

Estudio de la carburización en aceros al carbono mediante herramientas CAE

Study of carburization in carbon steels using CAE tools

Brenda A. Márquez Antonio ^a, Kevin Y. Soto Trejo ^b, Marissa Vargas Ramírez ^c, Daniel Marroquín Olvera ^d, Cesar Y. Becerra Mayorga ^e, Cynthia Aristeo Domínguez ^f

Abstract:

This study presents a comparative analysis of surface hardness and carbon concentration in SAE/AISI 1018 and 1045 steels subjected to solid carburization at 900 °C and 1100 °C for 4 hours. Numerical simulations were carried out in COMSOL Multiphysics using Fick's second law with a constant surface boundary condition (Cs). Experimentally, cubic specimens were carburized, metallographically prepared, and characterized by hardness profiles and scanning electron microscopy (Jeol IT-300). Results showed surface hardness increases of up to 62% for AISI 1018 and 37% for AISI 1045, with greater case depth observed at higher temperature. The carburizing mixture consisted of 81% coal, 3% Na₂CO₃, 12% BaCO₃, and 4% CaCO₃, formulated to optimize the generation of active carbon. Furthermore, a multivariable regression model, Hardness Regression Vickers (HVR), was proposed to predict hardness based on the calculated carbon concentration profiles. The combination of experimental and simulation results highlights the potential of CAE tools for optimizing carburization treatments in low- and medium-carbon steels.

Keywords:

CAE model, Carburization, Carbon steels, COMSOL Multiphysics

Resumen:

En este trabajo se presenta un análisis comparativo entre la dureza superficial y la concentración de carbono obtenidas mediante simulación numérica y pruebas experimentales en los aceros SAE/AISI 1018 y 1045, tratados por carburización sólida a 900 °C y 1100 °C durante 4 horas. La simulación se realizó en COMSOL Multiphysics utilizando la segunda ley de Fick, considerando una condición de frontera constante (Cs) en la superficie del acero. Experimentalmente, las probetas se prepararon metalográficamente y se evaluó la dureza en función de la distancia. También se caracterizó la microestructura con un microscopio electrónico de barrido (Jeol IT-300). Los resultados mostraron incrementos de dureza superficial de hasta 62 % para el acero 1018 y 37 % para el 1045. Se utilizó una mezcla carburante compuesta por 81 % carbón vegetal, 3 % Na₂CO₃, 12 % BaCO₃ y 4 % CaCO₃, diseñada para optimizar la generación de carbono activo. HVR (Hardness Regression Vickers) representa la dureza estimada mediante regresión multivariable basada en las concentraciones de carbono calculadas.

Palabras Clave:

Modelo CAE, carburización, aceros al carbono, COMSOL Multiphysics.

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-1463-5491>, Email: ma447827@uaeh.edu.mx

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0000-6412-8829>, Email: so381450@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5968-6196>, Email: marissav@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0006-0509-4730>, Email: ma169707@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5213-2764>, Email: cesar_becerra@uaeh.edu.mx

^f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-9041-7795>, Email: cynthia_aristeo@uaeh.edu.mx

Introducción

Los aceros al carbono resultan de la aleación entre hierro y carbono, sin la presencia significativa de otros elementos, en las que el carbono actúa como el elemento más relevante de aleación. El contenido de carbono no solo define la clasificación del acero, sino que también desempeña un papel importante en el proceso termoquímico, modificando su microestructura y propiedades. La carburización se destaca como un proceso ampliamente utilizado en la industria, por ejemplo, en engranajes, herramientas de corte, ejes de transmisión, entre otros (Davis, 1998). La carburización es un proceso termoquímico mediante el cual el acero, usualmente en fase austenítica, se expone a un medio rico en carbono en un rango de 871–982 °C. Durante este tratamiento, los átomos de carbono se difunden desde la superficie hacia el interior, originando un gradiente que confiere una capa endurecida mientras el núcleo conserva su ductilidad. Investigaciones han mostrado que temperaturas en el intervalo de 900 a 1100°C resultan particularmente efectivas en aceros AISI 1045, al favorecer la formación martensítica y un incremento notable en la dureza superficial (Wenish, Prince & Maniraj, 2022).

