

18. Modelo FEA de falla de componente de sistema de suspensión por reemplazo de bujes por cojinetes compuestos

Carlos Bello; Alfredo A. Amico; Miguel A. Mattolini;
Leandro E. Panella

Resumen: Este trabajo es parte de las revisiones y discusión de trabajos a terceros que desarrolla el grupo IEMI con sus becarios, dentro de las actividades I+D del DIDEME, con el intención de introducir a los alumnos de Electromecánica de los últimos años, en el uso de métodos numéricos. El propósito de este trabajo fue desarrollar un modelo numérico, usando “Análisis de Elementos Finitos”, para describir la falla ocurrida en un sistema de suspensión basculante, producida por una operación de mantenimiento que reemplaza los bujes originales de plástico, por otros de metal y plástico. La hipótesis sostiene que los cojinetes se destruyeron porque no se cumplieron las condiciones de trabajo que exige el diseño de la suspensión. Para describir la falla se utilizó un modelo numérico. El mismo se hizo mediante código comercial SOLID WORKS–COSMOS y se validó usando criterios de convergencia y contrastación de la información de la falla ocurrida. El resultado del análisis numérico coincidió con lo observado en la falla, describiendo con precisión la condición final de los bujes.

Palabras claves: modelo FEA, bujes de plástico, suspensión basculante, polímero.

El uso de las herramientas computacionales de análisis y simulación mediante el método de los elementos finitos ocupa un lugar destacado, en la ingeniería mecánica, cuando se realizan tareas de diseño, verificación y análisis de máquinas y sus elementos. En particular permiten: validar diseños; calcular las tensiones a las que se someterá una pieza; predecir fallas posibles de ésta y además, modelar fallas de componentes colapsados en servicio.

El propósito de este trabajo fue desarrollar un modelo numérico mediante el Análisis de Elementos Finitos (*FEA – Finite Element Analysis*), que describa la falla ocurrida en un

sistema de suspensión basculante, producida por una operación de mantenimiento que reemplaza los bujes originales de plástico, por otros de metal y plástico. Se trata de una práctica habitual para formar becarios de la unidad de investigación DIDEME, del grupo IEMI. Para ello se utilizan casos que fueron resueltos por miembros del grupo, cuando se realizaron servicios a terceros.

Este estudio en particular, está referido a una falla que se produjo en el sistema de suspensión basculante de una Telecabina. Dicha falla ocurrió porque los bujes originales de plástico fueron reemplazados por unidades compuestas de metal y de plástico.

El trabajo de modelar la falla se originó en un informe preliminar de personal del Centro atómico Bariloche, cuya argumentación era deficiente, dado que describía bien el accidente, pero sin precisar los motivos. De esta manera el explotador de la maquina intentaba eludir posibles responsabilidades sobre las causas del accidente.

El estudio del caso consideró como hipótesis de mayor peso que la falla se produjo por un problema en el montaje. El mismo se originó en la instalación de los nuevos bujes, con un huelgo inadecuado para su ajuste. Este hecho produjo sobrecargas no distribuidas en los extremos de los bujes, estropeando la lámina del polímero, hecho que permitió el contacto metal con metal. Luego las condiciones de arrastre terminaron cortando el perno seguro, lo que produjo el accidente. El modelo FEA desarrollado en este trabajo permitió demostrar esta hipótesis, porque describió eficientemente los efectos encontrados en las piezas colapsadas.

Descripción de la falla

La falla se produjo cuando se cortó el perno seguro, del sistema de suspensión, con mordazas de acople de la telecabina. El corte del perno se produjo por los esfuerzos repetitivos de corte generados por el balanceo de la cabina en servicio, debido al arrastre por rozamiento meta-metal entre eje-buje de la mordaza. En consecuencia la cabina se desprendió del dispositivo de suspensión de la mordaza y se

precipitó a tierra. Toda la información del evento se extrajo del informe pericial realizado, de la inspección de las piezas y de la información de fabricantes de bujes montados en la cabina siniestrada. Los datos necesarios para llevar a cabo el análisis del estudio mediante FEA (Finite Element Analysis) se obtuvieron de las siguientes consideraciones y cálculos.

