



## Regiones de Transición de Contacto en Ensamblajes por Interferencia

Jorge Bedolla<sup>1</sup>, Marcos Bedolla<sup>1</sup>, Vicente Flores<sup>1</sup>, Víctor Galaviz<sup>2</sup>, Arturo Martínez<sup>3</sup>

ljbedolla@itapizaco.edu.mx; mbedollah@hotmail.com; f117u2@yahoo.com;  
galaviz\_4@hotmail.com

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Tecnológico s/n, Apizaco, Tlaxcala

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de Tlaxcala, Huamantla, Tlaxcala

<sup>3</sup>Luk Puebla, S.A de C.V., Puebla, Puebla

### RESUMEN

Se presenta un estudio de la identificación de las regiones de transición de contacto para ensamblajes a presión por interferencia, esto con el objeto de contribuir en estudios de regiones potenciales de inicio de fallas en las superficies de elementos mecánicos en contacto. En el estudio se usa una unión por interferencia típica de flecha y cubo de rueda, y mediante análisis numérico por el método de elementos finitos se realiza la simulación del ensamble. Los resultados obtenidos se usan para cuantificar la distribución de presión de contacto en la superficie del cubo de rueda que se ensambla, esa distribución es proporcional a la fuerza de fricción (y coeficiente de fricción) que se presenta en cada región del par de superficies en contacto. Se establecen cargas externas de separación de la unión para sus condiciones de trabajo normal, lo cual representa la fuerza separadora de la unión. En función de la fuerza separadora y de la fuerza de fricción propia de cada región de la superficie de contacto, se establecen los límites en los que potencialmente existe transición de la condición de contacto firme a contacto con deslizamiento. Esa ubicación de la transición se considera la posición potencial para el inicio de falla en la superficie de contacto. Se presenta la descripción de los elementos mecánicos seleccionados, los criterios para su selección, la discretización de los mismos y los resultados obtenidos de la simulación del ensamble. Por último se presentan las discusiones y conclusiones del estudio.

**PALABRAS CLAVE:** elemento finito, ensamble mecánico, falla superficial, presión de contacto, superficies de contacto, zona de transición.

### 1 INTRODUCCIÓN

Un fenómeno asociado con el problema de contacto mecánico, y que presenta oportunidad de mejora en el diseño de ensamblajes mecánicos, es el conocido como *stick-slip*. El cual corresponde a movimiento intermitente de regiones de la misma superficie donde simultáneamente se presenta contacto firme y contacto con deslizamiento. Esto se relaciona con el sucesivo y repentino cambio de estado del movimiento relativo entre las superficies, de reposo (*stick*) a deslizamiento (*slip*), a causa de las condiciones de trabajo del ensamble. Esos movimientos relativos de las superficies están en función de la fricción y de la fuerza separadora actuando en la unión, y son prácticamente imperceptibles para el ojo humano [1]. Este fenómeno se atribuye a una distribución de presión ( $P$ ) no uniforme sobre una zona de contacto entre dos superficies de elementos de ensamble, generando zonas con alta concentración de presión y otras con presiones relativamente menores que permiten el movimiento. La combinación de desplazamientos (por reducidos que estos sean) con altas concentraciones de presión en las zonas de contacto tienden a provocar desgaste y cambios drásticos en las condiciones de deslizamiento de las superficies [2].

Las regiones de transición entre deslizamiento y contacto firme, son las zonas potenciales de inicio de grietas o fallas en el material que conducen a fracturas. Para esas ubicaciones y dependiendo del nivel de afianzamiento entre las superficies de unión se generan las posiciones de



transición de movimiento donde aparecen las grietas. Bajo esas condiciones, normalmente se presentan grietas simétricas sobre la superficie respecto al centro de contacto. Dependiendo de las características de cada grieta comúnmente solo dos grietas progresan en esa ubicación, mientras que el resto de las mismas se detienen o vuelven a la superficie [3,4], produciendo lidero desprendimiento de material. Diversos trabajos se han enfocado al estudio del crecimiento y propagación de grietas entre superficies en contacto, donde de forma general se ha establecido que la primera parte de la grieta se produce en un plano que tiene una inclinación entre  $15^\circ$  y  $35^\circ$  respecto de la superficie, para posteriormente presentar un cambio de dirección y crecer de forma casi perpendicular a la superficie en cuestión (entre  $75$  y  $90^\circ$ ) [5-7].

