



# Title: Cálculo de la energía de activación de la difusión de boro en la capa de Fe2B en la borurización por empaquetamiento de los aceros SAE 1050 y DIN UC I

Author: MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced

Editorial label ECORFAN: 607-8695  
BCONIMI Control Number: 2019-013  
BCONIMI Classification (2019): 050319-0013

Pages: 36  
RNA: 03-2010-032610115700-14

### ECORFAN-México, S.C.

143 – 50 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: contacto@ecorfan.org  
Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

### Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

# **INTRODUCCIÓN**

**1. MARCO DE REFERENCIA**

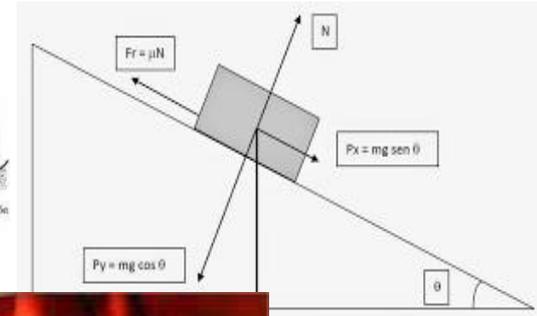
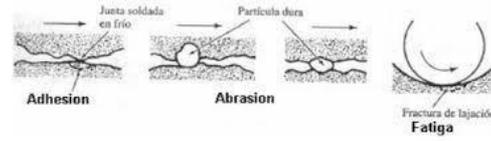
**2. MARCO TEÓRICO**

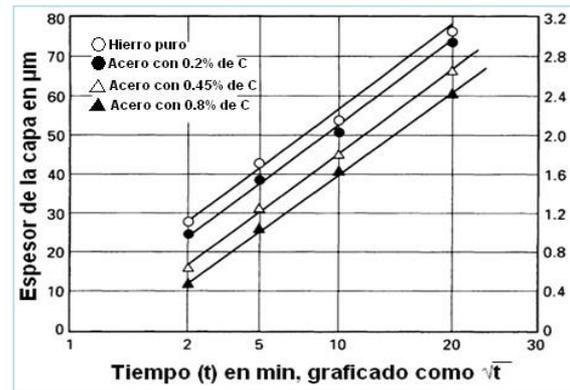
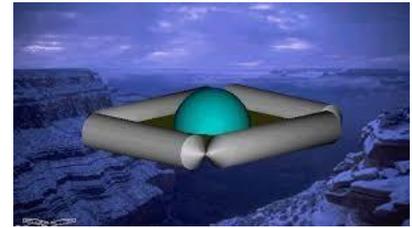
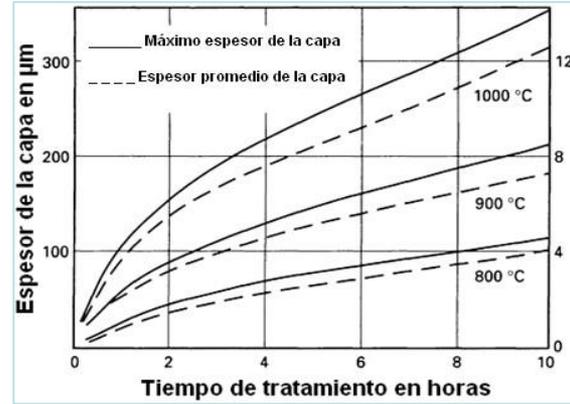
**3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

**4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**CONCLUSIONES**

# Introducción





# 1. Marco de referencia

---

En 2006 Béjar y Moreno<sup>[1]</sup>

---

Realizaron un proceso de borurización en aceros SAE-AISI 1020, 1045, 4140 y 4340

---

Emplearon una mezcla de bórax y carburo de silicio a 1273 K

---

La capa de boruro monofásica ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) mostró una mejor resistencia al desgaste abrasivo y una dureza arriba de 2000 HV

[1] M. A. Bejar y E. Moreno, *Journal of Materials Processing*, vol. 173, pp. 352-358, 2006.

# En el 2011, Kartal y colaboradores<sup>[2]</sup>

Realizaron el proceso de borurizado en un **acero AISI 1018**

En una mezcla de **90% de bórax y 10% de carbonato de sodio** a **900, 950 y 1000°C**, durante un periodo de tiempo de **5 -120 minutos**

Obtuvieron una energía de activación de **172.75 kJmol<sup>-1</sup>**

2013, Xie y colaboradores [3]

Realizaron un proceso de borurizado en **aceros con 0.45% y 0.2% C**

En una mezcla de **5% y 10%** de una aleación maestra de Fe-B, **5%** de tetrafluoroborato de potasio ( $\text{KBF}_4$ ), **2%** de carbono y el balance de carburo de silicio ( $\text{SiC}$ )

El tratamiento fue realizado por empaquetamiento en un horno de corriente alterna a 50Hz y una corriente de 4A, a una temperatura de **800°C durante 4h**

