

**ESTUDIO NUMÉRICO DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE
CARBURIZADO Y TEMPLE DE UNA FLECHA DE TRANSMISIÓN EMPLEANDO
DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

**NUMERICAL STUDY OF CARBURIZING AND QUENCHING THERMOCHEMICAL
TREATMENT OF A DRIVE SHAFT EMPLOYING EXPERIMENT DESIGN**

E. Rodríguez-Morales^{1*}, J.J. Montes-Rodríguez², A.G. Luna-Bustamante³,
D. Balderas-Puga¹ y C. Luna-González⁴

¹Instituto Tecnológico de Querétaro. Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000, Querétaro, Qro., México.

²Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, C.P. 76130, Querétaro, Qro., México.

³AMD Maquinaria, S.A. de C.V. Av. Peñuelas No. 21 Nave C4, Col. San Pedrito Peñuelas, C.P. 76148, Querétaro, Qro., México.

⁴Transmisiones y Equipos Mecánicos, S.A. de C.V. Av. 5 de Febrero No. 2115, Fracc. Industrial Benito Juárez, C.P. 76120, Querétaro, Qro., México.

Recibido 30 de Junio de 2014; Aceptado 16 de Junio de 2015

Resumen

El tratamiento termoquímico de carburizado y temple se aplica extensivamente en la industria de fabricación de autopartes. Cuando el tratamiento se aplica en más de una etapa, su estudio por medio de experimentos se hace demasiado extenso por la gran cantidad de combinaciones de las variables de tratamiento que pueden obtenerse. Una alternativa de estudio viable es simular numéricamente el proceso y realizar experimentos virtuales, lo cual, en conjunto con la aplicación de técnicas estadísticas de diseño de experimentos, permite profundizar en el conocimiento del mismo a costos relativamente bajos, para encontrar así condiciones de tratamiento más favorables que repercuten en la disminución de costos de producción. En el presente estudio se simularon, con el paquete computacional comercial COMSOL Multiphysics®, las dos etapas de carburizado, de un proceso en cuatro etapas que incluye temple, de una flecha de transmisión, obteniéndose resultados que fueron validados por comparación con mediciones de dureza realizadas en piezas de producción tratadas, aplicando posteriormente un diseño de experimentos en base a un arreglo de Taguchi. Se obtuvieron así resultados de simulación para una variedad de combinaciones de parámetros de tratamiento, resaltando aquellas que implican una disminución de los costos de tratamiento.

Palabras clave: carburizado, simulación, COMSOL, dureza, Taguchi.

Abstract

Carburizing and quenching thermochemical treatment is extensively applied in the automotive parts manufacturing industry. When the treatment consists of more than one stage, the study by means of experiments becomes too vast due to the large number of combinations of treatment variables that can be obtained. A viable alternative of study is to numerically simulate the process and to perform virtual experiments, which, together with the application of design of experiments statistical techniques, allows a deeper understanding of the process at relatively low costs, in order to find more favorable treatment conditions that impact on production costs reduction. In the present study the two carburizing stages, in a four stages process that includes quenching, of a drive shaft, were simulated with COMSOL Multiphysics® commercial software package, giving results which were validated by comparison with hardness measurements performed on treated production parts, later applying a design of experiments based on a Taguchi array. Thus simulation results for a variety of combinations of treatment parameters were obtained, emphasizing those that result in a reduction of the treatment costs.

Keywords: carburizing, simulation, COMSOL, hardness, Taguchi.

*Autora para la correspondencia. E-mail: e.rodriguez.morales79@gmail.com
Tel. 44-22-27-44-21

1 Introducción

El tratamiento termoquímico de carburizado y temple de partes automotrices, elaboradas en aceros de baja aleación y realizado en varias etapas, constituye un fenómeno complejo en el cual es complicado visualizar qué variables son las que tienen el efecto más importante sobre el resultado obtenido. Dada la gran cantidad de combinaciones de variables de proceso que pueden plantearse, un estudio experimental del proceso puede resultar tan extenso que se vuelve impracticable, impidiendo así el poder adquirir un mayor conocimiento del mismo. En este sentido, las herramientas estadísticas de diseño de experimentos representan una alternativa viable para la reducción del número de experimentos, sin sacrificar la calidad de la información obtenida, sin embargo, la cantidad de experimentos resultante del diseño sigue siendo grande y difícilmente realizable. No obstante, se han publicado algunos trabajos en los cuales se ha hecho alguna optimización experimental empleando técnicas estadísticas para tal fin [Palaniradja y col. (2005), Khusid y col. (1995)]. En virtud de lo anterior, es común que en las industrias que emplean tratamientos térmicos de este tipo los ajustes se hacen por ensayo y error, de modo que casi nunca se logran alcanzar las condiciones óptimas de tratamiento, y se opera bajo combinaciones de las variables de proceso que resultan sólo suficientes para conseguir el resultado esperado, lo que con frecuencia implica operar bajo condiciones que representan un gasto innecesario, e incluso excesivo, de energéticos y materiales, así como de tiempo de operación, lo cual eleva los costos de producción.