En las últimas décadas, el uso de herramientas de simulación computacional ha permitido modelar y analizar estos procesos con mayor precisión y eficiencia. Los softwares de ingeniería asistida por computadora CAE (Computer-Aided-Engineering), diseñados para resolver fenómenos de transporte de masa, calor y dinámica de fluidos, han demostrado ser de gran utilidad en el modelado y análisis de procesos termoquímicos complejos (Ferziger et al., 2020).

En particular, el software COMSOL Multiphysics ha cobrado relevancia por su capacidad de modelar fenómenos multifísicos mediante la resolución de ecuaciones diferenciales parciales en geometrías bidimensionales y tridimensionales. Esta herramienta permite simular el proceso de carburización, visualizar la evolución temporal y espacial de la concentración de carbono, y estimar la profundidad de la capa carburizada sin la necesidad de realizar múltiples ensayos experimentales (Multiphysics, C. O. M. S. O. L., 1998).

En este estudio se utiliza COMSOL Multiphysics para analizar el proceso de carburización en aceros AISI 1018 y 1045 a temperaturas de 900°C y 1100°C. La temperatura de 900°C ha demostrado que permite que al realizar la carburación se obtenga la combinación de propiedades óptimas en aceros de bajo carbono

(Aramide et al., 2009). También se desarrolló la carburación a 1100°C para obtener una dureza intermedia, no llegando a la dureza máxima obtenida a 1200°C (Wenish et al., 2022). El objetivo principal es modelar la difusión de carbono en ambos materiales y evaluar la influencia del tipo de acero y la temperatura sobre la difusión de carbono, con el fin de proporcionar una herramienta predictiva útil para el diseño y la optimización de este proceso termoquímico.

Procedimiento experimental

Materiales

Se emplearon muestras metálicas de aceros al carbono SAE/AISI 1018 y 1045, cuyas composiciones químicas fueron verificadas mediante espectrómetro de chispa SPECTRCHECK, Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de los aceros SAE/AISI1018 y 1045 (en % peso, balance Fe).

SAE/AISI	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
1018	0.203	0.174	0.75	0.088	0.044	0.110	0.146	0.235
1045	0.51	0.251	0.71	0.06	0.034	0.102	0.130	0.262

En este trabajo no se evaluó el efecto de la composición de la mezcla carburante, ya que su formulación se empleó únicamente para garantizar un suministro adecuado y constante de carbono al material durante el tratamiento. Para el proceso termoquímico de carburización se utilizaron cajas cilíndricas metálicas selladas herméticamente con cemento refractario, como se muestra en la Figura 1, con el fin de evitar la entrada de oxígeno y minimizar la oxidación durante el tratamiento.

La mezcla carburante utilizada estuvo compuesta por:

- 81 % de carbón vegetal
- 3 % de carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- 12 % de carbonato de bario (BaCO_3)
- 4 % de carbonato de calcio (CaCO_3)

Esta composición se seleccionó porque el carbón vegetal actúa como principal fuente de carbono; el carbonato de sodio favorece la reactividad del medio al aumentar la movilidad iónica; el carbonato de bario estabiliza el potencial carburante y contribuye a la formación de una capa más uniforme; y el carbonato de calcio ayuda a regular la porosidad de la mezcla y a evitar la compactación excesiva durante el tratamiento (ASM Handbook, Vol. 4, 1995; Totten & Howes, Steel Heat Treatment Handbook, 2018).

Proceso termoquímico

El tratamiento termoquímico se realizó en una mufla marca Marla, modelo J-01. Se prepararon probetas cúbicas de $\frac{1}{2}$ pulgada (0.0127 m) de lado, obtenidas a partir de aceros comerciales SAE/AISI 1018 y 1045. Para cada condición de tratamiento (900 °C y 1100 °C), se ensayaron tres muestras, manteniéndose un tiempo fijo de exposición de 4 horas.

