

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y TEÓRICO DEL ENSAYO DE DESGASTE POR LA TÉCNICA DE BLOCK-ON-RING DE UN ACERO DIN UC1 BORURIZADO

J. M. Martínez-Vázquez^{1,*}, M. Vargas-Ramírez¹, A. M. Herrera-González, M. L. Cortés-Campos², F. Hernández-Santiago³, G. J. Gutiérrez-Paredes³

¹Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UA EH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
marissav@uaeh.edu.mx, mherrera@uaeh.edu.mx

²Área Académica de Ingeniería Agroindustrial, UPGto, Cortazar, Guanajuato
mcortes@upgto.edu.mx

³Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN Azcapotzalco, Ciudad de México
fhernandezs@ipn.mx, ggutierrezp@ipn.mx

* Autor de correspondencia: jmerced.martinez@gmail.com

RESUMEN

El tratamiento termoquímico de borurización, en materiales ferrosos, resulta en la formación de una capa de boruro de hierro que puede ser monofásica, constituida por Fe₂B; o bifásica, compuesta de FeB y Fe₂B. Una de las propiedades importantes de las capas boruradas son sus altos valores de dureza (2000 HV). El incremento en la dureza es producto de la alta concentración de boruros de hierro en la capa superficial, lo que, aunado a la disminución del coeficiente de fricción, por efecto del tratamiento, aumenta la resistencia al desgaste de los aceros borurizados. En este trabajo se presenta la validación de los resultados de la simulación del desgaste, en COMSOL 5.0®, con los experimentales. La técnica del block-on-ring se utilizó para el ensayo de desgaste en seco, a temperatura ambiente, en cuatro probetas de acero DIN UC1 borurizado, a 1073, 1173, 1223 y 1273 K durante 4 horas. Para cada probeta el tiempo de la prueba fue 503 s, a una carga y velocidad constantes de 92 N y 0.75 ms⁻¹; respectivamente. El análisis mostró una buena aproximación entre los valores experimentales y simulados, lo que presupone la factibilidad de aplicar la simulación en la predicción del desgaste en piezas tratadas termoquímicamente.

Palabras Clave: Block-on-ring, boruro de hierro, COMSOL®, desgaste, dureza, simulación.

1. INTRODUCCIÓN

Las fallas por desgaste son el resultado de la remoción o desplazamiento de material de la superficie de una pieza o componente a través del contacto y el movimiento relativo con un sólido, líquido o gas [1]. Existe una influencia significativa de la fricción y de la lubricación en el índice y severidad de los daños por desgaste [2]. La pérdida de material reduce la capacidad de carga y la adherencia provocando un aumento en la fricción debido a la generación de residuos. Por ejemplo, se ha observado desgaste excesivo en el cojinete principal de un motor provocando una pérdida de control del movimiento radial del cigüeñal [3]. Por tal motivo la resistencia al desgaste es una propiedad muy importante para todos aquellos materiales que entran en contacto repetitivo con otros.

Desafortunadamente, el medir la resistencia al desgaste es problemático porque hay muchas variables involucradas como: la fricción, lubricación y el acabado superficial por mencionar algunos [4]. Como deducción de las investigaciones realizadas se obtienen tablas de resistencia comparativa al desgaste, sin embargo, incluso empleando la misma metodología en cada prueba los resultados difieren por lo

que tienen una utilidad limitada en la selección de materiales. Las propiedades de desgaste se obtienen generalmente realizando la prueba en una situación real de servicio del prototipo.

La importancia del estudio del desgaste se produce en gran medida debido a que el acero tratado termoquímicamente está reemplazando al acero sin tratar con el fin de satisfacer las demandas de los consumidores para aumentar la durabilidad especialmente en la industria del automóvil [5]. Con respecto a la resistencia al desgaste, se ha observado que el coeficiente de fricción por deslizamiento en el recubrimiento era extremadamente pequeño por lo que la fricción por deslizamiento se relaciona con velocidades de desgaste más bajas [6]. El desgaste se analiza como un proceso dinámico y la predicción del proceso es un problema de valor inicial. En tales casos, un modelo de desgaste de la forma:

$$\frac{dh}{dt} = f(\text{carga}, \text{velocidad}, \text{temperatura}, \text{material}, \dots) \quad (1)$$

