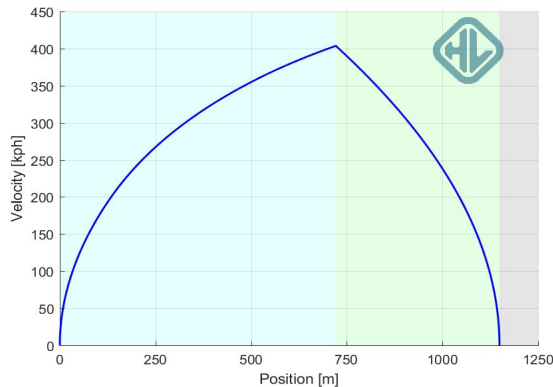


Figura 2: Perfil de velocidades esperado.

Diseño de la pinza de freno

En el diseño de un sistema de frenado generalmente se aborda el problema desde dos puntos de vista, uno se da al considerar el perfil de presiones uniforme a lo largo de la pastilla, como reacción de la fuerza (F) aplicada y el otro, al realizar un análisis de desgaste uniforme de la pastilla. Para el presente caso se utilizarán los pasos de diseño recomendados por (Shigley, 2010) que incluyen estas suposiciones. Dicho procedimiento comprende las siguientes tareas:

- Se calcula, se modela o se mide la distribución de la presión en las superficies de fricción.
- Se emplean las condiciones del equilibrio estático para obtener la fuerza de frenado o el par de torsión y las reacciones de los apoyos.

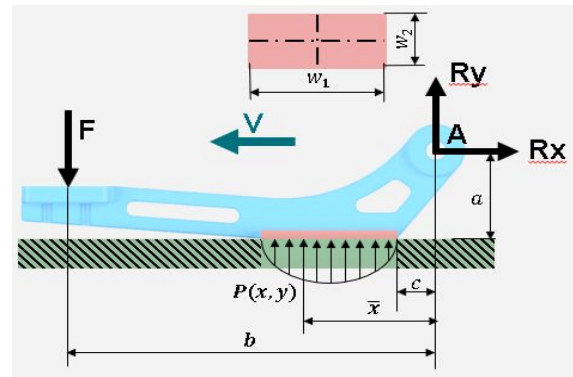


Figura 3: Diagrama de fuerzas de la pinza de freno.

Modelo del perfil de presiones

Sobre un elemento diferencial de área: $dA = dx dy$, se aplica una presión $p(x, y)$ que dará como resultado una fuerza normal diferencial de $dN = p(x) dA$.

$$N = w_2 \int_0^{w_1} p(x) dx \quad (1)$$

Suponiendo que la presión es directamente proporcional a la deformación, entonces $p(x) = C_2 x$, C_2 siendo constante. En términos de u , la presión es:

$$p(u) = C_2 (c + u) \quad (2)$$

Haciendo sumatoria de momentos, se desarrollan las ecuaciones para obtener la constante C_2 en función de la fuerza de aplicación:

$$Fb - w_2 \int_0^{w_1} C_2 (c + u) du + a \mu w_2 \int_0^{w_1} p(u) du = 0 \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{Fb}{w_2 \left[\frac{w_1^3}{3} + (c - \frac{a\mu}{2})w_1^2 + (c^2 - a\mu c)w_1 \right]} \left[\frac{N}{m^3} \right] \quad (4)$$

Después de estimar una fuerza y de obtener C_2 , se calcula la P_{prom} :

$$P_{prom} = C_2 \left(c + \frac{w_1}{2} \right) \quad (5)$$

Luego se puede determinar la presión máxima y con ello se determina si la presión admisible de la pastilla es suficiente para soportar

$$P_{máx} = P(w_1) = C_2(c + w_1) \quad (6)$$

Mediante un proceso iterativo de mapeo de todas la variables en Matlab se obtiene las dimensiones de la Figura 4, alcanzando el criterio de elección de freno autoenergizante propuesto en [Shigley, 2015].

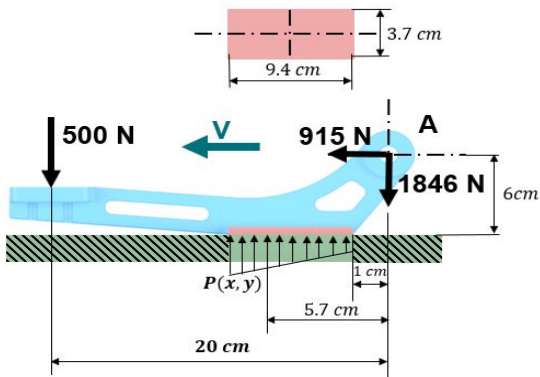


Figura 4: Dimensiones sobre las pastillas.