Obtuvieron espesores de la **capa de 0 a 120  $\mu\text{m}$**

2014  
Keddam y  
colaboradores  
[4]



Simulación de la  
cinética de  
crecimiento de la  
capa de boruro



Sustrato de  
hierro  
Armco®



800-1000°C  
durante 60 a  
240 minutos

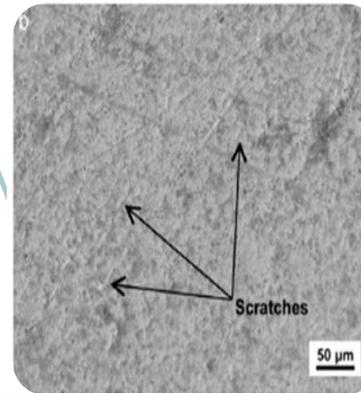
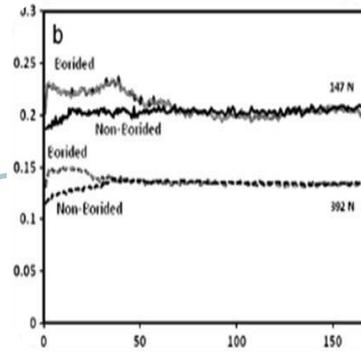
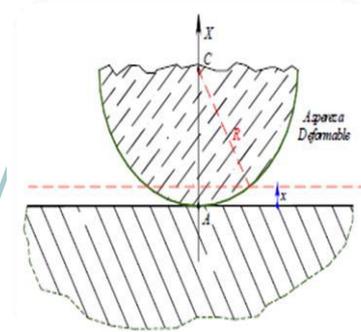
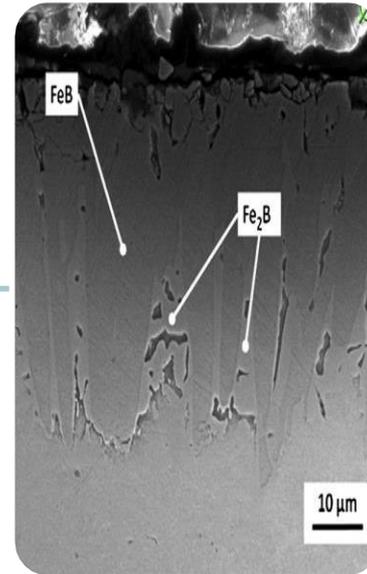
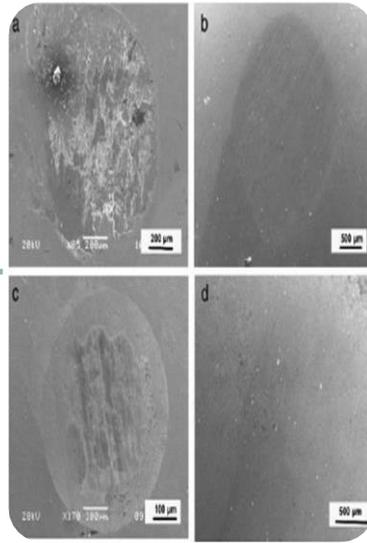
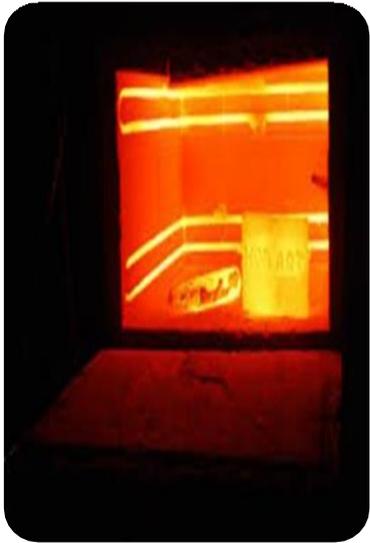


C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Fe
0.035	0.20	0.22	0.10	0.025	0.025	0.12	0.10	Balance

$$Q_{\text{FeB}} = 78.08 \text{ kJmol}^{-1}$$

$$Q_{\text{Fe}_2\text{B}} = 120.65 \text{ kJmol}^{-1}$$

# Planteamiento del problema



[5] O. Asi, A. Ç. Can, P. J. b y M. Belassel, *Surface & Coatings Technology*, vol. 201, pp. 5979-5987, 2007.  
 [6] Z. Y. Huang, W. Danièle, Q. W. Wang y B. Claude, *Materials Science & Engineering*, vol. A559, pp. 790-797, 2013.  
 [7] C. Li, Q. He, W. Tanga y F. Lua, *Surface & Coatings Technology*, vol. 187, pp. 1-5, 2004.  
 [8] Sadik Ü. B and Atik E., *Materials and Design*, vol. 31, pp. 2690-2696, 2010.