Ha demostrado ser apropiado, y el modelo más utilizado para la predicción del desgaste es la ley de desgaste lineal propuesta por Archard. Una generalización de la ley de desgaste de Archard se basa en el supuesto de que la tasa de desgaste en la superficie de contacto es proporcional a la presión local de contacto p y a la velocidad de deslizamiento relativa v , donde k es el coeficiente de desgaste dependiente del estado de contacto.

$$\frac{dh}{dt} = kpv \quad (2)$$

Aunque es posible implementar un modelo de desgaste más complejo, la mayoría de las simulaciones de desgaste se basan en la ecuación (1) y se simulan diferentes tipos de mecanismo de desgaste utilizando diferentes valores del coeficiente de desgaste, los mecanismos podrían simularse mediante la evaluación de mapas de desgaste y variables de estado tales como velocidad de deslizamiento, presión de contacto y temperatura para determinar qué modelo de desgaste utilizar en cada paso del tiempo. Las simulaciones de desgaste normalmente excluyen la fatiga de la superficie y sólo se ocupan del desgaste deslizante. Una ilustración del método es el ejemplo de dos discos en contacto donde las superficies de contacto se mueven con velocidades periféricas de v_1 y v_2 , con $v_1 > v_2$. Si se observa un punto en la superficie 1, P_1 , que acaba de entrar en el contacto, y también observamos un punto en la superficie 2, P_2 que está opuesto al primer punto P_1 cuando entran en el contacto. Cuando P_1 se mueve a través del contacto, la superficie opuesta no se moverá tan rápido como la superficie 1, puesto que $v_1 > v_2$. Una distancia virtual $\Delta\delta v = x \cdot (v_1 - v_2)/v_1$ en la dirección tangencial entre P_1 , y un punto P_2 . Esa distancia es compensada primero por deformaciones elásticas tangenciales de las superficies de contacto $\Delta\delta_{el,1} + \Delta\delta_{el,2}$, pero cuando ya no es posible, el punto observado se deslizará contra la superficie opuesta durante una distancia $\Delta\delta_s$ igual a:

$$\Delta\delta_s = \Delta\delta_v - \Delta\delta_{el,1} - \Delta\delta_{el,2} \quad (3)$$

El esfuerzo cortante de fricción en el contacto depende del proceso, lo que significa que al principio dependerá principalmente de deformaciones elásticas. A pares mayores o deslizamientos más altos, la tensión de fricción dependerá principalmente del deslizamiento entre las superficies. Los diagramas relevantes del desgaste, se denominan mapas de desgaste o diagramas de transición. El papel más referenciado sobre los mapas de desgaste son los trabajos hechos por Lim y Ashby [7], que clasificaron los diferentes mecanismos de desgaste para contactos deslizantes en seco.

Generación de calor durante el ensayo de desgaste. El modelo incluye la conducción de calor entre la probeta y el disco del tribómetro. La ecuación de transferencia de calor expresa la disipación de calor

de las superficies y el aire circundante tanto por convección como por radiación. La carga de deslizamiento es dada por el negativo de la derivada temporal de la energía cinética:

$$P = -\frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2}{2} \right) = -mv \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

donde m es la masa del disco y v denota su velocidad. La fuente de calor por fricción es:

$$P_{fric,total} = P = mv \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

La presión de contacto entre el disco y la probeta está relacionada con el calor de fricción por unidad de área, P_{fric} , según:

$$p = \frac{P_{fric}}{\mu v} \quad (6)$$

donde μ es el coeficiente de fricción.

El disco y la probeta disipan el calor producido por convección y radiación. El vector de velocidad de disco local es:

$$v_d = \frac{v}{R}(-x, y) \quad (7)$$

Las temperaturas superficiales del disco y la probeta varían con el tiempo y la posición. Para investigar cuánto del calor generado se disipa al aire, es necesario estudiar las integrales del calor producido y del calor disipado.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El tratamiento de borurización se realizó en un acero DIN UC1, por empaquetamiento en una mezcla de polvos compuesta por 30% en peso de ácido bórico, 30% en peso de bórax y el resto de carburo de silicio a las temperaturas de 1073, 1173, 1223 y 1273 K. El proceso se llevó a cabo introduciendo los sustratos pulidos, en una caja de 100 x 150 x 70 mm de placa de acero de $\frac{1}{4}$. El tratamiento se realizó durante un tiempo de 4 horas. La caja de acero se colocó dentro de un horno NABERTHERM precalentado a la temperatura de los tratamientos. Los sustratos de acero de $10 \times 5 \times 5$ mm pulidos con lijas de carburo de silicio con tamaño de partícula de $78\mu\text{m}$, $53.5\mu\text{m}$, $36\mu\text{m}$, $23.6\mu\text{m}$, $16\mu\text{m}$, $12.2\mu\text{m}$, $9.2\mu\text{m}$ y $6.5\mu\text{m}$ y por último con paño de microfibras y alúmina de $0.05\mu\text{m}$ hasta lograr un acabado espejo; con el objetivo de eliminar la suciedad de las muestras y que ésta no altere los resultados del tratamiento, así también para facilitar su caracterización microscópica posterior.

Se utilizó un equipo tipo block-on-ring marca PLINT® Multipurpose Friction and Wear Tester, en este equipo la probeta es sostenida por un portamuestras que está unido a una celda de carga. El acero del anillo tiene un tratamiento superficial de endurecimiento que le confiere una dureza 63HRC. El ensayo se realizó en seco, la velocidad relativa entre muestra y contraparte fue de 0.75 m/s, con una carga constante de 92N y una longitud recorrida de aproximadamente 377 m, equivalente a 2000 ciclos. El coeficiente de fricción (μ), se obtiene a partir de la fuerza de fricción medida con la celda de carga. Este método de ensayo de laboratorio se realizó para determinar el desgaste de los materiales durante el deslizamiento. El desgaste se determinó pesando las muestras antes y después de la prueba. La prueba también ofreció como resultado el coeficiente de fricción.

El software COMSOL Multiphysics® se utilizó para el modelado de sistemas físicos basándose en el Método del Elemento Finito. El software proporcionó el modelado para obtener una solución a través de la combinación de distintos fenómenos físicos. El proceso se ejecutó a través de los siguientes pasos: la creación de una geometría, la especificación de una física, la construcción de un mallado, la elección del tipo de solución y la visualización de los resultados. La simulación de las pruebas tribológicas se realizó en el módulo de Mecánica Estructural.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar el coeficiente de fricción en el acero DIN UC1 tratado termoquímicamente por borurización, se utilizó el ensayo block-on-ring, con una carga constante de 92 N para todas las pruebas, a una velocidad de 0.75 m s^{-1} , durante 2000 ciclos equivalente a una distancia recorrida de 377 m. El análisis de la tasa de desgaste (W), mostrado en la Tabla 1, expuso que a la temperatura de 1073 K, espesor de capa (v) de $7.33 \text{ }\mu\text{m}$, y coeficiente de fricción (μ) 0.6; el valor de W fue de $9.0 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-1}$. A 1173 K, con v de $15.12 \text{ }\mu\text{m}$, μ disminuyó un 8.3%, sin embargo W aumentó un 89%, pasando de 9.0 a $17.0 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-1}$. A 1223 K, a v mayor de $17.7 \text{ }\mu\text{m}$, μ bajó 7.2% con respecto a la temperatura anterior y W mostró un valor similar, $9.5 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-1}$, al de la temperatura de 1073 K. A 1273 K, con el espesor de capa mayor de los 4 casos, $26.4 \text{ }\mu\text{m}$, a pesar de que μ fue similar al obtenido a 1073 K, el valor de W fue el menor de todos los casos, $2.5 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-1}$.

Tabla 1. Resultados del ensayo de desgaste en función del espesor de la capa de boruro.

Parámetros de la muestra	Temperatura de tratamiento (K)			
	1073	1173	1223	1273
Espesor de la capa (μm)	7.33	15.12	17.7	26.48
Tasa de desgaste (g/m) ($\times 10^{-6}$)	9.00	17.00	9.50	2.90
Coeficiente de fricción	0.60	0.55	0.51	0.56