La falla en superficies que se encuentran en contacto puede aparecer en múltiples componentes de máquinas y estructuras. En la interfaz entre dos componentes en contacto bajo presión, y que se someten a una fuerza dinámica o vibración, se producen movimientos relativos oscilatorios de pequeña amplitud. Esto genera tensiones tangenciales asociadas a las normales en la zona de contacto, movimientos relativos oscilatorios entre las superficies que inducen daños superficiales, así como altas tensiones dando lugar a la formación y posterior crecimiento de grietas cerca de los bordes de las zonas de transición de contacto.

En la industria actual son comunes los productos se ensamblan mediante métodos de sujeción mecánica: automóviles, aparatos eléctricos, teléfonos y muebles, son algunos de los múltiples ejemplos. En cualquier ensamble mecánico su función básica es unir dos o más partes para formar un conjunto completo. Además los productos que van desde aparatos electrónicos hasta equipos de construcción, siempre implican ensambles mecánicos de diversos componentes. Las uniones mecánicas y ensambles por presión son ejemplos típicos de esos ensambles, en que las superficies en contacto presentan regiones de transición de alternancia entre contacto firme y contacto con pequeños deslizamientos.

Dentro de los estudios de ensambles por presión, las uniones por interferencia tienen especial importancia, porque en sus superficies se presenta de manera frecuente la transición de contacto entre deslizamiento y fijo. La magnitud que las fuerzas normales y tangenciales pueden llegar a presentar en la unión por este tipo de ensamble, está en función del mismo ensamble y de la confiabilidad que de éste se requiera. Sin embargo en cualquier caso, la presión en las superficies combinada con la aparición de zonas de transición propicia la aparición de fallas en sus superficies. De forma general, los estudios relacionados con la iniciación de fallas en las regiones de transición de contacto indican que el coeficiente de fricción tiene un papel dominante en la nucleación y aparición de fracturas, lo que se traduce en la disminución de vida por fatiga de los elementos mecánicos en contacto. Sin embargo, a pesar de los inconvenientes mencionados, las ventajas empíricas de los ensambles por presión siguen siendo aplicadas. Adicionalmente en ese sentido, aún es reducida la cantidad de literatura de investigación relacionada con las ventajas y desventajas de uniones por interferencia mecánica, que se realizan en presencia de condiciones pre-esforzadas por la presión en las superficies de contacto.

En función de lo anterior y con la intención de contribuir en los estudios relacionados con los tratamientos de las regiones potenciales de inicio de fallas en elementos mecánicos de ensambles a presión, en este trabajo se presenta un estudio de la estimación de las regiones de transición de contacto para ensambles a presión. Esta investigación se realizó considerando análisis numéricos por el método de elementos finito, con el fin de establecer los gradientes de presión que se presentan la interior de un par de superficies en contacto, las cuales forman parte de elementos ensamblados a presión. Se presenta la descripción de los elementos, la discretización de los mismos y los valores obtenidos para las presiones a lo largo de la dirección axial de contacto del elemento mecánico.

## 2 UNIÓN MECÁNICA

Dentro de los ensambles por ajuste a presión e interferencia destacan cuatro tipos: unión esférica, unión de contacto lineal, unión cilíndrica y unión cónica, de las cuales, la unión esférica y