Cálculo de solicitaciones en bujes de suspensión de telecabina

La cabina y los elementos de suspensión de la misma fueron pesados por personal del centro Atómico Bariloche (Pregliasco, 2007). Se obtuvo para la cabina un peso de 572 Kgf., además se consideró por cada pasajero un peso de 70 Kgf. (OITAF,1965) y que la cabina tiene una capacidad máxima de 4 pasajeros. Estas condiciones de trabajo para las distintas situaciones en la posibles son las de la tabla N°1.

Tabla N°1. Peso total de la cabina para cada situación

Configuración	Fs = Peso total [Kgf]
Cabina sola	292
Cabina+1 pasajero	362
Cabina+2 pasajeros	432
Cabina+3 pasajeros	502
Cabina+4 pasajeros	572

Fuente: Pregliasco & Osquiguil, 2007

La fuerza de suspensión configura con la carga de la cabina (F_s) un momento. Este momento y la carga de la cabina (F_s) determinan las solicitaciones a los bujes. Ma es el momento aplicado al sistema de suspensión por F_s que es el peso total y d_b la distancia entre centro de los bujes, F_b es la fuerza que soportan los bujes debido al momento y d = distancia entre la carga de cabina y la fuerza de suspensión, los valores fueron sacados del informe citado y verificados posteriormente para contrastarlos. En la Figura N° 1 se pueden observar las solicitaciones en la mordaza.

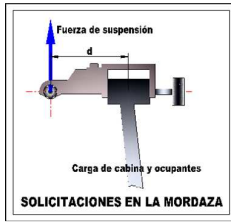


Fig. N°1. Esquema de solicitaciones en mordaza.

Fuente propia.

Se puede observar en la Tabla N° 2 los valores de los momentos y de la fuerza que soportan los bujes.

Tabla N°2. Valores de los momentos y de la fuerza que soportan los bujes

Denominación	Valor	
d_b =	85 mm	
d =	325 mm	
	Ma =Fs x d	F_b =Ma _i /d _b
Ma₀ =	94900 Kgf mm	1116,5
Ma₁ =	117650 Kgf mm	1384,1
Ma₂ =	140400 Kgf mm	1651,8
Ma₃ =	163150 Kgf mm	1919,4
Ma₄ =	185900 Kgf mm	2187,1

Fuente: (Pregliasco & Osquiguil, 2007)

Las fuerzas sobre los bujes son la composición de las fuerzas debido al momento aplicado y la mitad de la carga de la cabina. La fuerza F1 se genera con la fuerza sobre el buje más la mitad del peso de la cabina; la fuerza F2 se genera con la fuerza sobre el buje menos la mitad del peso de la cabina.

En la Figura N°2 se muestra un esquema de cargas para la configuración de bujes debido al peso total y momento resultante que surge de trasladar la carga de la mordaza al cable.

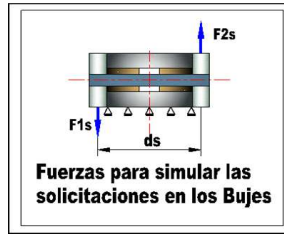
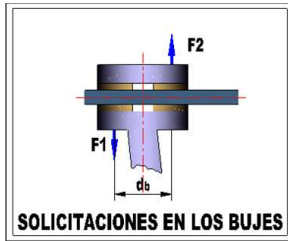


Fig. N°2. Esquema de solicitaciones en bujes y posición de solicitaciones modelo para análisis FEA.

Fuente propia.

La tabla N°3 muestra los valores de las fuerzas obtenidos.