# Objetivos

- Aplicar el tratamiento termoquímico de borurización a un acero DIN UC1, mediante la técnica de empaquetamiento en medio sólido, a las temperaturas de 1073, 1173, 1223 y 1273 K, y tiempos de 1.5, 2, 3, 3.5 y 4 horas por cada temperatura para la formación de boruros de hierro.
- Caracterizar los sustratos borurados de acero DIN UC1; determinando su espesor mediante microscopia óptica (MO), y para la determinación de las fases cristalinas presentes se aplicará Difracción de Rayos X (DRX).

# 2. Marco teórico

## Aceros de medio carbono

Los aceros de **medio de carbono** contienen de **0.20 a 0.50 % de C** y representan la mayor parte de la producción de acero. La composición típica del acero SAE1005 y acero DIN UC1 se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química de los aceros SAE 1005 y DIN UC1 (% peso)

Acero	C	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	Al	Mo	S	Fe
SAE 1005	0.036	0.57	0.19	0.014	0.03	0.031	0.001	0.005	0.008	Balance
DIN UC1	0.53	0.74	0.30	0.20	0.21	0.082	0.024	0.018	0.008	Balance

# Tratamientos termoquímicos

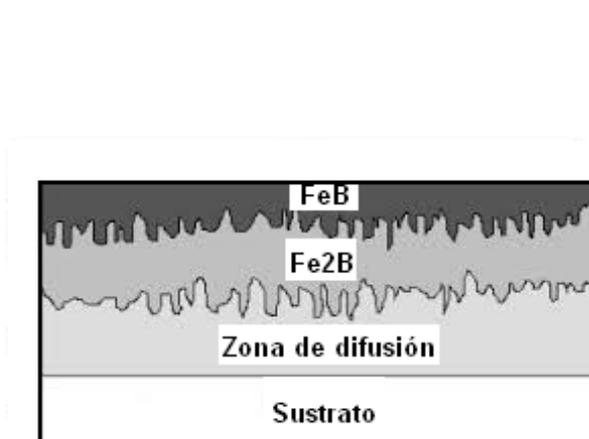
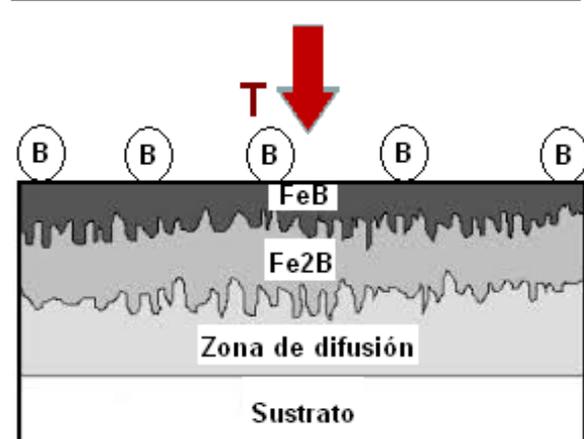
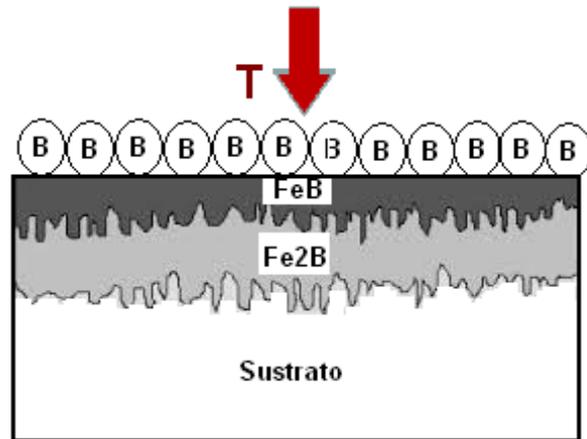
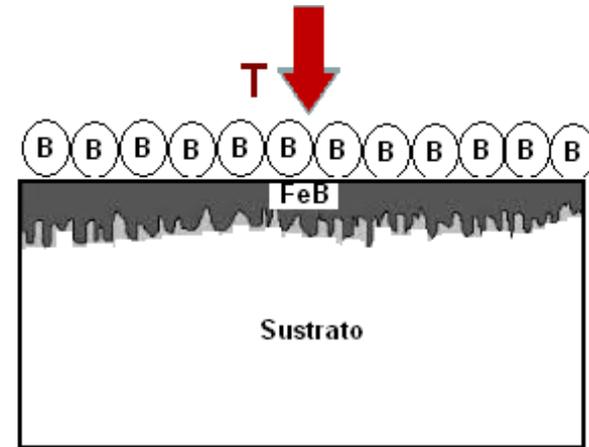
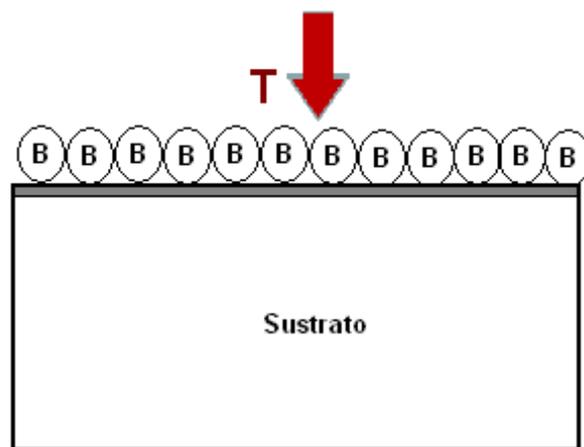
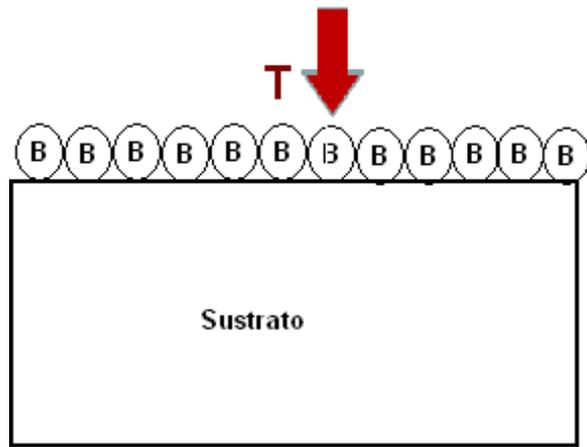
Existen dos métodos para el endurecimiento superficial [9]:

- Los que implican una acumulación intencional, o sea, la adición de una nueva capa.
- Los que modifican la superficie sin ninguna acumulación intencional o aumento en las dimensiones de la pieza.

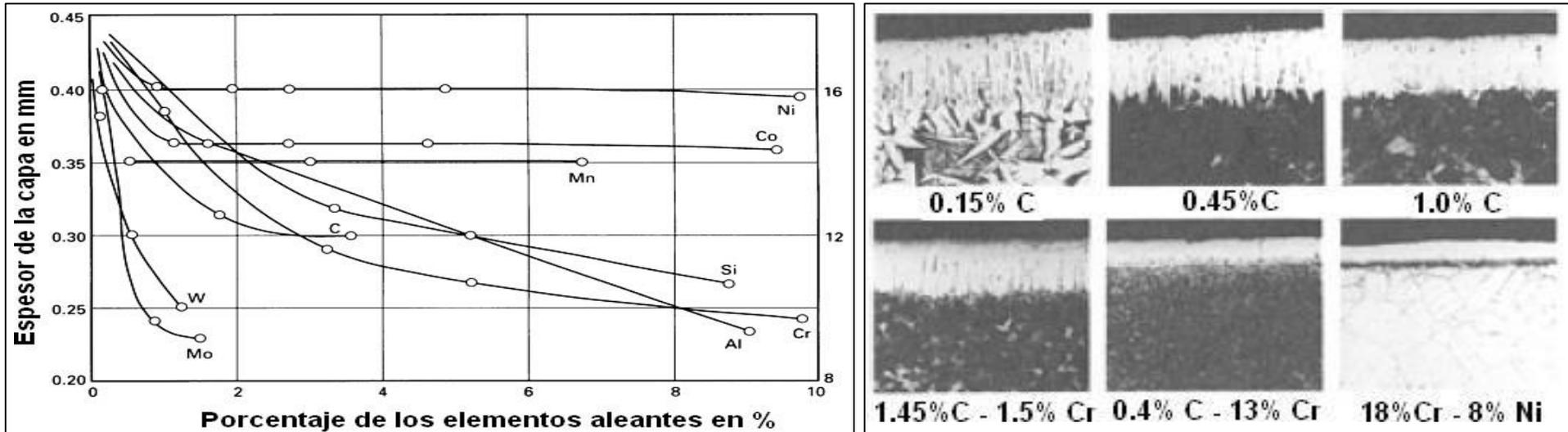
# Importancia de la borurización

La borurización es un proceso de endurecimiento superficial termoquímico<sup>[12]</sup> que consiste en calentar el material entre 700 a 1000°C, durante 1 a 12 horas (h), en contacto con un polvo sólido, una pasta, un líquido o un gas rico en boro. La zona de difusión resultante se caracteriza por su bajo coeficiente de fricción y su alta dureza superficial que puede llegar a valores de 1800 HV.