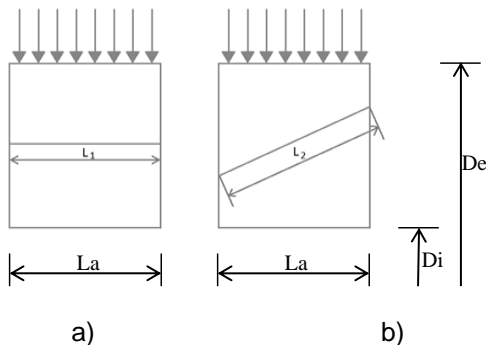
la unión de contacto lineal son empleadas para casos particulares como: rótulas, rodamientos esféricos y cilíndricos, válvulas de paso, etc. Los ensambles con uniones cilíndricas y cónicas pueden usarse en aplicaciones similares, tales como: bujes, válvulas, bridas, adaptadores, porta herramientas, aros elásticos, etc. Los ensambles cilíndricos y cónicos pueden presentar cualidades similares, pero dependiendo de su aplicación, la distribución de fuerzas y esfuerzos de contacto entre sus superficies difieren para ambos ensambles. En un ensamble cilíndrico, las fuerzas se distribuyen a lo largo de la unión ( $L_1$ ) entre ambos elementos; sin embargo, en un ensamble cónico, la longitud ( $L_2$ ) que abarca la unión entre ambos elementos es mayor (Figura 1). Por consiguiente un ensamble cónico presenta mayor longitud de contacto para la misma longitud axial de las piezas. En ese mismo sentido la distribución de fuerzas de contacto para esos ensambles será diferente, con una superficie mayor los ensambles con elementos cónicos se considera que tendrá menor desgaste y una mayor vida nominal que los cilíndricos [8, 9].

## 2.1 Ensamble cónico

El ensamble cónico usado como caso de estudio en el presente trabajo, se considera que cumple con las siguientes condiciones: a) comercial y de fácil adquisición, b) operación bajo condiciones de ajuste por interferencia, c) su geometría nominal es conocida a fin de permitir discretizarlo. En función de lo cual se seleccionó una polea tipo AK49H con buje intercambiable tipo L, Baldor [10] (ver Figura 2). Este ensamble se aplican en: a) ventilador y extractor de aire, b) compresor, c) taladro de banco, d) lijadora, d) cortadora, e) elevador, f) motor de combustión interna, por mencionar algunos casos.

## 3 MODELO DE LA UNIÓN CÓNICA

Con los datos geométricos y técnicos del ensamble cónico por interferencia [10] se obtiene el modelo en CAD del sistema (ver Figura 4). Con el objeto de reducir tiempo computacional se simplifica el modelo completo a solo un sector de éste que corresponde a un arco de  $45^\circ$  (Figura 4b). Con esa geometría se genera la interacción de contacto entre el buje y la polea para la simulación del ensamble. Para lo cual se usa un coeficiente de fricción de 0.21, el cual es típico para este tipo de uniones [10]. De manera similar se aplican las condiciones de restricciones de movimiento y de cargas al modelo, y se genera la malla correspondiente (Figura 4c). Las restricciones de movimiento se aplican en dirección tangencial y axial, por lo que el sistema solo se deforma en dirección radial. La carga se aplica a la polea en dirección axial, de forma tal que se logra el ajuste por interferencia entre las superficies cónicas de la unión. La carga para el ajuste es de 0.97 MPa, que se aplica en la cara superior de la polea.



**Figura 1.** Esquema de la sección transversal de una unión: (a) cilíndrica y (b) cónica, donde:  $L_1$ ,  $L_2$  son longitudes de contacto,  $L_a$  es longitud axial,  $D_i$  y  $D_e$  diámetro interno y externo respectivamente.



Figura 2. Buje intercambiable L – Polea AK49H [10].

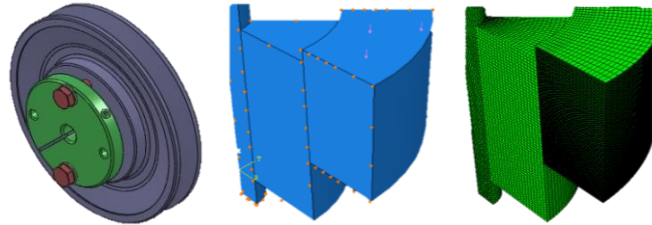


Figura 4. Unión cónica, donde: a) unión completa, b) sector de 45° de la unión con restricciones y c) malla discreta con elementos finitos tipo ladrillo.