Para que el modelo de la simulación responda a la situación real existente en la mordaza de cabina y acotar el tiempo de proceso del *solver*, es necesario representar, en forma simplificada, los apoyos del eje mediante dos soportes que simulan la pieza de montaje del mismo y un soporte cilíndrico que genera las condiciones de rigidez de montaje de los bujes (*idem*). Estos elementos en los resultados gráficos de la simulación no se muestran, pero a través de ellos se introducen las cargas calculadas y las restricciones, de modo de transferir las acciones a las piezas involucradas como sucedería en la realidad. En la Figura N°2 se muestran las fuerzas para simular las solicitaciones en los Bujes en el modelado.

Tabla N°3. Valores de las fuerzas en los bujes según ocupación cabina		Tabla N°4. Cálculo de las fuerzas para aplicar en la simulación considerando una distancia de aplicación del momento de 160 mm,			
	F_1 $F_b + F_s 44/74$	F_2 $F_b - F_s 30/74$		F_{1s} $F_b + F_s / 2$	F_{2s} $F_b - F_s / 2$
Cab. sola	1290,1	998,1	Cab. sola	739,1	447,1
Cab.+1 pas.	1599,4	1237,4	Cab.+1 pas.	916,3	554,3
Cab.+2 pas.	1908,6	1476,6	Cab.+2 pas.	1093,5	661,5
Cab.+3 pas.	2217,9	1715,9	Cab.+3 pas.	1270,7	768,7
Cab.+4 pas.	2527,2	1955,2	Cab.+4 pas.	1447,9	875,9

Fuente: Pregliasco & Osquiguil, 2007. y verificación propia

La Figura N° 4 muestra donde se encuentra el centro de masa para las situaciones en que la cabina se encuentra vacía y con pasajeros.

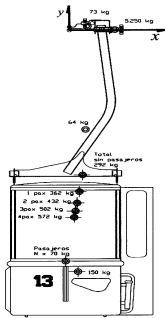


Fig. N°4. Esquema de la acción de las fuerzas en los bujes. Fuente: Pregliasco & Osquiguil, 2007, p. 6.

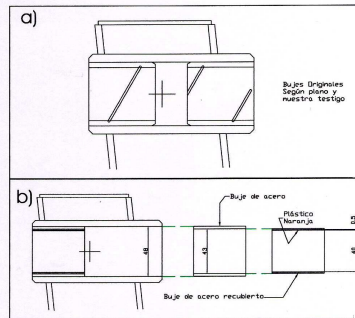


Fig. N°5. Condiciones encontradas en cabina 26 y cabina siniestrada. Fuente: Pregliasco & Osquiguil, 2007.

La descripción de la situación encontrada durante el desarme de la cabina, con una muestra de bujes originales de plástico gris que responden al diseño original y bujes compuestos, acero encamisados con polímero color naranja, ver Fig. N° 5.

En las Figuras N° 6 y N° 7 se observa un desgaste cruzado, signo que el perno ha estado trabajando bajo un momento importante y hay esfuerzos concentrados en partes de los bujes no considerados en el diseño de la articulación

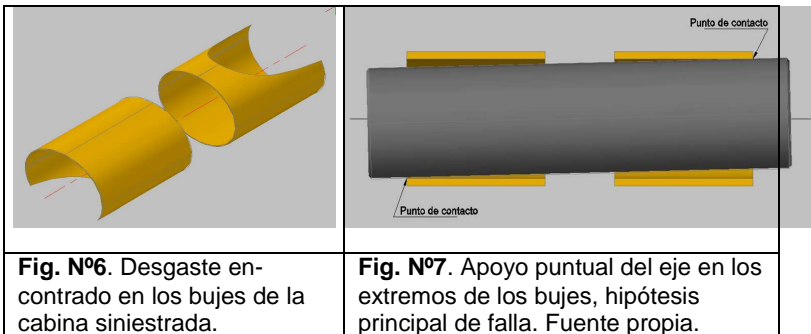


Tabla N°5. Características de materiales plásticos utilizados

Material	Resistencia Ultima kgf/cm ²		Lub.	Comp. Agentes externos	Ref.
	tracción	compresión			
Poliestireno	315 a 490	280 a 630	No se usa en bujes	Pierde resistencia levemente	Niciesza & taberna
Poliestireno alta densidad	220 a 390	190 a 255		Pierde resistencia levemente	
Delrin: Resina acetálica	705	-----	No se lubrica	Excelente	
Polipropileno	300	-----	No se lubrica	Se fisura pierde resistencia	
Grilon	800	-----	No se usa en bujes	Bueno	

Continuación Tabla N°5.