El tipo de desgaste que se observó a la primera temperatura, 1073 K, fue adhesivo, posteriormente a 1173 K una vez que ocurre la deformación plástica se inicia el desgaste abrasivo, y las partículas del recubrimiento ocasionan una mayor tasa de desgaste sin aumento del coeficiente de fricción. A 1223K un espesor de capa mayor, por efecto de la carga durante la prueba, se delamina, aumentando la tasa de desgaste, pero como aún la capa no se desprende completamente, el efecto lubricante del boruro de hierro frena el aumento del coeficiente de fricción. Finalmente, a 1273 K, el valor de espesor mayor, probablemente ocasiona, que la capa de boruro experimenta delaminación en todos los casos, y al no desprenderse totalmente, continúa protegiendo al acero del desgaste. La simulación del desgaste; Figuras 1, 2, 3 y 4 se ejecutó a una carga constante de 92 N durante 503 s, con una distancia recorrida de 377 m a una velocidad constante de 0.75 ms^{-1} a temperatura ambiente. Estos datos se compararon con los resultados de la prueba de desgaste experimental con la técnica del block on ring. Las simulaciones muestran una disminución gradual de la tasa de desgaste en relación con el coeficiente de fricción; causado principalmente por una reducción en el calentamiento de la probeta, debido al aumento en el área de contacto a medida que aumenta el diámetro de la huella de desgaste. El espesor de la capa aumenta con el tiempo y la temperatura del tratamiento, y de esta manera se reduciría gradualmente el desgaste, sin embargo, esta correlación depende más del coeficiente de fricción que del espesor de la capa. En la Figura 5 se muestran la comparación de los resultados experimentales y simulados, donde se observó una coincidencia del 93%, lo que representa una validación de la

utilización de la simulación como un modelo fiable de pruebas de contacto deslizante por la técnica del block on ring, y una fuerte evidencia de la robustez de este modelo. Por lo tanto, se espera que a medida que la temperatura aumenta, el volumen de desgaste aumentará, tendencia que se observó tanto experimental como numéricamente.

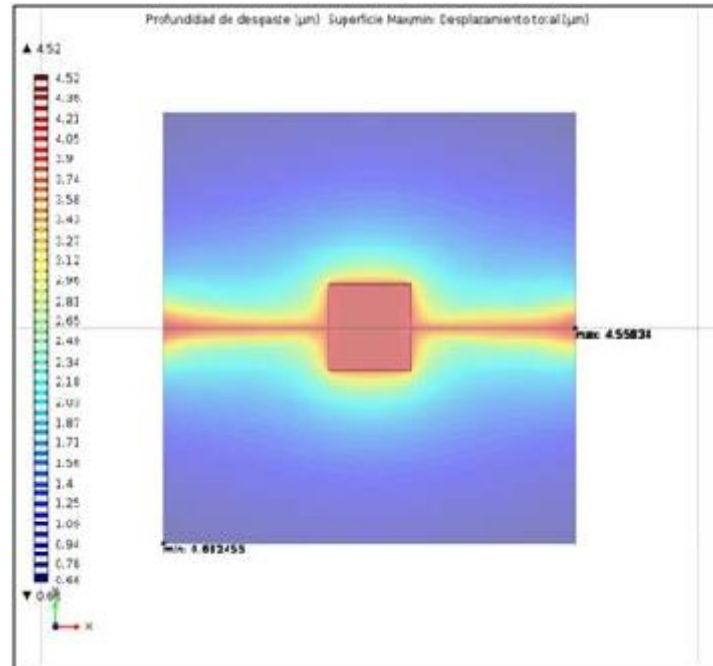


Figura 1. Resultados de la simulación del ensayo de desgaste para la muestra tratada a 1073 K y coeficiente de fricción de 0.5317