### 3.1 Resultados del modelo discreto

La Figura 5 muestra los resultados de la distribución de presión de en la superficie de contacto cónica para el sector de la polea. Se observa que se presentan dos regiones con alta concentración de esfuerzo, que corresponden a las regiones límite donde de la interfaz de contacto de las superficies de la unión. La región 1 se localiza cerca del borde superior de la polea mientras que la región 2 se encuentra en el límite del borde inferior. Cabe mencionar que la polea no logra acoplarse en toda su longitud de contacto al buje, es por eso que la primera concentración de esfuerzos no coincide con el borde superior de la polea sino que se presenta una región sin contacto. La condición de fronteras de contacto se relaciona con la distribución de presión no uniforme sobre una zona de contacto. Los desplazamientos y las altas concentraciones en esas zonas provocan desgaste y fallos en las superficies. Esto se obtiene porque al aplicar una fuerza de arrastre a uno de los elementos (en este caso la polea), las zonas con altas presiones generarán fuerzas de fricción proporcionales a esa magnitud. Por consiguiente estas zonas permanecerán en reposo (*stick*), mientras que el resto de las zonas de contacto presentarán movimiento potencial (*slip*). La zona de transición entre la zona *stick* y la zona *slip* es la zona propensa a presentar las primeras fallas (grietas), y es la zona en constante cambio de estado (reposo-desplazamiento y viceversa). De ahí la importancia de determinar las regiones *stick* y *slip*, y definir la región de transición.

Con base en la presión ejercida sobre la zona de contacto, la fuerza normal, se genera una fuerza de fricción que está relacionada con su coeficiente de fricción. En función de la fuerza de fricción generada en la zona de contacto, es posible estimar las regiones de transición *stick-slip*. Para esto se definen las siguientes condiciones: a) si la fuerza de fricción en la interfaz de contacto es suficiente para prevenir cualquier desplazamiento, entonces se considera como región *stick*; b) si la fuerza de fricción en la interfaz resulta igual o menor a la fuerza de tracción, entonces la superficie tenderá a desplazarse considerándose como región *slip*. Para definir las regiones *stick* y *slip* es necesario determinar la carga externa resultante que actúa en el ensamble y tiende a generar desplazamientos en zonas con fuerza de fricción por debajo de esa carga.

Las vibraciones en este tipo de ensamble (bujepolea) son resultado de desbalance, cuyas magnitudes pueden ser del orden de  $10^{-3}$  m. Se pueden generar por desalineación entre poleas y el por torque oscilante en el sistema. Para determinar la carga externa es necesario calcular el torque en la interfaz de contacto y en consecuencia la fuerza de separación presente en la unión.

Para este caso se consideran los valores de la ficha técnica de una revoladora de concreto junto con la ecuación 1; donde: potencia del motor = 1.4925 kW, y velocidad del motor = 600 rpm.

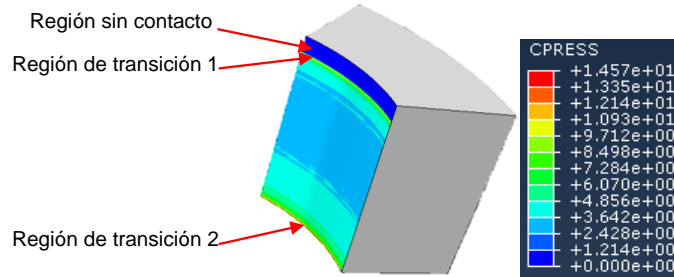


Figura 5. Distribución de presión de contacto en la polea.