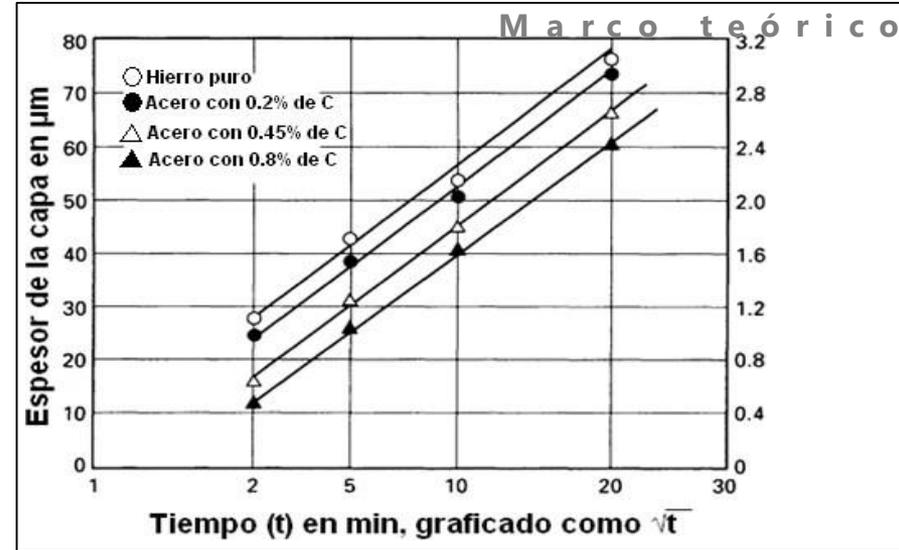
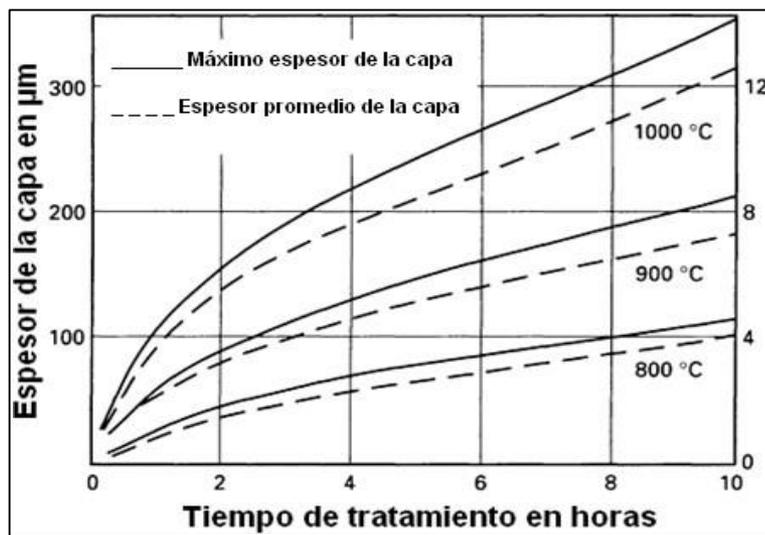
[12] O. Ozbek, S. Sena, M. Ipek, C. Bindal, S. Zeytin y A. H. Ucisik, *Vacuum*, vol. 73, pp. 643-648, 2004.



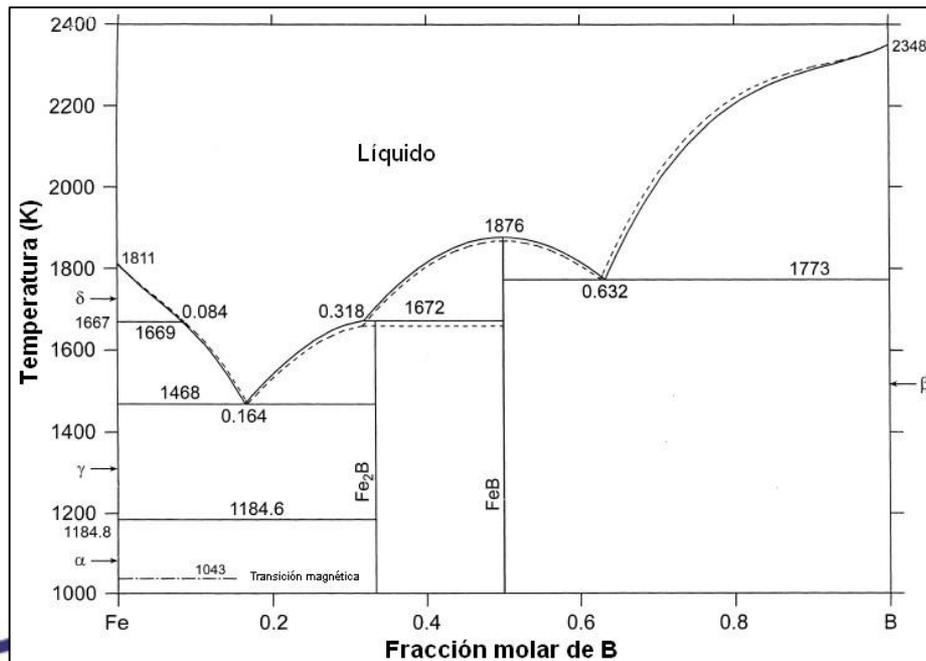
# Influencia de elementos de aleación en la formación de las capas de boruro