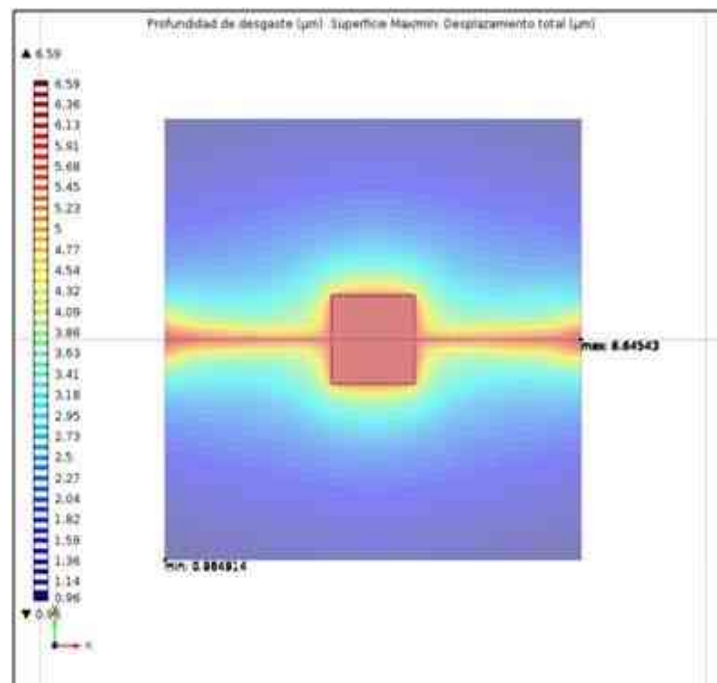


Figura 2. Resultados de la simulación del ensayo de desgaste para la muestra tratada a 1173 K y coeficiente de fricción de 0.5716

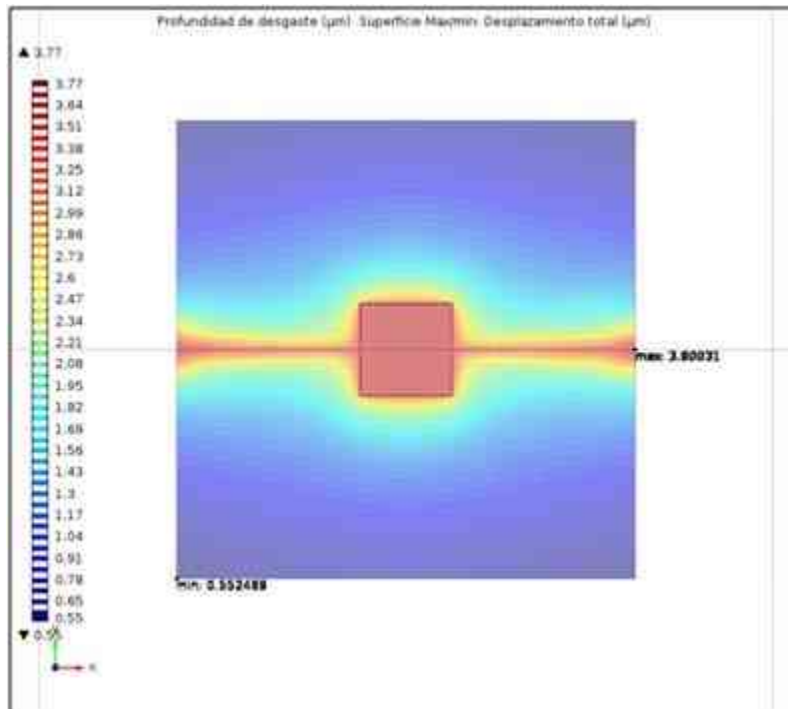


Figura 3. Resultados de la simulación del ensayo de desgaste para la muestra tratada a 1223 K y coeficiente de fricción de 0.5097

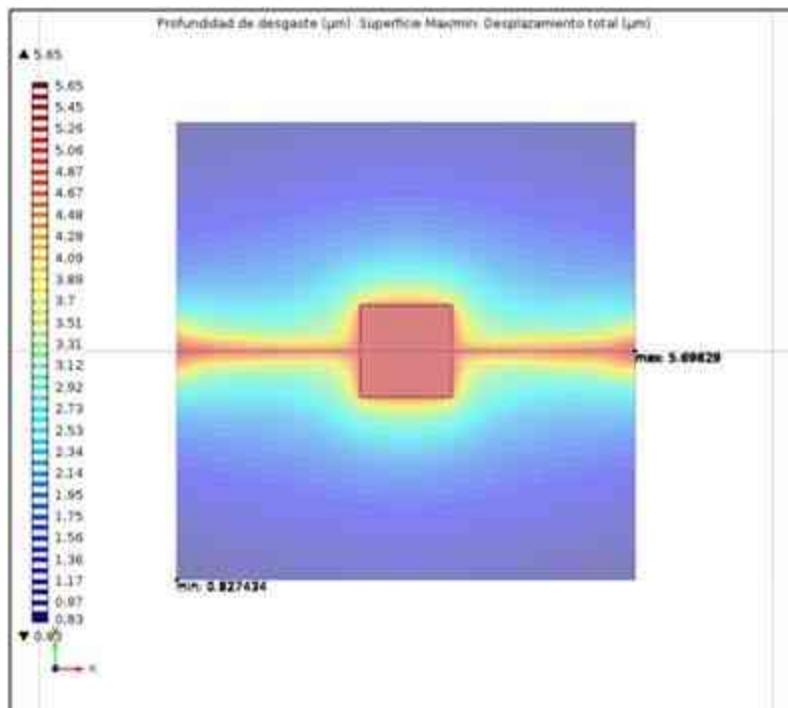


Figura 4. Resultados de la simulación del ensayo de desgaste para la muestra tratada a 1273 K y coeficiente de fricción de 0.5539