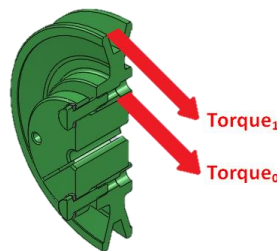


Figura 6. Torque total en la polea y en la interacción de contacto.

$$\text{Torque}_1 = \frac{\text{Potencia (kW)} * 9550}{\text{Velocidad (RPM)}} \quad (1)$$

El Torque<sub>1</sub> representa la carga total que se genera en la polea AK49H para un radio externo  $r_1=0.047625\text{m}$  (Figura 6). Con base en este torque se determina el torque interior de la zona de interacción de contacto del ensamble, con un radio  $r_0 = 0.0206\text{m}$  (Figura 6), resultando en un valor de 10.30 Nm. Como complemento de la carga de torque en la región de interfaz de contacto, lo cual se puede asociar a problemas propios de su funcionamiento, se considera una desalineación que motiva la vibración y cargas de separación en la interfaz de contacto.

Los problemas de vibración asociados con las bandas en "V" son producidos por diversas causas, tal como: a) distención, b) desalineación en poleas, c) excentricidad de poleas, o d) resonancia en banda. Para la fuerza de separación de la unión, se considera una falla del sistema por desalineación de  $0.01^\circ$  (valor común en los procesos de montaje de componentes mecánicos) en las poleas. De donde el torque de 10.30 Nm en la región de la interfaz de contacto es equivalente a una fuerza tangencial de 500 N en un radio  $r_0 = 0.0206\text{ m}$ . Con lo cual la fuerza separadora por desalineación tiene un valor de 0.095 N.

De acuerdo a los valores obtenidos para la presión de contacto (Figura 5), y considerando el coeficiente de fricción de 0.21, los valores de la fuerza de fricción, para cada posición en dirección axial de la superficie de contacto de la polea, que afianzan el par de superficies en contacto, se presenta en la Figura 7. Al comparar los valores de fricción en la superficie de la polea, con el valor de tracción de la fuerza separadora, se determinan entonces las regiones de transición de las zonas con contacto firme y aquellas que presentan deslizamiento (Figura 7).

Para el caso analizado, existen dos regiones de transición *stick-slip* en la polea a distancias de 2.74439 y 21.27269 mm (Figura 7), medidas a partir del borde sin contacto (ver Figura 5). Para cada región y a consecuencia de la vibración en el sistema se pueden presentar desplazamientos si la fuerza de tracción iguala o supera a la fuerza de fricción en esas regiones. Las zonas marcadas como sólidas en la Figura 7 indican las regiones *stick*, las cuales se mantienen sin desplazamiento a pesar de la fuerza de tracción aplicada, esto para las condiciones de fricción y carga antes descritas. El resto de la zona interna de contacto (región *slip*) está propensa a sufrir

desplazamientos en el interior de la zona de contacto, por efectos vibratorios o dinámicos, sin que existan desplazamientos en los bordes de contacto del ensamble. Esto último indica que por efectos dinámicos al interior de las superficies de contacto se generan transiciones de movimiento lo cual propicia la aparición de fallas en esas superficies para las posiciones indicadas; esto sin que la unión se separe o la misma presente movimientos relativos evidentes.