Material	Resistencia Ultima kgf/cm ²		Lub.	Comp. Agentes externos	Ref.
	tracción	compresión			
Polietileno APM	230	-----	No se lubrica	Excelente	Nylacast
Poliamida	440 a 570	110 a 140			
Teflon (ptfe)	140 a 350		No se lubrica	Excelente	Dayplas
Nylon 6 Nylon 6.6	914 a 1055		No se usa en bujes	Se torna quebradizo	

Fuentes: Nylacast; Dayplas. Niciesza y Taverna.

Modelado y condiciones de análisis FEA

Para llevar a cabo el trabajo se modeló una simplificación del sistema de suspensión de la telecabina que permitiera un

análisis de la pieza que falló. Para realizarlo se utilizó la herramienta de diseño 3D “SOLID WORKS–COSMOS”. Luego se establecieron las condiciones de esfuerzos y los requisitos necesarios para proceder con la simulación. Para ello se consideró el sistema de fuerzas para dos pasajeros, ya que era la cantidad que había durante el siniestro. Se optó por un método de iteración h y en la Tabla N° 6 se pueden observar los parámetros utilizados en la simulación. La Figura N° 8 muestra la malla resultante del método adaptativo y el despiece del sistema simplificado.

Tabla N°6. Parámetros de simulación

Material de Soportes	Acero Aleado
Material del eje y buje (metálico)	Acero estirado en frío
Material del buje (parte metálica)	Acero laminado en frío
Material del buje (parte plástica)	Poliacetal
Conexión entre bujes y eje	Contacto sup. sin penetración
Conexión entre soportes laterales y eje, bujes y soporte general	Unión Rígida
Conexión metal-polímero del buje	Unión rígida
Sujeciones	Sup. ext. del soporte principal considerada geometría fija

Fuente propia

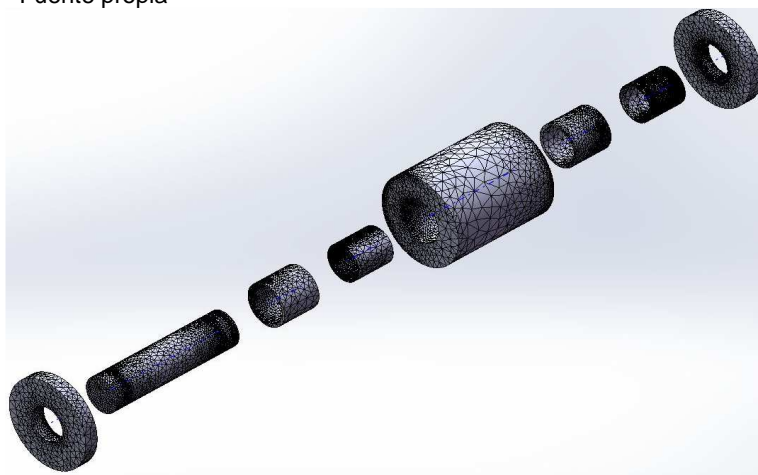


Fig. N°8. Malla utilizada y despiece del sistema simplificado

Resultados de la simulación

En este apartado se exponen los resultados obtenidos de la simulación mediante la herramienta de diseño 3D “SOLID WORKS –COSMOS”. Lo primero a observar y como era de esperarse es que las mayores tensiones se producen en la zona del extremo del buje, donde se pudo observar la falla del poliacetal, el film se deterioró y fue arrancado del soporte metálico. La figura N° 9 muestra la configuración de tensiones debida a las deformaciones de los componentes y la condición de ajuste de montaje con huelgo exagerado.