Luego de haber determinado las fuerzas de reacción sobre la pinza de freno (Figura 4), se realizó un análisis por elementos finitos en el software ANSYS 18.2, tal y como puede verse en la Figura 5. Dado que el material con el que se construyó el freno fue el aluminio 6061-T6, su límite elástico está por debajo del predicho con un factor de seguridad de 2,5

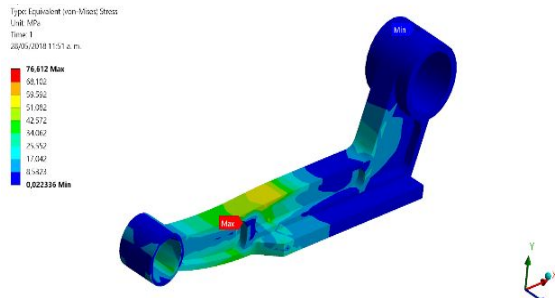


Figura 5: Simulación de la pinza en ANSYS.

Selección de componentes

Se ha seleccionado las pastillas Ferodo FDB2039, cuyo coeficiente de fricción es de 0,39 y su presión admisible es de 200 psi.

Por otra parte, de entre todos los sistemas de actuación de la frenada se decidió emplear uno neumático, debido a su rapidez, fiabilidad, facilidad para conseguir altas cargas y ligereza de su montaje.

Fabricación y ensamble

Luego de finalizar el diseño, se fabrican las pinzas y se ensamblan con las pastillas mediante adhesivo aeroespacial 3M. Una foto del freno montado en el Pod es mostrada en la Figura 6.

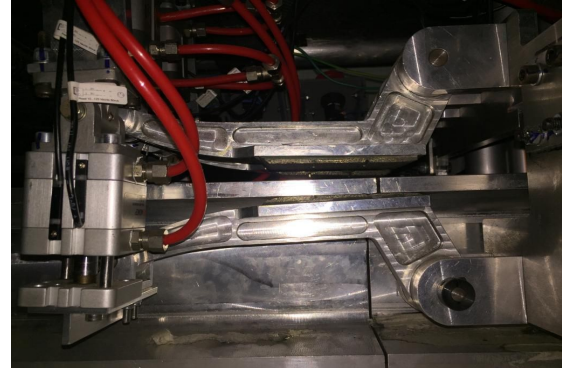


Figura 6. Ensamble de pinzas en el Pod..

Ensayos de funcionamiento del sistema

El próximo paso es el ensayo principal del sistema de frenado (Figura 7), aproximando las condiciones a las que se va a encontrar durante un trayecto Fue diseñado, fabricado y puesto a punto con un límite de 110 km/h.

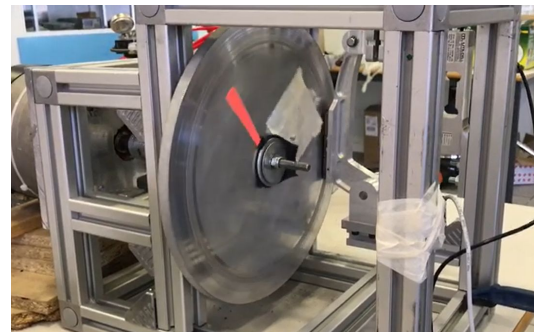


Figura 7. Montaje bancada del sistema de frenado.

Otros ensayos realizados para garantizar la seguridad durante la frenada son: dureza, composición química, coeficiente de fricción, constantes térmicas de la pastilla de freno y el comportamiento a termofluencia de las uniones adhesivas. Este último se prueba a una temperatura de 150 °C sobre dos probetas (Figura 8).

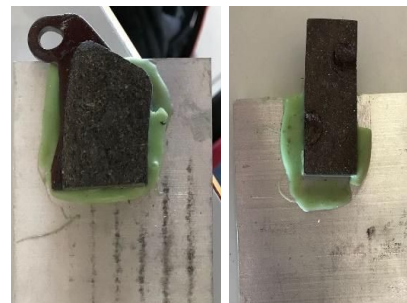


Figura 8. Placa 1: Diferente superficie de carga aplicada. Placa 2: Superficie de carga aplicada igual.