Una alternativa atractiva que resulta de mucha utilidad para el estudio de los procesos empleados industrialmente es la simulación numérica, por las ventajas que ofrece en términos del detalle con que puede conocerse un fenómeno y de la economía en la realización de experimentos, en comparación con la experimentación tradicional. En este sentido, aunque se han publicado trabajos en los cuales se ha simulado el tratamiento de carburizado y temple de partes, ya sea empleando paquetes computacionales comerciales [Sugianto y col. (2009), Boitout y col. (2008), Ferguson y col. (2005)], códigos implementados localmente [Cavaliere y col. (2009), Song y col. (2007), Kang e Im (2007)], e incluso por medio de alguna solución analítica para la ecuación de transporte aplicable [Jiménez y col. (1999)], no se han explotado las bondades de las herramientas estadísticas de diseño de experimentos

en combinación con la simulación del tratamiento, buscando alcanzar mayor conocimiento del mismo a bajo costo y, eventualmente, proponer mejoras desde el punto de vista económico.

En el presente estudio se presenta como propuesta una combinación de simulación numérica con análisis estadístico, aplicada al estudio del tratamiento térmico de carburizado y temple de una flecha de transmisión, obteniéndose una serie de combinaciones de parámetros de tratamiento que representarían mejoras al proceso en términos de disminución de costos, debido al empleo de temperaturas de procesamiento más bajas y/o tiempos de tratamiento más cortos, lo que, adicionalmente, contribuye a disminuir el riesgo de afectar negativamente la calidad metalúrgica del producto, por la exposición a tratamientos prolongados a temperaturas elevadas. La propuesta presentada puede ser aplicada a otros procesos industriales, lo que permitiría, eventualmente, encontrar combinaciones más convenientes de los parámetros que regulan tales procesos, representando ahorros en energéticos, materiales y tiempos de mano de obra, lo que a la postre repercute en la reducción de los costos de producción, incrementando así la productividad de las plantas productoras.

2 Antecedentes

2.1 Sistema estudiado: Flecha de transmisión

El sistema de estudio consiste de una flecha de transmisión de uso en automóviles, la cual está elaborada en un acero SAE 8625H cuya geometría se muestra en la Fig. 1.

La flecha es sometida, como parte de su procesamiento para convertirse en un producto terminado, a un proceso de carburizado y temple, con el cual se busca conseguir una dureza superficial de 58 HRC y una dureza de 50 HRC a una profundidad mínima de 0.8890 mm y máxima de 1.1938 mm (capa efectiva) desde la superficie, en la posición señalada por la flecha que se muestra en la Fig. 1.

2.2 Proceso de carburizado y temple

El proceso de carburizado y temple estudiado en el presente trabajo es uno empleado industrialmente en el tratamiento de componentes para uso en la industria

automotriz elaborados en diversos aceros. El proceso completo de tratamiento térmico consiste de cuatro etapas continuas, de las cuales las tres primeras se llevan a cabo dentro del horno de tratamiento térmico:

- i) Calentamiento en la zona 1 del horno desde temperatura ambiente, T_i , hasta una temperatura de austenizado del acero que se está tratando $T_f = 1200$ K, seguido de un tiempo de permanencia cuya finalidad es alcanzar la temperatura mencionada en todo el volumen de la pieza a tratar.
- ii) Mantenimiento en la zona 2 del horno a la temperatura de austenizado $T_i = T_f = 1200$ K en una atmósfera carburizante con un potencial de Carbono $C_{C,g} = 6619$ mol/m³. En esta etapa el tiempo de permanencia, t , de las partes a tratar es de 10080 s, aproximadamente.
- iii) Mantenimiento en la zona 3 del horno a una temperatura $T_i = T_f = 1173$ K en una atmósfera carburizante con un potencial de Carbono $C_{C,g} = 5617$ mol/m³. En esta etapa el tiempo de permanencia, t , de las partes a tratar es de 6300 s, aproximadamente. La transición de la zona 2 a la zona 3 ocurre dentro del horno de tratamiento, pero no se considera como una parte importante del tratamiento dado lo breve que es en un proceso continuo.
- iv) Temple de las piezas tratadas desde una temperatura $T_i = 1173$ K en un contenedor con aceite para temple a una temperatura de $T_f = 353$ K con agitación.

La Tabla 1 muestra de forma condensada las condiciones que imperan en cada una de las etapas del tratamiento térmico de carburizado y temple descrito.