Estas tensiones y su distribución, concentrada en sectores, generan las sobretensiones sobre el film de poliacetal, el cual tiene un espesor demasiado pequeño, no admitiendo una adaptación geométrica por desgaste o deformación, esta condición produce la rotura y desprendimiento de la película del polímero del sustrato metálico.

En la Figura N° 10 se observa una imagen ampliada de las tensiones en la parte de poliacetal del buje, debe considerarse que el polímero está sometido a compresión entre dos componentes de acero. Esta situación genera la remoción del film y deja en contacto metal-metal entre soporte del film y el eje de la suspensión.

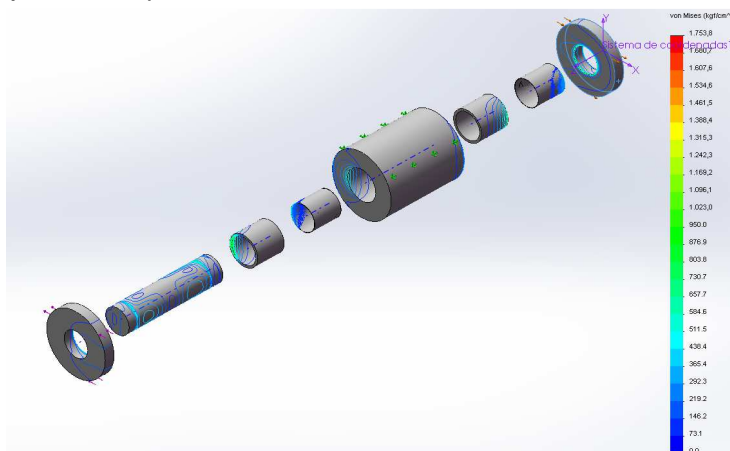


Fig. N°9. Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

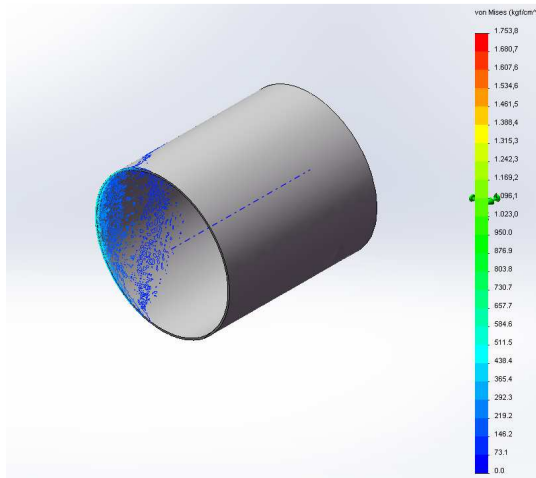


Fig. N°10. Distribución y valores de Tensiones de Von Mises en el componente de poliacetal. Fuente propia.

Luego de analizar las tensiones de von Mises (Shigley,2002), producidas sobre el ensamblaje como predice la teoría de falla de materiales dúctiles. La Figura N° 11 muestra un despiece del sistema y marcando las deformaciones unitarias de cada pieza.

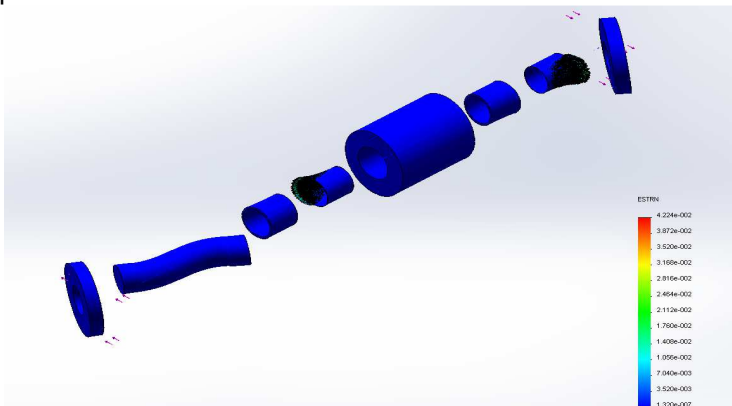


Fig. N°11. Deformaciones Unitarias. Escala 1:1000. Fuente propia.