Resultados

Dureza

El valor de dureza promedio obtenido fue de $HV = 88 \pm 9$, correspondiente a un material blando con un alto contenido de grafito, y lo más importante, de menor dureza que el material donde ejerce la fricción.

Composición química

En la Figura 9 se observa que la pastilla contiene 3 tipos diferentes de partículas metálicas en una matriz de compuesto de grafito. Las partículas rojizas pueden corresponder a partículas de cobre, de color amarillento a latón, mientras que las de color metálico pueden ser de aluminio.



Figura 9. Imagen del microscopio óptico 50x.

Conductividad Térmica

Se tomaron 5 mediciones a una temperatura de 20°C . El valor promedio de conductividad térmica obtenido fue de $3.884 \pm 0.009 \text{ W / m} \cdot \text{k}$. Mientras tanto, el valor promedio de difusividad térmica obtenido fue de $9.138 \pm 0.008 \text{ mm}^2 / \text{s}$.

Ensayo de termofluencia

La placa 1 ha sufrido una fuerza axial excéntrica, lo que provoca un fallo precipitado. Por otro lado, la Placa 2 presenta una mayor resistencia, al aplicar la carga con poca excentricidad.

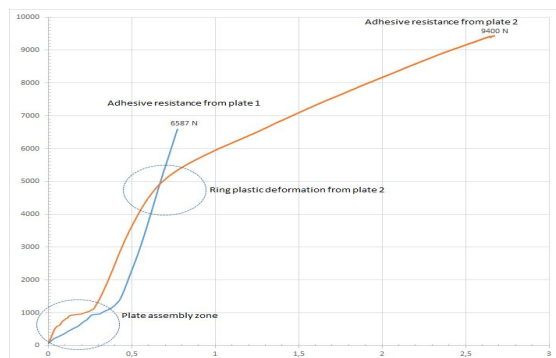


Figura 10. Adhesivo a termofluencia.

Por lo tanto, al comparar la fuerza cortante de 915 N con el límite de rotura encontrado (6587 N), se garantiza la integridad durante la frenada.

Ensayos de comportamiento del sistema

El pistón neumático ejerce una fuerza de 563 N para realizar la frenada del sistema (Figura 11), lo cual corresponde a un factor de seguridad de 1.13 respecto a la fuerza calculada para la frenada.

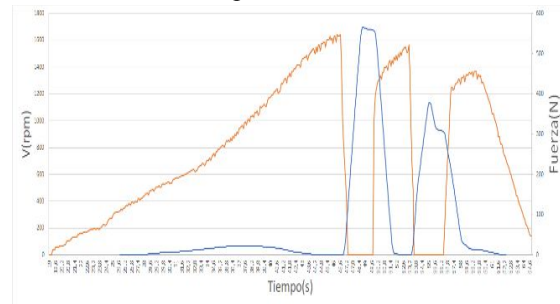


Figura 11. Resultados de fuerza en el actuador durante pruebas continuadas.

En condiciones ideales del disco (rail plano) a una velocidad de 90.5 km/h el sistema de frenos tardó 0,9 segundos en detener el disco de prueba.

Discusión

Se logró diseñar, analizar, fabricar y ensayar el sistema de frenado que fue finalmente empleado en la competición en 2018. Además, el jurado de SpaceX aprobó la revisión mecánica del sistema. En futuros trabajos se recomienda medir el perfil de presión y temperaturas de las pastilla.

Se da las gracias al proyecto Hyperloop UPV de Generación Espontánea de la Universidad Politécnica de Valencia.

Referencias

- Bhushan, Bharat. Modern tribology handbook, two volume set. CRC press, 2000.
- Budynas, Richard Gordon, and J. Keith. Federation of European Manufacturers of Friction Materials: <http://www.femfm.com/index.php?id=583>
- Ferodo catálogo, en línea: <http://www.ferodoracing.com/catalogue/>
- Nisbett. Shigley's mechanical engineering design. Vol. 9. New York: McGraw-Hill, 2008.
- Shigley *et al*, Mechanical design, 10:827, 2015.
- SpaceX *et al*, Hyperloop alpha, 2013.