3 Metodología

3.1 Descripción matemática del proceso de carburizado

De las cuatro etapas ya mencionadas de que consta el tratamiento térmico de carburizado y temple de las piezas estudiadas en el presente trabajo, sólo las etapas 2 y 3 se consideraron para su estudio, en virtud de que en ellas es en donde se lleva cabo la difusión de carbono al interior de las piezas tratadas, lo que a la postre determinará la dureza superficial alcanzada después del temple en ellas, así como el perfil de

dureza hacia el interior de las mismas. Dado que esas dos etapas ocurren isotérmicamente, se puede hacer una descripción suficiente de los fenómenos que ocurren en ellas por medio de la siguiente expresión, la cual corresponde a la ecuación de continuidad [Poirier y Geiger (1998)]:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_A = 0 \quad (1)$$

en donde C_A es la concentración de la especie A que difunde, en mol/m³, t es el tiempo, en s, y N_A es el flujo molar de la especie A por unidad de área y de tiempo, en mol/m²s.

La ecuación anterior puede ser simplificada, obteniendo así la que se conoce como la segunda ley de Fick de la difusión [Poirier y Geiger (1998)]:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_A \nabla^2 C_A \quad (2)$$

en donde D_A es un coeficiente de difusión constante a la temperatura de interés, en m²/s.

Para estimar los valores del coeficiente de difusión a cada una de las dos temperaturas de interés, se puede hacer uso de una función del tipo Arrhenius como la siguiente [Cavaliere y col. (2009), Kang e Im (2007), Jiménez y col. (1999)]:

$$D_A = D_0 e^{-Q/RT} \quad (3)$$

en donde D_0 es un factor pre-exponencial, en m²/s, Q es una energía de activación, en J/mol, R es la constante de los gases ideales, en J/mol K, y T es la temperatura a la cual se quiere estimar el coeficiente de difusión, en K. Para el caso de la difusión de carbono en austenita D_0 fue considerado igual a 0.000021 m²/s, Q igual a 141419 J/mol y R igual a 8.314 J/mol K [Thelning (1984)].

3.2 Simulación numérica del tratamiento de una flecha de transmisión

Para simular numéricamente las dos etapas de interés del proceso de carburizado ya mencionado se utilizó el paquete computacional comercial de simulación COMSOL Multiphysics®, que resuelve ecuaciones diferenciales parciales por el método del elemento finito, empleando el módulo CHEMICAL REACTION ENGINEERING para resolver la Ec. (2), y haciendo uso de la interfase TRANSPORT OF DILUTED SPECIES.

Con la intención de simplificar el sistema, y así acortar el tiempo de cálculo, se consideró como dominio de cálculo una cuarta parte de la flecha, es decir, 90° del total de su circunferencia, aprovechando

su geometría tipo cilindro, privilegiando ante todo la captura de cada uno de los detalles geométricos relevantes de la pieza estudiada. El dominio de cálculo resultante se muestra en la Fig. 1. En dicha figura están indicadas las condiciones de frontera generales que se emplearon en el presente estudio, en donde C_C es la concentración de carbono en cualquier posición del dominio de cálculo, en mol/m^3 , t es el tiempo, en s, las expresiones $dC_C/d\theta = 0$ y $dC_C/dr = 0$ se refieren a un flujo nulo de carbono en la dirección angular y en las zonas seleccionadas (región azul de la figura), respectivamente, mientras que la condición del tipo convectiva $-D_C(dC_C/dr) = \beta(C_{Cg} - C_C)$ corresponde con una utilizada frecuentemente en el estudio de procesos de carburizado [Song y col. (2007), Karabelchtchikova (2007)]. En dicha expresión D_C es el coeficiente de difusión de carbono a la temperatura de interés, en m^2/s , C_{Cg} es el potencial de carbono en la atmósfera carburizante, en mol/m^3 y, β es un coeficiente que se consideró igual a 2×10^{-6} m/s, el cual es un valor comúnmente empleado [Karabelchtchikova (2007)]. Adicionalmente, en dicha figura se muestra también la malla generada para la realización de los cálculos, la cual consistió de 751975 elementos, con 163963 grados de libertad.

La condición inicial implementada para la simulación de la segunda etapa del tratamiento térmico puede ser expresada de la siguiente forma:

$$C_C(t = 0) = C_{C,2}(t_2 = 0) = 1642 \text{ mol/m}^3 \quad (4)$$

en donde $C_{C,2}$ es la concentración de carbono en cualquier posición en la pieza que se está tratando, en mol/m^3 , y t_2 es el tiempo para dicha segunda etapa, en s. Como ya se mencionó antes, la temperatura T_2 durante toda la segunda etapa tiene un valor constante de 1200 K.

Las condiciones de frontera establecidas para la segunda etapa de tratamiento pueden denotarse como una particularización de las mostradas en la Fig. 1, quedando de la siguiente manera: $dC_{C,2}/d\theta = 0$, $dC_{C,2}/dr = 0$, $-D_{C,2}(dC_{C,2}/dr) = \beta(C_{Cg,2} - C_{C,2})$, en donde el subíndice 2 denota que corresponden a la segunda etapa.