Las probetas se colocaron centradas dentro de la caja cilíndrica metálica, completamente rodeadas por la mezcla carburante, la caja metálica se colocó dentro de la mufla para realizar el tratamiento, Figura 1.



Figura 1. Proceso termoquímico de carburización

Análisis microestructural

Posterior al tratamiento las piezas fueron encapsuladas en resina epoxica marca Buehler Epo-kwick fast cure epoxy, después del secado total las piezas fueron pulidas con lijas de agua de carburo de silicio, de grano grueso (60 y 80), medio (100, 120, 220 y 280), fino (320, 360, 400 y 600) y de grano extrafino (800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500 y 3000) hasta llegar al grado espejo.

Posteriormente se realizó un ataque químico con nital al 4% durante 2 minutos para la revelación de su microestructura, las muestras base también fueron pulidas y atacadas para realizar la comparación.

Dureza

La dureza inicial de las probetas fue determinada utilizando un durómetro analógico modelo MICROMET 2100 de la marca Buehler, bajo una carga de 5 kgf. Posterior al tratamiento todas las muestras se sometieron a prueba de dureza utilizando nuevamente el durómetro comenzando desde el borde de la pieza y avanzando hacia el centro. Inicialmente se hicieron 10 indentaciones con una separación de 0.008 pulgadas, seguidas de 13 indentaciones adicionales espaciadas a 0.015 pulgadas bajo una carga de 5 kgf, esta forma de distribuir las

pruebas se eligió para observar con más detalle lo que ocurre en el borde y su comportamiento tras el tratamiento.

Simulación

Para la simulación computacional se utilizó el software COMSOL Multiphysics v5.1, empleando el módulo de transferencia de masa por difusión en régimen transitorio.

Se utilizó una geometría bidimensional, con malla triangular de 590 elementos. Se aplicó una condición de frontera de concentración constante (C_s) en una cara, y condiciones aisladas en las demás. Se modeló la difusión de carbono durante 4 horas, considerando parámetros correspondientes a la fase austenítica.

Resultados y discusión

Análisis microestructural

En la Figura 2 se presentan las metalografías de las muestras, en donde se determina la longitud de la capa carburada (X_{EXP}), a partir de la medición promedio manual de 45 longitudes.

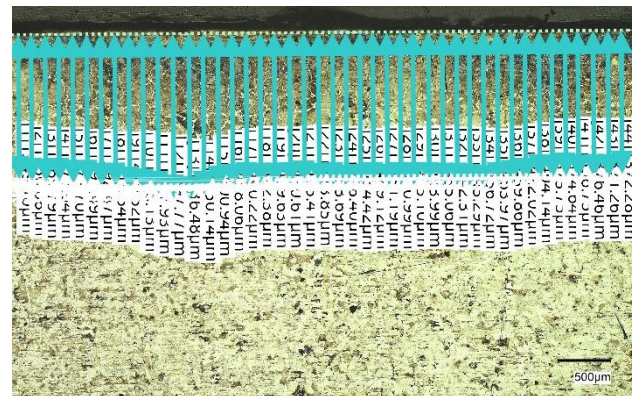


Figura 2. Metalografía de 1018 a 900°C, obtenida con el microscopio digital VHX-7000 KEYENCE (50X).

Dureza

En la Figura 3, se muestran las indentaciones separadas por una distancia de 8 milésimas de pulgada.