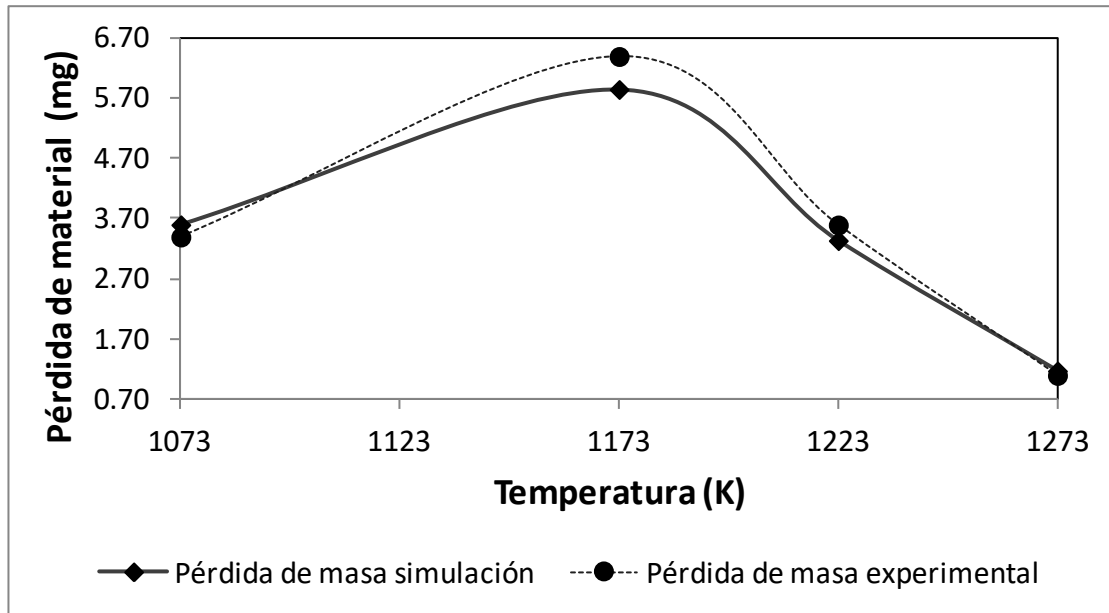


Figura 5. Comparación de los resultados del ensayo de desgaste simulado y experimental

El modelo de transferencia de calor fue resuelto por elementos finitos; los tiempos de solución tanto para el análisis mecánico fueron de 503 s. Las Figura 6, 7, 8 y 9 presentan la distribución de la temperatura producida durante el ensayo de desgaste. Con la simulación se pudo demostrar que se generó un perfil de temperatura sobre la superficie de contacto debido a la fricción entre la probeta con el disco del tribómetro durante el ensayo.

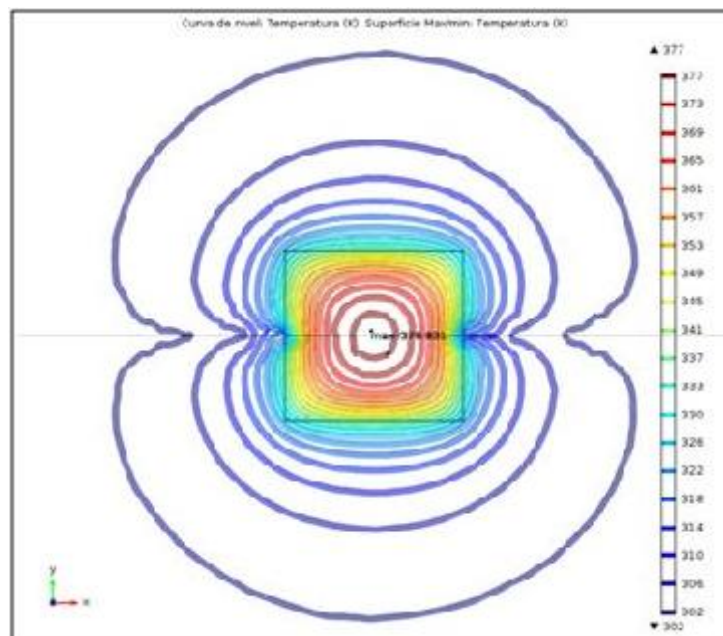


Figura 6. Curva de nivel de temperatura de la muestra tratada termoquímicamente a 1073 K durante 4 horas, valor máximo 378.83 K