La condición inicial que se implementó para la simulación de la tercera etapa del tratamiento térmico es la siguiente:

$$C_C(t = t_{2,f}) = C_{C,3}(t_3 = 0) = C_{C,2}(r, \theta, z, t_2 = t_{2,f}) \quad (5)$$

en donde $C_{C,3}$ es la concentración de carbono en cualquier posición de la pieza que se está tratando, en mol/m^3 , t_3 es el tiempo para esa tercera etapa, en s, y $t_{2,f}$ se refiere al tiempo total de tratamiento en la segunda etapa del tratamiento térmico, en s. Como ya se mencionó antes, la temperatura T_3 durante toda la tercera etapa permaneció constante en 1173 K.

Las condiciones de frontera estipuladas para la tercera etapa de tratamiento son equivalentes a las impuestas para la etapa 2, y están denotadas con un subíndice 3.

4 Resultados

4.1 Validación experimental de los resultados numéricos obtenidos

Se realizaron mediciones de dureza por micro-indentación en la zona señalada en la Fig. 1 en tres flechas de transmisión tratadas térmicamente de acuerdo a las etapas mostradas en la Tabla 1, reportando los valores obtenidos en escala Rockwell C, los cuales fueron utilizados para la validación de los resultados obtenidos de la simulación numérica de dicho tratamiento, y poder establecer así la validez del modelo de simulación generado. Los resultados que pueden obtenerse de la simulación son concentraciones de carbono en diferentes posiciones en el interior de la flecha, a partir de los cuales pueden obtenerse valores de dureza aproximados mediante el uso de curvas típicas que relacionan concentración de carbono y dureza en función del porcentaje de martensita obtenido en las piezas tratadas [The Timken Company (2009)]. Para el presente caso, se estableció un criterio de conversión de concentración de carbono a dureza en base a la microestructura observada en la zona de interés de la flecha.

Tabla 1. Condiciones en el tratamiento de carburizado y temple estudiado.

Etapa	Descripción	T_i (K)	T_f (K)	C_{Cg} (mol/m^3)	t (s)
1	Calentamiento	Ambiente	1200	0	
2	Mantenimiento	1200	1200	6619	10080
3	Mantenimiento	1173	1173	5617	6300
4	Enfriamiento	1173	353	0	

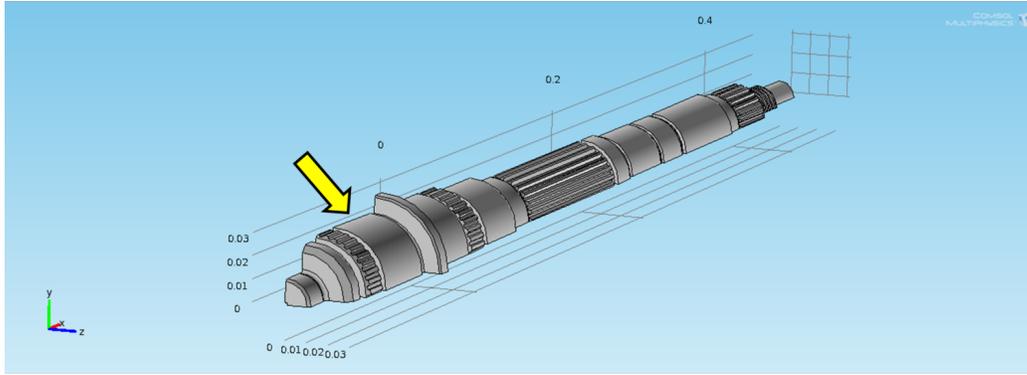


Fig. 1. Dominio de cálculo empleado, de la flecha de transmisión estudiada, para la simulación numérica, mostrando la Zona para medición de dureza superficial y de dureza a profundidad (flecha) (escala en m).

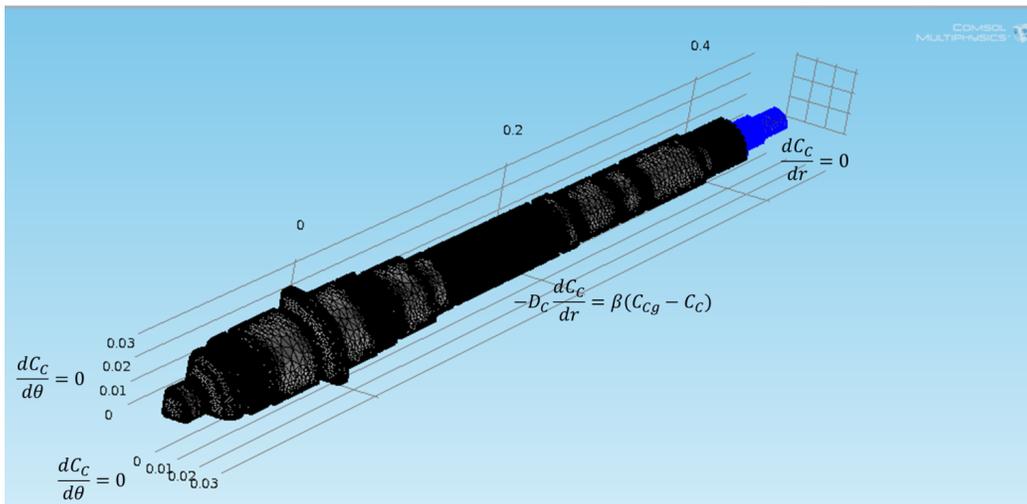


Fig. 2. Condiciones de frontera empleadas en las diferentes etapas simuladas del tratamiento térmico (escala en m).