Figura 3: Indentaciones del acero 1018 a 1100°C (250X), con el microscopio digital VHX-7000 KEYENCE

Tabla 2. Dureza posterior al tratamiento utilizando un durómetro analógico modelo MICROMET 2100

Identación	Acero 1018 a 900 °C	Acero 1045 a 900 °C	Acero 1018 a 1100 °C	Acero 1045 a 1100 °C
1	259.57	259.57	-	249.50
2	258.80	258.80	230.25	230.47
3	208.90	208.90	215.75	231.00
4	210.70	210.70	196.40	226.35
5	184.30	184.30	192.70	210.70
6	179.50	179.50	188.30	210.20
7	168.37	168.37	178.20	193.70
8	160.95	160.95	166.10	193.35
9	153.93	153.93	153.50	183.63
10	153.20	0.00	152.20	180.17
11	157.10	157.10	142.10	174.43
12	150.20	150.20	155.50	160.47
13	151.20	151.20	136.10	160.40
14	140.50	140.50	142.50	150.80
15	146.40	146.40	132.15	153.50
16	150.43	150.43	144.20	155.20
17	143.03	143.03	132.00	142.30
18	154.77	154.77	135.50	149.25
19	152.35	152.35	130.70	150.85
20	155.83	155.83	131.00	156.57
21	151.17	151.17	134.93	144.90
22	138.20	138.20	126.55	151.87

Simulación

La carburación es un proceso termoquímico en el cual el carbono se difunde dentro del acero y se describe con la segunda ley Fick, Ley de difusión.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

La solución de esta ecuación es:

$$\frac{C-C_0}{C_s-C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (2)$$

Donde:

C es la concentración de carbono en la posición x (cm) en el tiempo t (s).

C₀ es la concentración inicial contenida en el acero.

C_s es la concentración en la superficie del acero (es el máximo valor soluble de carbono en la fase γ a la temperatura del proceso), y se puede considerar constante, siempre que la pieza sea lo suficientemente gruesa en comparación con la profundidad de la capa difundida, siendo menor o igual a $5Dt$.

D es el coeficiente de difusión promedio del carbono en austenita en cm^2/s . (Lyman, T. 1973; Donald, R. A. 2017)

$$D = 0.12 \exp\left(\frac{-32000}{RT}\right) \quad (3)$$

T es la temperatura en $^{\circ}\text{K}$.

R es la constante de los gases de 1.987 cal/mol K .

Tratando al sólido como una longitud semi-infinita, considerando que antes de la difusión la C_0 es uniforme, el valor de x en la superficie es cero y el tiempo se toma como cero al instante antes de la difusión y de la temperatura del proceso.

De la ecuación 2, la expresión $\operatorname{erf}[x/(2\sqrt{Dt})]$ tiende a 1 para obtener $C_s=C_0$. El valor de la expresión $z=x/(2\sqrt{Dt})$ se considera constante y se encuentra entre 1 y 5, obteniendo el valor correspondiente de $\operatorname{erf}[z]$ entre 0.8427 y 0.9996.

De la expresión $z=x/(2\sqrt{Dt})$ se puede obtener la expresión $x=k\sqrt{t}$ donde k es el factor de carburización en la expresión $k=2z\sqrt{D}$.

En este proyecto se trabajó con temperaturas de 900°C y 1100°C a 4 horas de proceso, obteniendo en la Tabla 3 el valor de k , Z y x , en donde se observa que el valor de Z para 900°C concuerda con el valor obtenido por (Li, M., 2016) de 0.021 en $\text{in}/\text{h}^{0.5}$.

Aplicando el software COMSOL, se utilizó el módulo de transferencia de masa por difusión en régimen transitorio con un periodo de 4hrs, aplicando una geometría en 2D de un cuadrado de 0.0127 m (1/2"), con un mallado triangular de 590 puntos, Figura 4. Como condición de superficie se le proporciona el valor de D y Co, como condición limite se considera un solo lado la Cs, obteniendo la distribución de C con respecto a x y el tiempo, Figura 5.

Tabla 3. Cálculo de la capa de carburización (x) para 900 y 1100 °C de tratamiento a 4 horas.