**Figura 1.** Efecto de la composición del acero en la morfología y espesor de la capa de boruro [12]

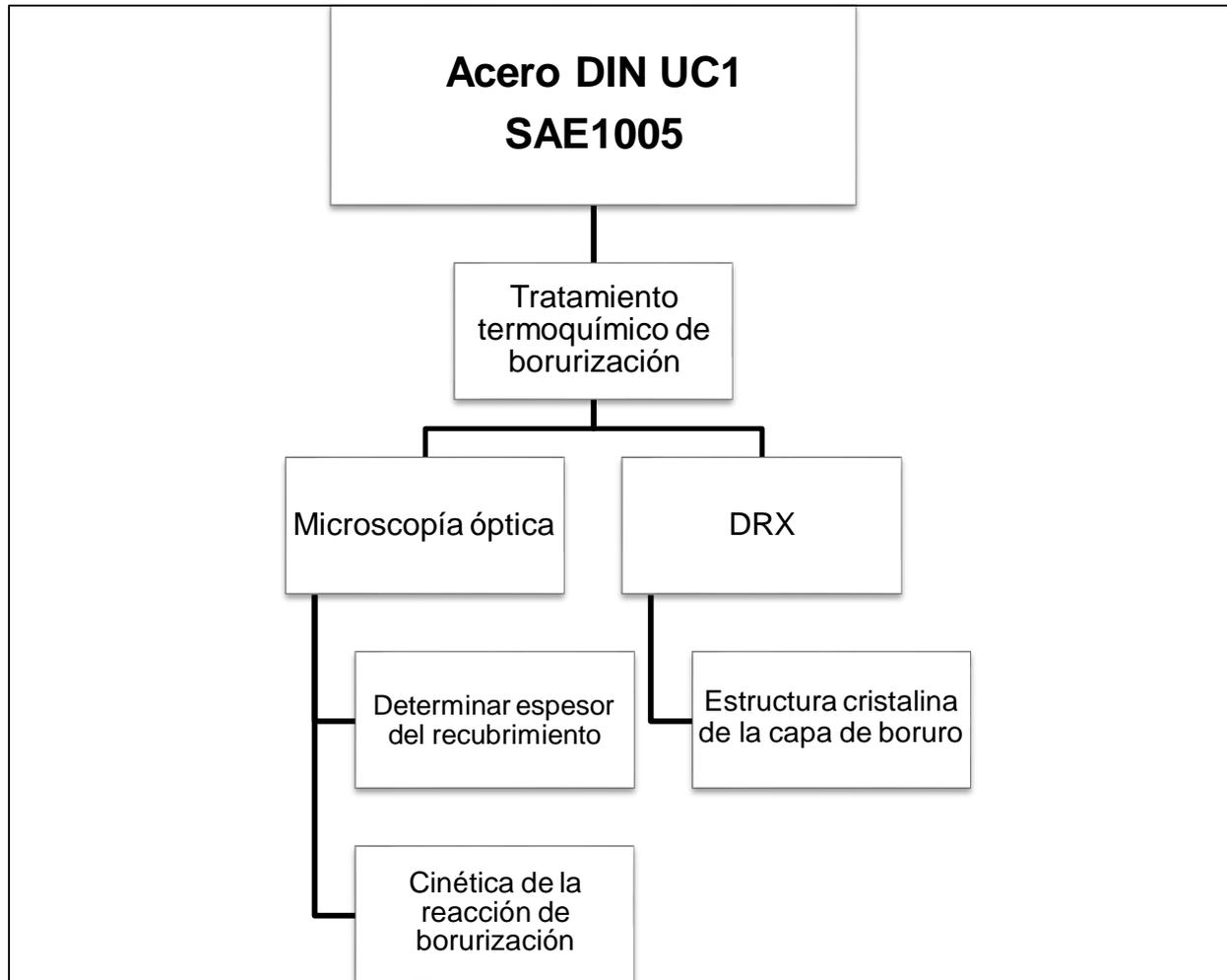


**Figura 2.** Efecto de la temperatura y el tiempo en el espesor de la capa de boruro



**Figura 3.** Diagrama de fases del boruro de hierro

# Capítulo 4. Metodología experimental



**Figura 8.** Diagrama de flujo experimental para el acero SAE 1005

# Capítulo 5. Resultados