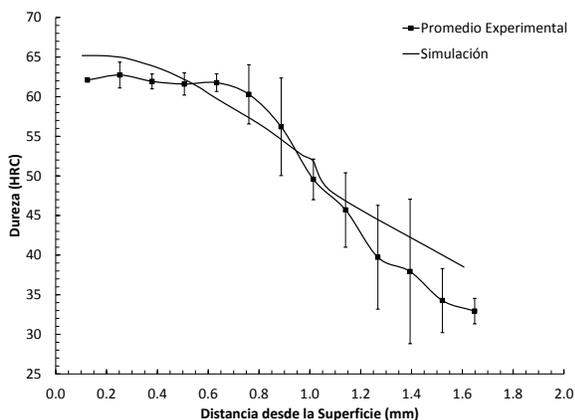


Fig. 3. Promedio de las durezas medidas, con barras de error a $\pm 2\sigma$, y valores obtenidos de la simulación numérica para la posición señalada con una flecha en la Figura 1.

El promedio de tres mediciones de dureza, una por cada flecha para cada distancia desde la superficie, con barras de error ubicadas a $\pm 2\sigma$, y los correspondientes valores obtenidos a partir de la simulación numérica de las etapas mostradas en la Tabla 1, pueden observarse en la Fig. 3, los cuales están graficados contra la posición medida desde la superficie de la pieza tratada.

Como puede observarse en la Fig. 3, existe una buena concordancia entre las mediciones realizadas y los valores obtenidos a partir de la simulación, lo cual permite establecer que la simulación es adecuada para reproducir el tratamiento térmico al que se somete la flecha estudiada. En las distancias cercanas y lejanas a la superficie de la pieza la coincidencia entre las curvas experimental y de simulación no es tan buena como en las posiciones intermedias, lo cual se debe, en el primer caso, a que en la pieza tratada

Tabla 2. Niveles de los parámetros de proceso empleados para la construcción de las combinaciones simuladas.

Nivel	T ₂ (K)	t ₂ (s)	C _{Cg2} (mol/m ³)	T ₃ (K)	t ₃ (s)	C _{Cg3} (mol/m ³)
Bajo (B)	1173	8500	5617	1148	5300	5284
Medio (M)	1200	10080	6619	1173	6300	5617
Alto (A)	1223	11500	7623	1198	7300	5951

Tabla 3. Combinaciones de los parámetros de proceso simuladas y sus correspondientes valores de capa efectiva obtenidos, en unidades de milímetros (mm).

			T ₃	B	M	A	B	M	A	B	M	A
			t ₃	B	A	M	M	B	A	A	M	B
			C _{Cg3}	B	B	B	M	M	M	A	A	A
T ₂	t ₂	C _{Cg2}										
B	B	B	0.755	0.882	0.893	0.853	0.862	0.909	0.863	0.874	0.884	
B	M	M	0.885	0.923	0.988	0.894	0.902	1.044	0.903	0.914	0.923	
B	A	A	0.923	1.054	1.163	0.984	0.989	1.179	0.989	1.043	1.052	
M	B	M	0.905	0.991	1.048	0.913	0.921	1.153	0.922	0.986	0.990	
M	M	A	0.994	1.182	1.197	1.050	1.152	1.211	1.152	1.168	1.180	
M	A	B	0.921	1.048	1.152	0.986	0.989	1.167	0.988	0.993	1.047	
A	B	A	1.055	1.200	1.214	1.161	1.173	1.295	1.173	1.187	1.198	
A	M	B	0.992	1.163	1.225	1.045	1.050	1.244	1.049	1.151	1.161	
A	A	M	1.191	1.299	1.315	1.259	1.270	1.331	1.270	1.285	1.297	

ocurre una ligera decarburación en su superficie, que no se está considerando en el caso de la simulación, mientras que en el segundo caso se debe a que en el criterio que se estableció para la conversión de los datos de concentración que arroja la simulación a valores de dureza, se está sobreestimando el grado de transformación que alcanza la microestructura en esas posiciones alejadas de la superficie. Sin embargo, la zona crítica es aquella que está formada por las posiciones intermedias, ya que es ahí en donde se predice la capa efectiva.