T (°C)	Acero SAE	X _{Dureza} (cm)	X _{Exp} (cm)	K cm/ \sqrt{s}	Z	Erf(Z)
900	1018	0.133	0.1098	9.15E-4	1.11	0.883
900	1045	0.142	0.1052	8.77E-4	1.06	0.867
1100	1018	0.080	0.1452	1.21E-3	0.52	0.542
1100	1045	0.153	0.1661	1.38E-3	0.60	0.604

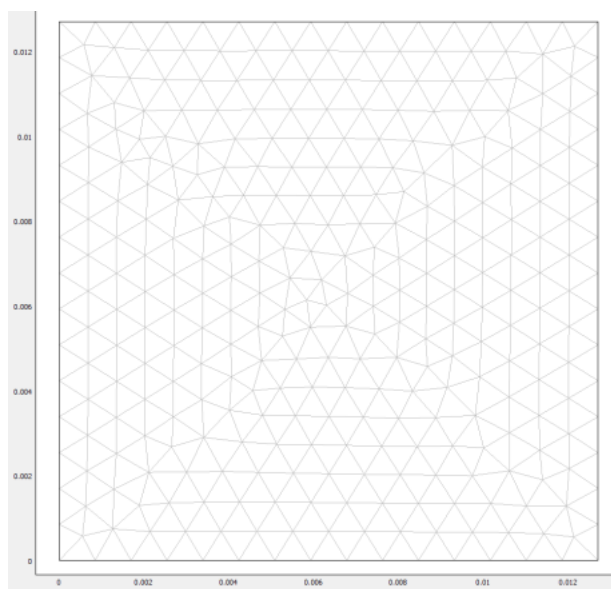


Figura 4: Malla de la geometría en 2D con 590 elementos.

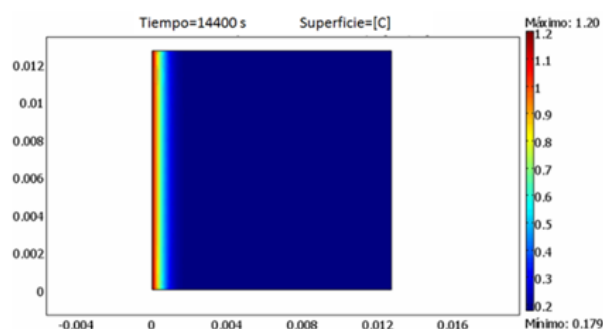


Figura 5: Distribución de concentración calculada con COMSOL, pieza 1018 modelado a 900°C, Cs=1.2.

Análisis

En las Figuras 6 y 7 se presenta el comportamiento de la dureza desde $x=0$ mm hacia el centro de la probeta, para los aceros 1018 y 1045 respectivamente, comparando su dureza sin y con el proceso de carburación a 900°C y a 1100°C, donde se observa el aumento de la dureza superficial de las probetas de hasta un de hasta 62 % para el acero 1018 y 37 % para el 1045.

Es de notar que la dureza alcanza un máximo en la superficie, disminuyendo gradualmente hacia el centro de la probeta. Esta reducción se debe a que la carburización es un proceso de difusión superficial: el carbono, elemento responsable del endurecimiento por formación de cementita, se concentra en las capas externas, pero el contenido disminuye conforme aumenta la distancia desde la superficie (Ballem et al., 2023).

Este fenómeno es más evidente en el acero 1018 cuyo bajo contenido de carbono y aleación lo hace menos sensible al endurecimiento profundo, y más propenso a suavizarse si no se controla adecuadamente el proceso. (Totten, G.E., Howes, M.A.H., & Inoue, T. 2002)

Según Davis (1995), el tratamiento de carburización sin un paso de temple, particularmente en aceros de bajo carbono, puede ocurrir una pérdida de dureza debido a la relajación de las tensiones residuales y la transformación a estructuras de grano grueso.

Para el acero 1018 se observa que la dureza es igual para los tres casos, a una distancia $x=1.12$ mm, después de esta distancia los valores de los procesos disminuyen con respecto al valor inicial del material.