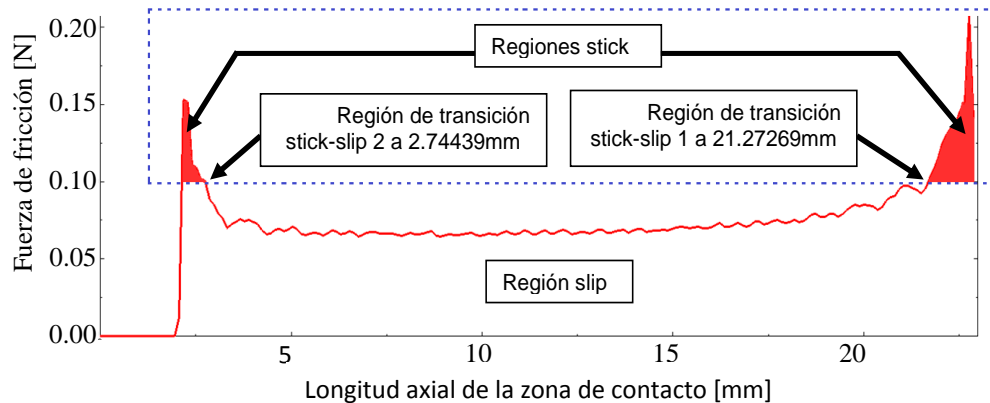


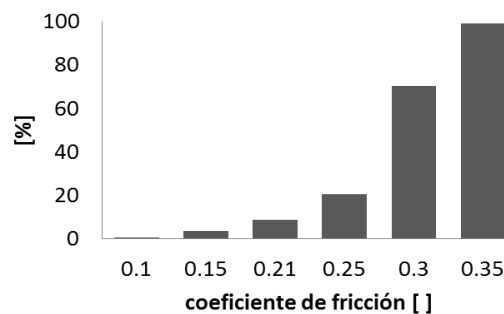
Figura 7. Regiones de transición *stick-slip*.

Las regiones presentadas en la Figura 7 corresponden en particular al coeficiente de fricción 0.21 y una desalineación en las poleas de  $0.01^\circ$ . Pero si esos valores se modifican durante la operación, y se mantiene la misma presión de interferencia que une al sistema, entonces las zonas de deslizamiento se modifican. La Tabla 1 presenta los valores de las regiones de *stick* 1 y 2, de acuerdo a la curva de fricción que se muestra en la Figura 7, donde se incluye la posición inicial y final de cada una de esas regiones. Los valores indicados en la Tabla 1 corresponden a las potenciales ubicaciones (en mm) de los puntos transición de contacto para diferentes coeficientes de fricción característicos de los pares de contacto metal-metal. Los valores obtenidos en la tabla 1 representan las condiciones para diferentes coeficientes de fricción, mientras que se mantiene constante la fuerza de apriete en la unión y la fuerza separadora en la interfaz de contacto. De acuerdo con la Tabla 1, la Figura 8 presenta el porcentaje, obtenido en función de la longitud axial de contacto, de la porción de contacto *stick* para diferentes coeficientes de fricción en la interfaz de contacto de la polea, en la cual se toma como referencia la longitud de contacto y sin contacto que se muestran en las Figuras 5 y 7.

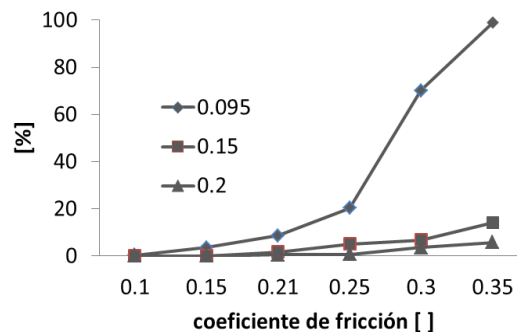
En la Figura 9, se presentan los resultados para el porcentaje de la longitud de contacto de la superficie de la polea en condición *stick* para diferentes coeficientes de fricción y fuerza separadora de la unión. La curva marcado como 0.095 corresponde a la fuerza de separación de la polea con desalineación de  $0.01^\circ$ , datos obtenidos en la Tabla 1. En función de lo anterior se analizan fuerzas separadoras que corresponde a un incremento de aproximadamente del 50% y 100% de la curva presentada en la Figura 8. De las curvas de la Figura 9, se observa que independiente del coeficiente de fricción, para las curvas 0.15 y 0.2 más del 80% de la superficie en contacto se encuentra en condición *slip*, lo cual indica condiciones más severas en la zona de transición, ya que prácticamente solo una pequeña porción del total de la superficie es la que mantiene unido al ensamble en condiciones de operación.

**Tabla 1.** Posiciones axiales en [mm] de las transiciones de contacto

		Coeficiente de fricción					
		0.1	0.15	0.21	0.25	0.3	0.35
Región 2	inicia	--	2.11	2.11	2.07	2.07	2.11
	termina	--	2.32	2.75	3.02	5.67	22.61
Región 1	inicia	22.45	22.10	21.46	19.35	11.70	--
	termina	22.51	22.61	22.61	22.61	22.61	--



**Figura 8.** Porcentaje de longitud axial de contacto en condición *stick*.



**Figura 9.** Porcentaje de longitud axial de contacto en condición *stick* en función de la carga de separación del ensamble.