4.2 Optimización de parámetros de tratamiento térmico

Para optimizar el tratamiento térmico que se aplica a la pieza estudiada se recurre a un diseño de experimentos que permita generar datos de simulación, de manera que se pueda obtener la capa efectiva deseada con los valores más favorables de cada uno de los parámetros involucrados en el mismo. Dadas las características del tratamiento térmico, dos etapas con tres variables en cada una de ellas, se genera un diseño 3³ en cada etapa si se ejecuta completo, es decir, 27 combinaciones posibles por cada etapa que, al combinarlas, generarían 729 (= 27 × 27) combinaciones en total, lo que implicaría un tiempo excesivo para generar las respuestas asociadas. Para reducir el total de combinaciones se recurre a un

diseño fraccionado de sólo 9 combinaciones en cada etapa, de modo tal que el total de combinaciones se reduce a 81 (= 9 × 9). La necesidad de estudiar ambas etapas del tratamiento en forma simultánea sugiere que se puede emplear la estrategia de arreglos ortogonales cruzados de Taguchi [Ross (1988)], empleando un arreglo ortogonal L9 como arreglo interno para las variables de la tercera etapa con otro L9 como arreglo externo para las variables de la segunda etapa. Las combinaciones resultantes, en donde la elección de los niveles de las variables de proceso para cada una de las dos etapas se realizó en base a la factibilidad de alcanzar dichas condiciones en el proceso (potencial de carbono y tiempo de permanencia) y a las propiedades físicas del material que se está tratando (temperatura de tratamiento), se muestran en la Tabla 2.

La Tabla 3 muestra las diferentes combinaciones de parámetros de proceso simuladas, de acuerdo al arreglo de Taguchi empleado, así como los valores de capa efectiva obtenidos para cada caso, expresados en unidades de milímetros (mm).

De los resultados mostrados en la Tabla 3 es posible conocer, en primera instancia, qué parámetros de tratamiento son los que tienen mayor influencia sobre la capa efectiva obtenida. Para determinar lo anterior, de los nueve datos de capa efectiva que se tienen para cada combinación del arreglo interno se obtuvo un promedio, el cual se analizó como respuesta