Para el acero 1045 se observa que la dureza en el proceso a 900°C $x=0.84$ mm, para 110°C $x=1.8$ mm, después de estas distancias los valores de las durezas disminuyen con respecto al valor inicial del material, esto debido a la eliminación de tensiones internas al haber hecho el proceso por encima de la temperatura de transformación crítica superior, generando una pieza con una mayor tenacidad en comparación del acero base.

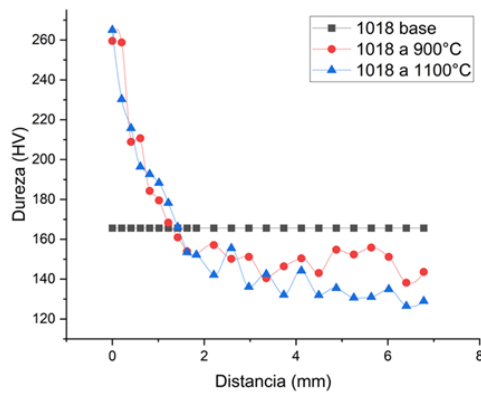


Figura 6. Gráfica de dureza del acero 1018 con y sin carburación. Fuente: Elaboración propia.

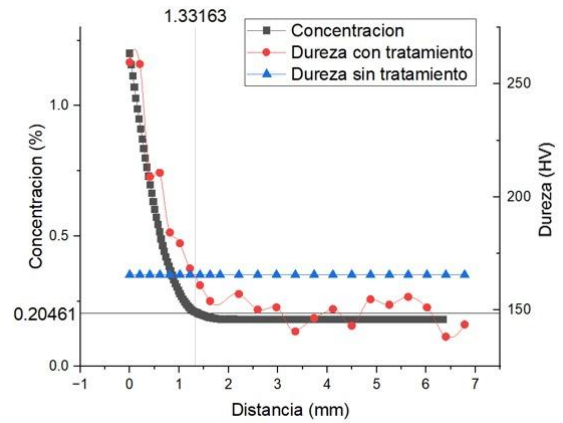


Figura 8. Comparación dureza y concentración del acero 1018 a 900°C. Fuente: Elaboración propia.

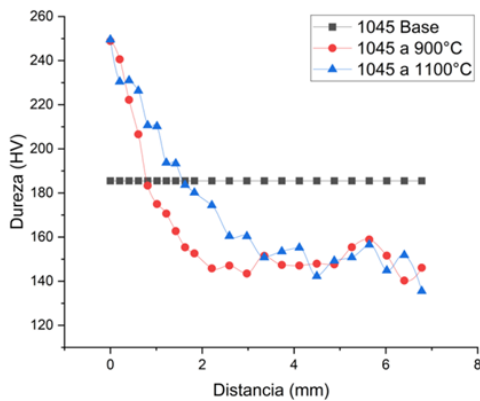


Figura 7. Gráfica de dureza del acero 1045 con y sin carburación. Fuente: Elaboración propia.

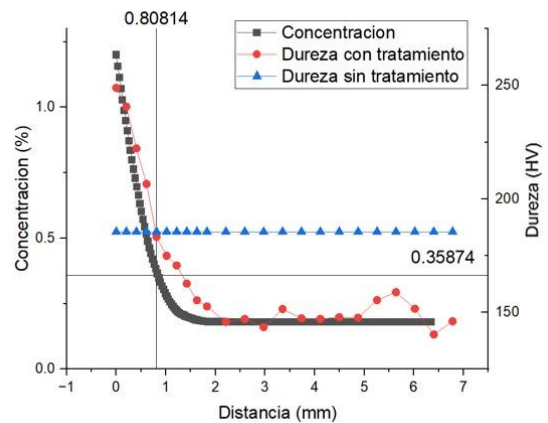


Figura 9. Gráfica de dureza contra concentración del acero 1045 a 900°C. Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 8 a 11 se presenta la evolución del perfil de concentración de carbono a lo largo de la probeta para los aceros 1018 y 1045, a 900 °C y 1100 °C. De acuerdo con la simulación en COMSOL Multiphysics, ecuación (2), se observa que la concentración de carbono en el interior de la pieza tiende al valor inicial (C_0).