La definición de las regiones de interfaz de contacto se considera de importancia, porque las regiones con contacto firme son las que básicamente realizan la trasmisión de potencia en la unión. La reducción de las regiones *stick* conduce a condiciones más severas de la superficie de la unión y a presentar fallos antes de lo estimado para condiciones nominales de operación y contacto. La ubicación de las zonas de transición cercanas a los límites de las superficies de contacto incrementa la posibilidad de fallo en el elemento mecánico, ya que es menor la cantidad de material que la propagación de grietas recorre para lograr alcanzar la superficie libre de contacto y producir el fallo total en el sistema.



#### 4 CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para la estimación de la ubicación de las potenciales regiones de transición de contacto en ensambles que se generan por presión e interferencia. Los resultados obtenidos permiten identificar el porcentaje de la superficie en contacto con afianzamiento firme que básicamente trasmite el total de la potencia en la unión. Se concluye que dependiendo de la magnitud de la fuerza de arrastre separadora solo una porción reducida (menos de 20% en los casos analizados) de la superficie en contacto realiza la transmisión está sometida a condiciones más severas, en consecuencia incrementa la posibilidad de aparición de daño superficial. En ese sentido, la reducción de área en condición *stick* y la cercanía da la región de transición con los bordes de los elementos de unión incrementa de igual manera la aparición de fallas hasta alcanzar la falla total. Se concluye que el trabajo desarrollado puede servir de guía en el diseño y fabricación de elementos de ensambles a presión por interferencia.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agraden al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) el financiamiento recibido para el desarrollo del presente trabajo, dentro del proyecto de investigación CB 102025.

#### REFERENCIAS

- [1] Aquino R, Tamura, Y. On stick–slip phenomenon as primary mechanism behind structural damping in wind-resistant design applications, *J. Wind Eng. and Ind. Aerodynamics*, 2013; 115; 121–136.
- [2] Perrinet O, Fouvry S, Alquier O. Application of the friction energy density approach to predict electrical contact endurance in a silver-plated coating subjected to fretting wear, **Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM)**, 2013 IEEE 59<sup>th</sup>, Newport, RI, 22-25 Sept. 2013.
- [3] Huan L, Ran G, Ming G, et al. Analysis of Fretting Fatigue Crack Initiation in a Riveted Two Aluminum Specimen, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2013, 1, 48-53, Nov 2013.
- [4] Mirzajanzadeh M, Chakherlou T.N, Vogwel J. The effect of interference-fit on fretting fatigue crack initiation and DK of a single pinned plate in 7075 Al-alloy. *Eng Frac Mec.* 78 (2011); 1233–1246.
- [5] O'Donnell W. Porowski J., Badlani M. Simplified Inelastic Analysis Methods for Bounding Fatigue and Creep Rupture Damage. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1980, 102;
- [6] Burns J, Larsen L, Gangloff R. Effect of initiation feature on microstructure-scale fatigue crack propagation in Al–Zn–Mg–Cu. *International Journal of Fatigue*, 2012; 42, 104–121; Sep 2012.
- [7] Chakherlou TN, Mirzajanzadeh, Saeedi Kh. Fatigue crack growth and life prediction of a single interference fitted holed plate. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 2010; 33 (10); 633–44
- [8] Bedolla J, Bedolla M, Flores V, et al. 2013, Reducción de Esfuerzo de Contacto por el Cambio en Contornos de Superficies, **1er Congreso de Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas**, 2013, Sn Francisco de Campeche, Campeche, México, 28-31 de Octubre.
- [9] Szwedowicz D, Bedolla J, Contact Notch Stress Assessment Within Frictional Contact Joints, *Revista Dyna*, 2012: 171: 88-96.
- [10] Baldor, “Buje QD”.MASKA, Catálogo de productos. Págs. 9-14.