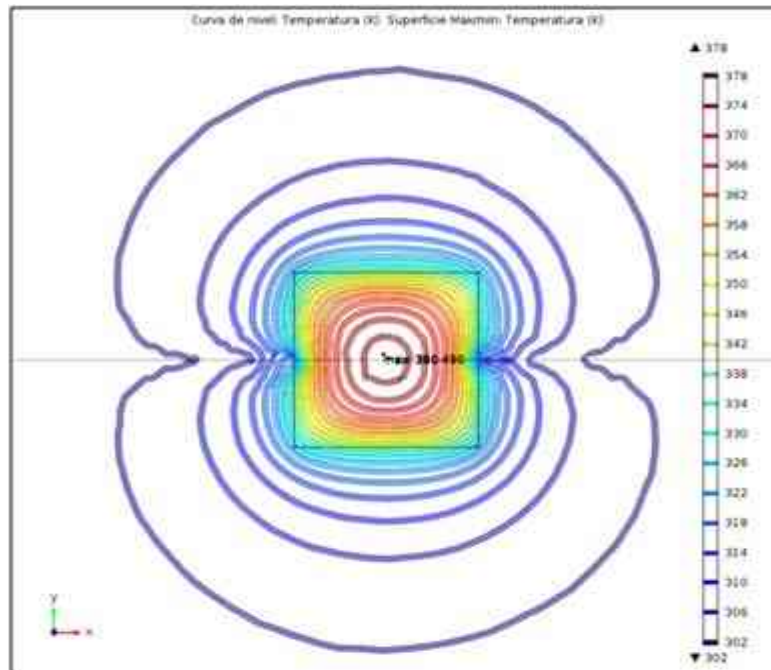


Figura 7. Curva de nivel de temperatura de la muestra tratada termoquímicamente a 1173 K durante 4 horas, valor máximo 380.49 K

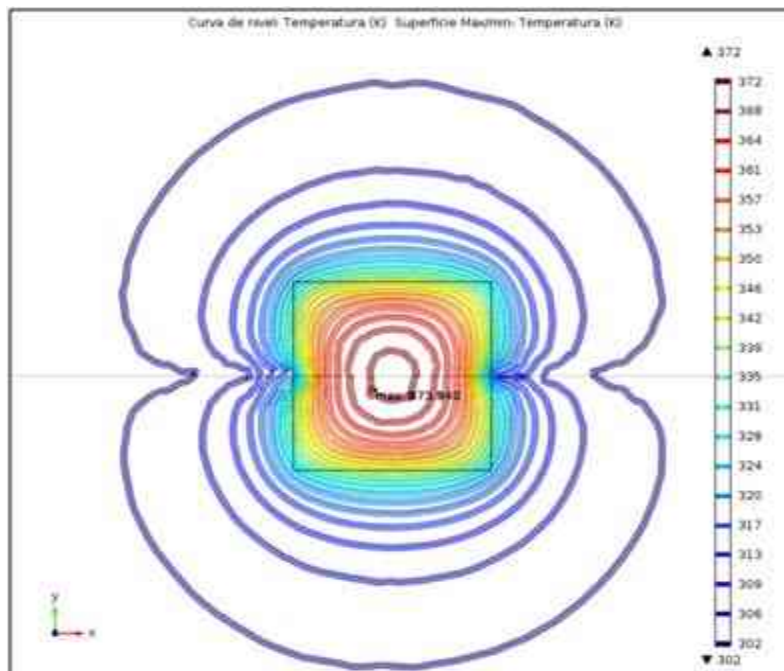


Figura 8. Curva de nivel de temperatura de la muestra tratada termoquímicamente a 1223 K durante 4 horas, valor máximo 373.94 K