A partir de éste análisis se puede observar que debido a la conformación del buje, es de esperarse la falla por deformación plástica en los extremos, situación encontrada físicamente en los bujes colapsados.

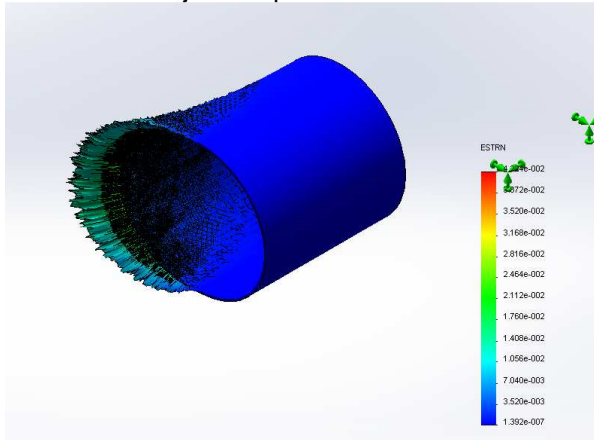


Fig. N°12. Deformaciones Unitarias en componente de poliacetal del buje. Fuente propia.

Esto confirma la hipótesis propuesta de que la falla se produjo debido a un huelgo entre el buje y el eje que quedó luego del recambio por mantenimiento, produciendo así un pico de tensiones en el extremo de los bujes y consecuentemente un aplastamiento y despegue de la película de poliacetal en dichas zonas, esto produjo el contacto metal-metal entre buje y eje que determinó la falla del sistema de suspensión con el siniestro de la cabina. En la figura N°12 se puede observar de forma ampliada la deformación unitaria mencionada que se produjo en la pieza de poliacetal del buje.

Conclusiones

La utilización de kits de recambio elegido, requiere de un estudio de deformaciones del sistema de apoyo.

Es necesario el control eficiente de las condiciones del montaje que evite el trabajo del apoyo con huelgos

exagerados, el sistema de bujes mixtos no admite procesos de adaptación por deformación ni desgaste.

El modelo que explica y predice la falla tiene una componente tecnológica importante, lo que explica que el dictamen de un instituto de investigación con agentes con formación de físicos no determinó cual fue la causa de falla del sistema de suspensión, lo que motivo el pedido del estudio aquí mostrado.

Bibliografía

Pregliasco, R., & Osquiguil, E. (2007). *Estudio físico del accidente de telecabina Amancay, Destacamento 151 Catedral s/ investigaciones/lesiones culposas*. Bariloche: Expediente judicial N° 249-8-2007.

O.I.T.A.F. (1965). *Recommandations techniques relatives a la construction de telepheriques du systeme a vat-et-vient destines au transport public de voyageurs, item 2.3.1*. Ma. En c. e. International Organisation for Transportation by Rope. Madrid: OITAF.

Dayplas. (s.f.). *DAYPLAS S.A.* Acceso 30 de julio de 2014, <http://www.dayplas.com/ListadoProductos.aspxltd>, N. (s.f.).

NYLACAST-Engineering plastic solutions. Recuperado el 30 de julio de 2014, de <http://www.nylacast.com/semi-finished-product>.

Nicieza y Taverna (s.f.). *NTH-Nicieza y Taverna Hnos. Plásticos de Ingeniería*. Recuperado el 30 de Julio de 2014, de <http://www.nth.com.ar/es/1329/semielaborados.aspx>

Sligley, J. (2002). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: Mc Graw-Hill.

* * *