y discusión

## I. Borurización del acero SAE 1005

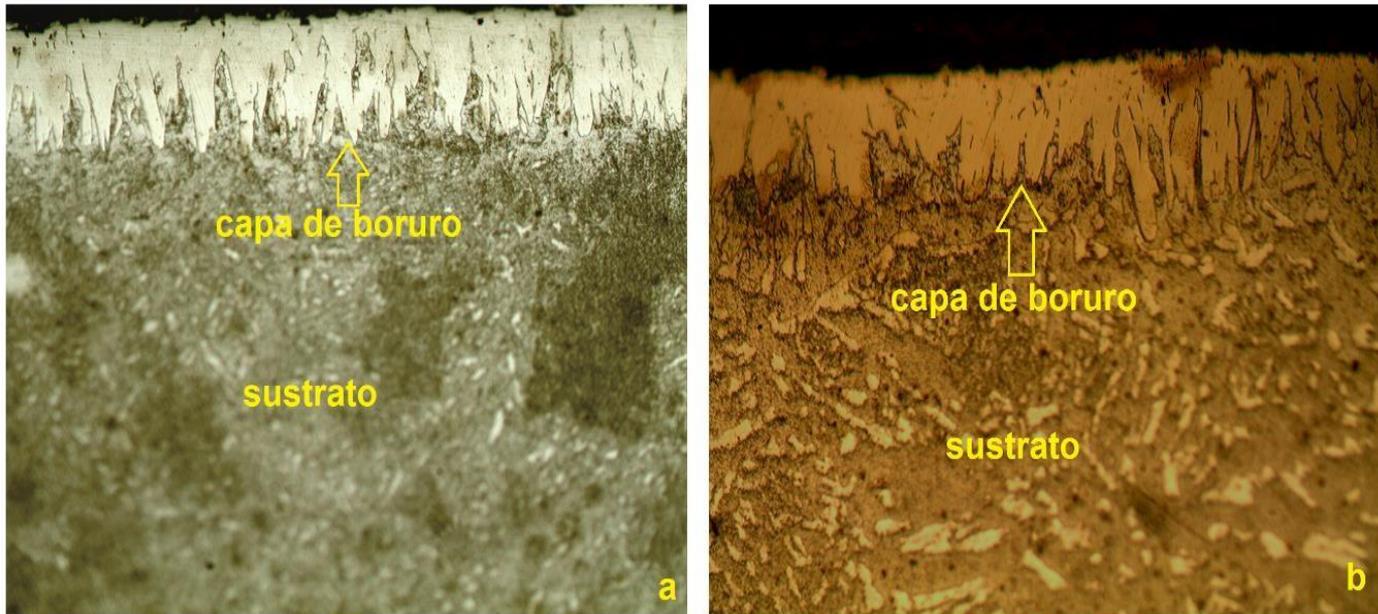
- a. Microscopía óptica
- b. Difracción de rayos X (DRX) de la capa de boruro de hierro
- c. Cinética de la reacción de borurización

## II. Borurización del acero DIN UC1

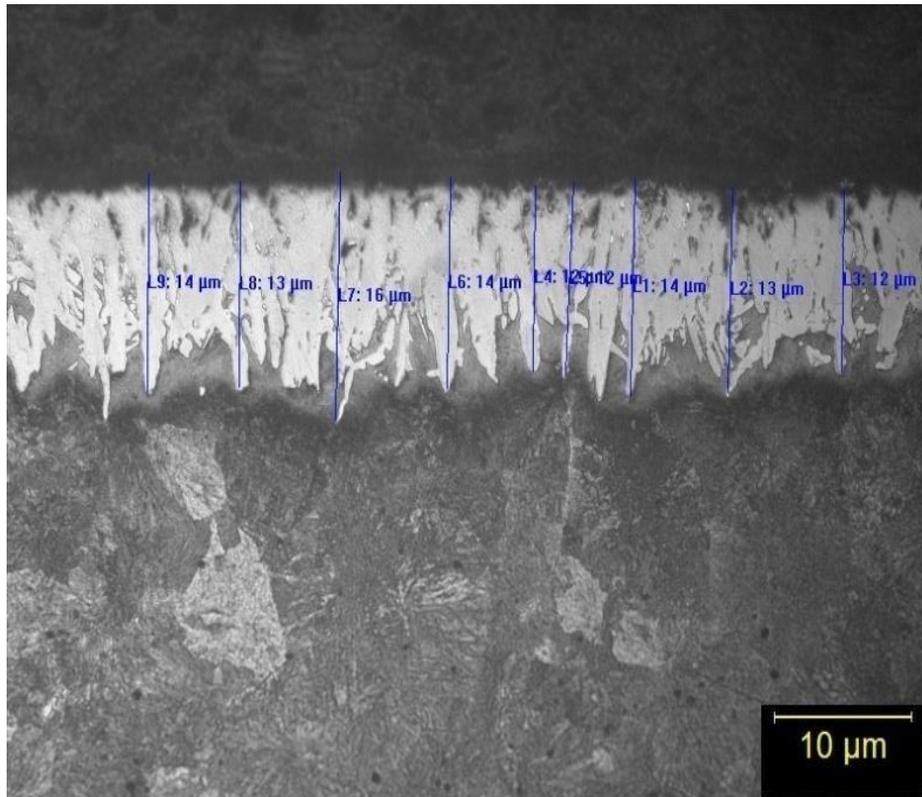
- a. Microscopía óptica
- b. DRX de la capa de boruro de hierro
- c. Cinética de la reacción de borurización