En estado sin tratamiento, el acero presenta un contenido de carbono (C_0) homogéneo en toda la sección. Por ejemplo, el acero 1018 tiene típicamente 0.18 % C distribuido uniformemente.

En la Figura 8-11 se presenta la comparación de la distribución de la dureza con respecto al perfil de concentración de carbono en la probeta. En las siguientes gráficas se comparan los valores de dureza obtenidos con las concentraciones previstas por el software en los cuatro experimentos realizados de los dos aceros 1018 y 1045 y las dos temperaturas de 900°C y 1100°C por 4 horas.

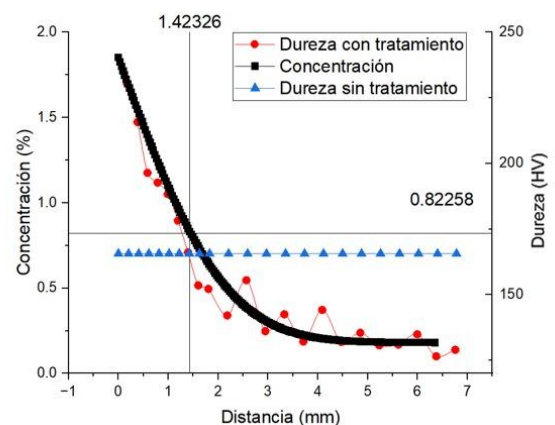


Figura 10. Gráfica de dureza contra concentración del acero 1018 a 1100°C. Fuente: Elaboración propia.

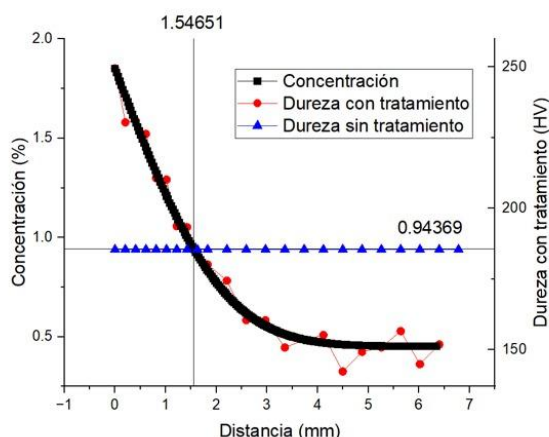


Figura 11. Gráfica de dureza contra concentración del acero 1045 a 1100°C. Fuente: Elaboración propia.

La dureza obtenida experimentalmente valida el cálculo obtenido por el software al ver la correlación en las tendencias en los valores experimentales y los generados por el programa.

Realizando regresión lineal multivariable se obtiene la siguiente tabla de compendio de expresiones.

Expresión de Dureza (HRV) en función de x_{EXP} (cm) y la distribución de concentración de carbono, [C], calculado por la segunda ley de Fick, Tabla 4.

Tabla 4. Expresiones de Dureza (HRV) para la serie experimental de carburización para 900 y 1100 °C de los aceros 1018 y 1045, tratamiento a 4 horas.

T (°C)	Acero SAE	HRV	R ²
900	1018	$-2.7312x + 107.3062[C] + 143.583$	0.88698
900	1045	$-2.5287x + 134.676[C] + 101.446$	0.88055
1100	1018	$1.8364x + 64.6134[C] + 112.9375$	0.91065
1100	1045	$-1.4047x + 65.4109[C] + 157.0226$	0.92590

La expresión de dureza calculada con las series experimentales, considerando la influencia de la temperatura es:

$$HRV = -4.39111x - 0.09538T + 58.797977[C] + 267.851193$$

con una $R^2 = 0.83241532$.