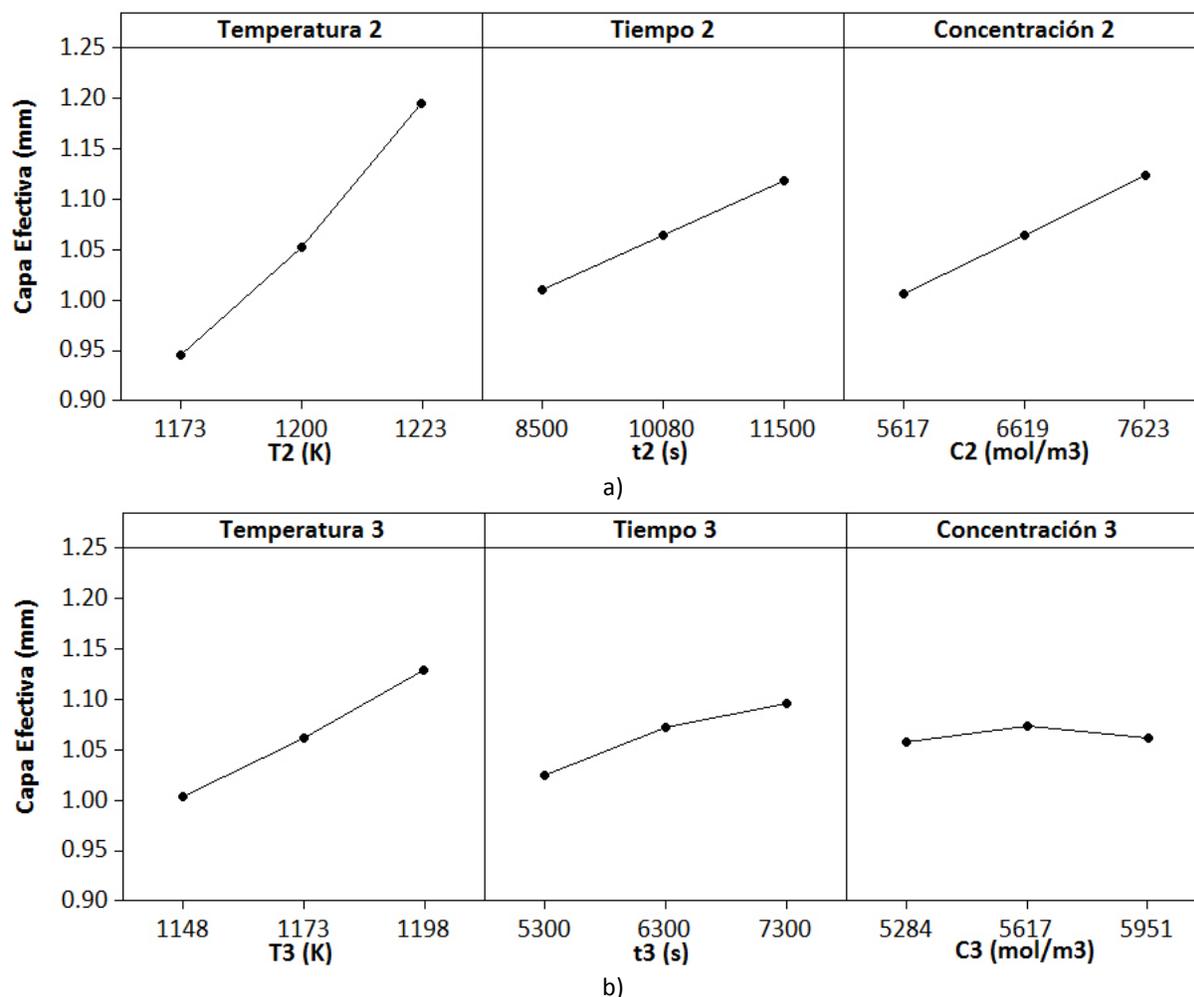


Fig. 4. Gráficos del efecto de cada variable de proceso sobre la capa efectiva calculada.

Tabla 4. Valores candidatos para la optimización del proceso.

T_2 (K)	t_2 (s)	C_{Cg2} (mol/m ³)	T_3 (K)	t_3 (s)	C_{Cg3} (mol/m ³)	Capa Efectiva (mm)
1173	10080	6619	1148	6300	5617	0.894
1173	10080	6619	1173	5300	5617	0.902
1200	8500	6619	1148	5300	5284	0.905
1200	8500	6619	1148	6300	5617	0.913
1200	8500	6619	1173	5300	5617	0.921

por medio del modelo lineal general, indicando que las temperaturas de las dos etapas estudiadas son las variables que mayor efecto tienen sobre la capa efectiva obtenida, como puede observarse en los gráficos de la Fig. 4. El hallazgo anterior difiere de lo reportado para un acero SAE 8620 [Palaniradja y col. (2005)], el cual es parecido al empleado en el

presente trabajo, ya que en aquel estudio se afirma que la variable que mayor efecto tiene sobre la capa efectiva es el tiempo de permanencia en el horno de tratamiento. La discrepancia en las conclusiones reportadas por ambos estudios puede deberse al hecho de que los materiales tratados en ambos casos no son exactamente los mismos, y, también, a que el

tratamiento empleado por aquellos autores es distinto al estudiado en el presente trabajo.

Con la intención de proponer mejoras al tratamiento térmico bajo estudio, de las ochenta y una combinaciones simuladas se seleccionaron aquellas que cumplían con el criterio de capa efectiva requerida y que, además, contemplaban valores de los parámetros de tratamiento de igual o menor magnitud que los que actualmente se emplean; la Tabla 4 muestra los valores elegidos. Cualquiera de las combinaciones mostradas en dicha tabla representa una mejora del tratamiento, dado que se reduce la temperatura y/o el tiempo de una o las dos etapas estudiadas, e incluso el potencial de carbono en la atmósfera carburizante, representando un ahorro en energéticos y materiales, así como de tiempo de procesamiento, sin sacrificar la capa efectiva deseada en las partes tratadas.

Conclusiones

El modelo de simulación generado representa adecuadamente las etapas seleccionadas del tratamiento termoquímico de carburizado y temple de la pieza bajo estudio, como lo muestra la validación realizada contra mediciones de dureza hechas en piezas tratadas.

De los resultados de la simulación numérica de las ochenta y una combinaciones de las variables de tratamiento propuestas, y del análisis estadístico de los mismos, se encontró que las temperaturas de la segunda y tercera etapas del tratamiento térmico son las variables que más impacto tienen sobre la capa efectiva obtenida en la pieza tratada.

La aplicación de un proceso estadístico de optimización del tratamiento resulta complicada, dada la cantidad de variables de tratamiento y la manera en que ellas se relacionan para dar un valor particular de capa efectiva en la pieza tratada, por lo que se optó por la selección de aquellas combinaciones que resultaron más favorables en términos de un ahorro en materiales, energéticos y tiempo de tratamiento, como opciones de mejora para el proceso actualmente en uso, sin sacrificar el valor de capa efectiva requerida, encontrándose que cinco de ellas cumplen con las condiciones requeridas.

De manera general, las propuestas de mejora implicaron una reducción en las temperaturas de tratamiento en las etapas estudiadas, una reducción en los tiempos de tratamiento o, una combinación de reducción en ambos parámetros, lo cual representaría,

en primera instancia, una disminución en el consumo de energéticos, y, en segundo lugar, un ahorro en materiales, tomando en cuenta el consumo de gas carburizante y de partes de reemplazo de los equipos empleados para el tratamiento por pieza tratada.