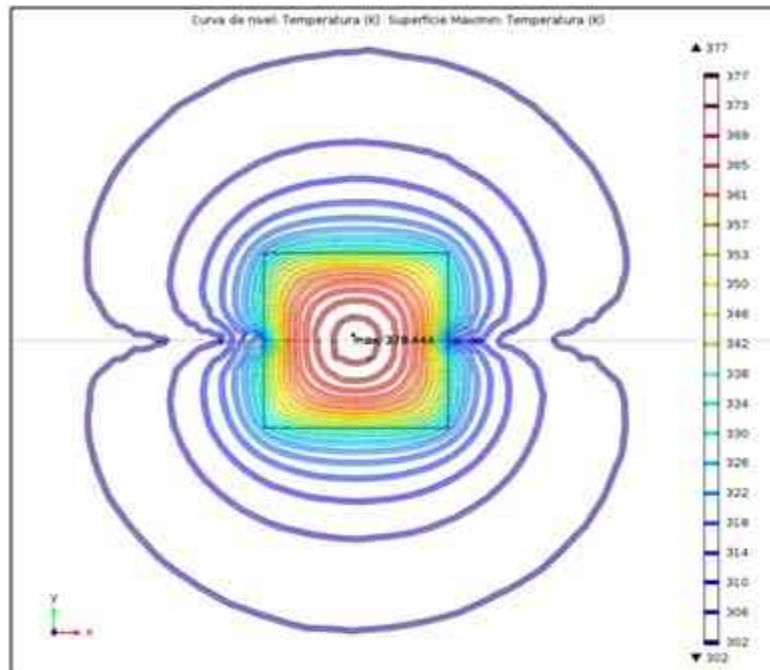


Figura 9. Curva de nivel de temperatura de la muestra tratada termoquímicamente a 1073 K durante 4 horas, valor máximo 379.44 K

La comparación de los resultados de la simulación bajo las mismas condiciones de operación mostró un comportamiento similar para la distribución de la temperatura. La diferencia entre las temperaturas máximas, de ± 6 K, se debe a los diferentes valores de los coeficientes de fricción obtenidos experimentalmente. Los coeficientes de fricción para las muestras tratadas a 1073, 1173, 1223 y 1273 K son 0.60, 0.55, 0.51 y 0.56 respectivamente; por lo que las temperaturas máximas muestran una dependencia lineal del coeficiente de fricción, es decir, a mayor coeficiente de fricción se obtuvo una temperatura máxima más elevada y viceversa.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos de desgaste mostraron la correlación del espesor de la capa de boruro con la rugosidad, así como con la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción. Los resultados presuponen que espesores de capa menores, obtenidos a las temperaturas de 1073 y 1173 K, tienen coeficientes de fricción altos (0.60 y 0.55) y por lo tanto aumenta la tasa de desgaste; y que los espesores gruesos, a pesar de que se delaminan y aumenta la tasa de desgaste, al no desprenderse totalmente la capa, ocasionan que el coeficiente de fricción permanezca, aunque similar en valores (0.57) prolongó la protección al acero del desgaste.

La simulación del ensayo del desgaste mostro una aproximación del 93% con los datos experimentales, donde la correlación principal de la masa pérdida es con el coeficiente de fricción y no con el espesor de la capa. Otro factor importante, en el desgaste es la distribución de temperatura, la cual también se simuló. Por lo tanto, es válida la simulación como un modelo fiable de pruebas de contacto deslizante por la técnica del block on ring, y una fuerte evidencia de la robustez de este modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a PRODEP, la UAEH y al IPN por el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Holmberg and A. Matthews: Tribology International, 1998, vol. 31, pp. 107-120.
- [2] F. Findik: Materials and Design, 2014, vol. 57, pp. 218-244.
- [3] ASM: Handbook Volume 1 Properties and selection of: irons, steels and high performance alloy, USA, ASM International, 1993, pp. 1047-1050.
- [4] ASM: Handbook Volume 18 Friction, Lubrication and Wear Technology, USA, ASM International, 1992, pp. 14-20.
- [5] C. M. Taylor: Wear, 1998, vol. 221, pp. 1-8.
- [6] ASM: Handbook Volume 5 Surface Engineering, USA, ASM International, 1994, pp. 303-307.
- [7] S. C. Lim and M. F. Ashby: Acta Metal, 1987, vol. 35, pp. 1-24.