Cabe señalar que la expresión multivariable desarrollada para predecir la dureza fue obtenida a partir de ensayos realizados con un tiempo fijo de 4 horas. Por lo tanto, su validez está limitada a condiciones experimentales similares.

Conclusiones

En la carburización de los aceros 1018 y 1045 a 900°C y a 1100°C se determinó.

La X_{EXP} con la metalografía a 50X con un valor de 0.08 a 0.1661 cm, con un valor de $Erf(Z)$ de 0.542 a 0.883 obteniendo mejores resultados para el acero 1018.

La profundidad de endurecimiento X_{Dureza} se estimó gráficamente como el punto donde la dureza del material carburante iguala dureza del material base.

También se calculó el valor de Z observando que para el proceso termoquímico a 900°C tiene un valor alrededor de 1 siendo adecuado, ya que este debe oscilar entre 1 a 5.

Para 1100°C el valor de Z es menos de 1 para lo cual se comprueba que el proceso de carburización no es adecuado a esta temperatura.

Después del proceso de carburización a 900 y 1100°C se presenta incremento en la dureza del 62% para el 1018 y del 37% para el 1045 en la superficie de la probeta.

Se determinó el perfil de concentraciones de la capa carburada con el software COMSOL, relacionando las variables independientes tales como la concentración de carbono, la longitud X, la temperatura y la variable dependiente la distribución de dureza se aplicó la regresión lineal multivariable obteniéndose expresiones de Dureza (HRV), para cada proceso termoquímico con una R^2 promedio del 0.9, y una expresión general con una R^2 del 0.83.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) Agradezco también al personal técnico de la UAEH por el acceso a laboratorios y orientación académica durante el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Aramide, F. O., Ibitoye, S. A., Oladele, I. O., & Borode, J. O., (2009). Effects of carburization time and temperature on the mechanical properties of carburized mild steel, using activated carbon as carburizer. Materials Research 12, 483–487. DOI: 10.1590/s1516-14392009000400018

- Ballem, M. A., Aldarwish, M. M., Aljuroushi, A. S., Shaka, A. M., & Abdulbakee, A. M. (2023). Effect of Carburizing Temperature and Post Carburizing Treatments on Microhardness and Microstructural Evolution of Carburized Low-Carbon Steel. *Journal of Pure & Applied Sciences*, 22(2), 68–72. <https://doi.org/10.51984/jopas.v22i2.2788>
- Davis, J. R. (2ndEd.), (1998). *Metals handbook desk edition*. ASM International, Materials Park, OH, Ch. Effect of Residual Elements on Steel Properties, pp. 358–359.
- Davis, J. R. (Ed.). (1995). *ASM Metals Handbook (Vol.4:Heat Treating)n*. ASM International, Sección: Effect of treating on mechanical properties, pp. 124–128.
- Donald, R. A., Pradeep, P. P., & Wendelin, J. W. (2017). *Science and engineering of materials*. Cengage learning
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). *Computational methods for fluid dynamics (Fourth Edition)*. springer. Pp. v-vii
- Goldstein, J. I., & Moren, A. E., (1978). Diffusion modeling of the carburization process. *Metallurgical Transactions A* 9, 1519–1530. DOI: 10.1007/BF02661810
- Li, M., (2016). Practical approach to determining effective case depth of gas carburizing. *GearTechnology* 2, 56–61.
- Lyman, T. (1973). *Metals handbook*. Vol. 8, Metallography, structures and phase diagrams
- Multiphysics, C. O. M. S. O. L. (1998). *Comsol Multiphysics reference manual*. 5.5, COMSOL.
- Totten, G.E. and Howes, M.A.H. and Inoue, T., *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, 2002, ASM International, https://books.google.com.mx/books?id=_a9UEHk4cOwC
- Wenish, G. D., Prince, M., & Maniraj, J. (2022). Characterization of induction hardened and tempered AISI 1045 steel. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 27(04), e20220170. https://www.researchgate.net/publication/366044842_Characterization_of_induction_hardenado_tempered_AISI_1045_steel/citations