Agradecimientos

E. Rodríguez-Morales agradece al Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ) por el apoyo otorgado para la realización del presente proyecto, registrado ante la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) con el número PIII-ITQ-003-2011. A.G. Luna-Bustamante agradece la beca concedida mediante el proyecto PIII-ITQ-003-2011 para la realización de tesis de licenciatura, como parte de los trabajos del presente proyecto, durante su permanencia como estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ). Los autores agradecen a la empresa Transmisiones y Equipos Mecánicos, S.A. de C.V. las facilidades otorgadas para la realización de la parte experimental del presente trabajo.

Nomenclatura

C_A	concentración de la especie A que difunde, mol/m ³
C_C	concentración de carbono que difunde, mol/m ³
$C_{C,g}$	potencial de carbono en la atmósfera carburizante, mol/m ³
$C_{C,g,2}$	potencial de carbono en la atmósfera carburizante en la segunda etapa, mol/m ³
$C_{C,g,3}$	potencial de carbono en la atmósfera carburizante en la tercera etapa, mol/m ³
$C_{C,2}$	contenido de carbono en cualquier posición en la pieza que se está tratando en la segunda etapa, mol/m ³
$C_{C,3}$	contenido de carbono en cualquier posición de la pieza que se está tratando en la tercera etapa, mol/m ³
D_A	coeficiente de difusión constante a la temperatura de interés, m ² /s
D_C	coeficiente de difusión de carbono a la temperatura de interés, m ² /s
$D_{C,2}$	coeficiente de difusión de carbono a la temperatura de la segunda etapa, m ² /s
$D_{C,3}$	coeficiente de difusión de carbono a la temperatura de la tercera etapa, m ² /s
D_0	factor pre-exponencial, m ² /s

N_A	flujo molar de la especie A por unidad de área y de tiempo, mol/m ² s
Q	energía de activación, J/mol
R	constante de los gases ideales, J/mol K
t	tiempo de permanencia/tratamiento, s
t_2	tiempo de tratamiento para la segunda etapa, s
$t_{2,f}$	tiempo total de tratamiento para la segunda etapa, s
t_3	tiempo de tratamiento para la tercera etapa, s
T	temperatura a la cual se quiere estimar el coeficiente de difusión, K
T_f	temperatura final de tratamiento, K
T_i	temperatura inicial de tratamiento, K
T_2	temperatura en la segunda etapa, K
T_3	temperatura en la tercera etapa, K
<i>Símbolos griegos</i>	
β	coeficiente constante, m/s
σ	desviación estándar
∇	operador nabla

Referencias

- Boitout F., Dry D., Goorochurn Y., Mourgue P. y Porzner H. (2008). Heat Treatment Simulation - Can Help Avoid Process Problems. *Gear Solutions Julio*, 30-37, 50.
- Cavaliere P., Zavarise G. y Perillo M. (2009); Modeling of the Carburizing and Nitriding Processes. *Computational Materials Science* 46, 26-35.
- Ferguson B. L., Li Z. y Freborg A. M. (2005). Modeling Heat Treatment of Steel Parts. *Computational Materials Science* 34, 274-281.
- Jiménez H., Staia M.H. y Puchi E.S. (1999). Mathematical Modeling of a Carburizing Process of a SAE 8620H Steel. *Surface and Coatings Technology* 120-121, 358-365.
- Kang S.-H. y Im Y.-T. (2007). Finite Element Investigation of Multi-Phase Transformation within Carburized Carbon Steel. *Journal of Materials Processing Technology* 183, 241-248.
- Karabelchtchikova O. (2007). *Fundamentals of Mass Transfer in Gas Carburizing*. Tesis de Doctorado en Filosofía, Worcester Polytechnic Institute, United States of America.
- Khusid B.M., Khusid E.M., Khina B.B. (1995). Optimization of Properties of Carburized High-Chromium Steels. *Journal of Materials Science* 31, 2989-2998.
- Palaniradja K., Alagumurthi N. y Soundararajan V. (2005). Optimization of Process Variables in Gas Carburizing Process: A Taguchi Study with Experimental Investigation on SAE 8620 and AISI 3310 Steels. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences* 29, 279-284.
- Poirier D.R. y Geiger G.H. (1994). *Transport Phenomena in Materials Processing*. The Minerals, Metals & Materials Society, United States of America.
- Ross P. J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill Book Company, United States of America.
- Song G.-S., Liu X.-H., Wang G.-D. y Xu X.-Q. (2007). Numerical Simulation on Carburizing and Quenching of Gear Ring. *Journal of Iron and Steel Research, International* 14, 6, 47-52.
- Sugianto A., Narazaki M., Kogawara M., Shirayori A., Kim S.-Y. y Kubota S. (2009). Numerical Simulation and Experimental Verification of Carburizing-Quenching Process of SCr420H Steel Helical Gear. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 3597-3609.
- Thelning K.-E (1984). *Steel and its Heat Treatment*. Butterworth & Co., Great Britain.
- The Timken Company (2009). *Practical Data for Metallurgists*. United States of America.