# Acero SAE 1005

## Microscopía óptica



**Figura 10.** Micrografías a 200X de la capa de boruro de hierro ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) del sustrato de hierro borurizado con la mezcla de bórax y ácido bórico durante 4 horas a (a) 1173 y (b) 1273 K



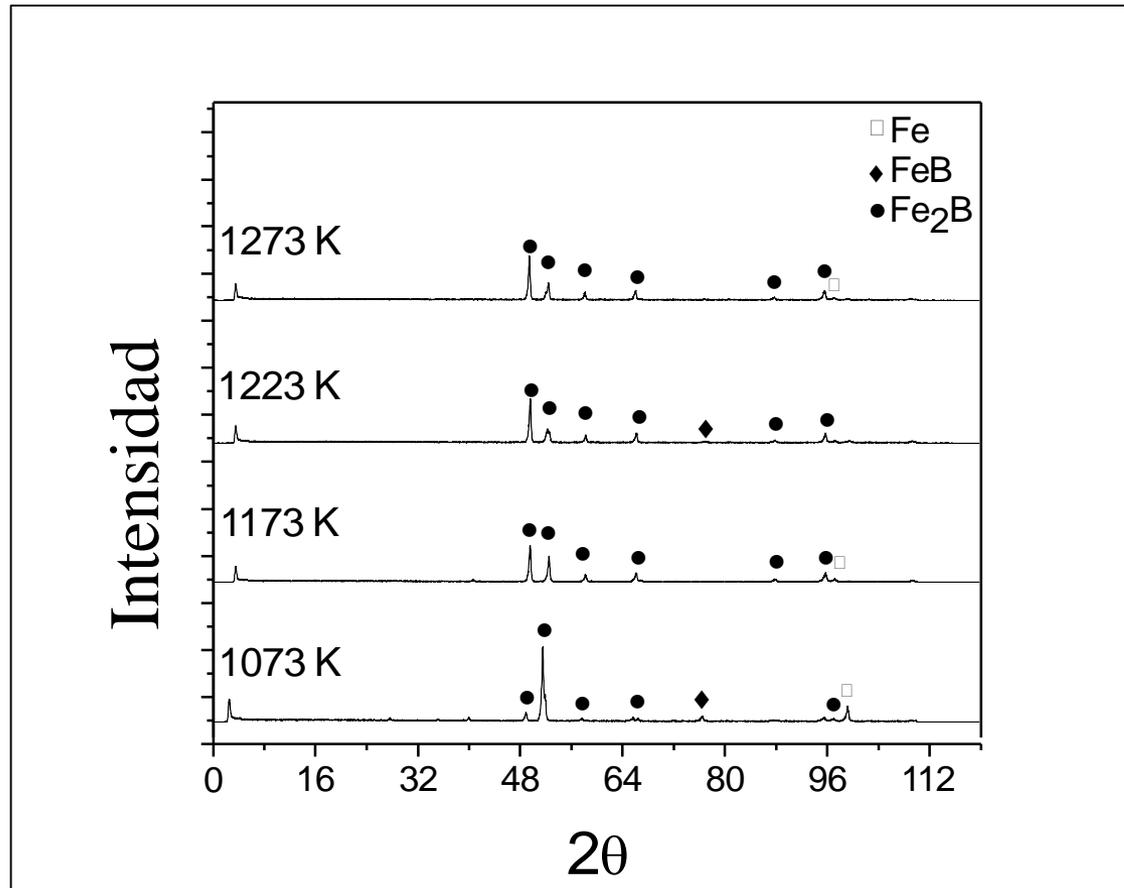
$$d_{Fe_2B} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{Fe_2B,i}}{n}$$

**Figura 11.** Representación esquemática de la forma de medir el espesor de la capa de boruro [9]

**Tabla 2.** Resultados del espesor de la capa del proceso de borurización del hierro

Tiempo (h)	Espesor de la capa ( $\mu\text{m}$ )			
	1073 K	1173 K	1223 K	1273 K
1	1.47 $\pm$ 2.06	6.45 $\pm$ 1.09	8.47 $\pm$ 0.69	10.48 $\pm$ 0.58
1.334	4.30 $\pm$ 1.72	10.73 $\pm$ 0.83	18.24 $\pm$ 2.16	23.17 $\pm$ 3.52
2	8.36 $\pm$ 2.13	19.57 $\pm$ 2.08	29.63 $\pm$ 1.29	37.91 $\pm$ 2.56
4	18.00 $\pm$ 0.98	30.14 $\pm$ 1.07	45.71 $\pm$ 1.86	60.04 $\pm$ 1.47

# Difracción de Rayos X (DRX)



**Figura 12.** Patrones de difracción del estudio de Rayos X para la muestras de hierro boruradas durante 1 h y 40 min

# Cinética de la reacción de borurizado

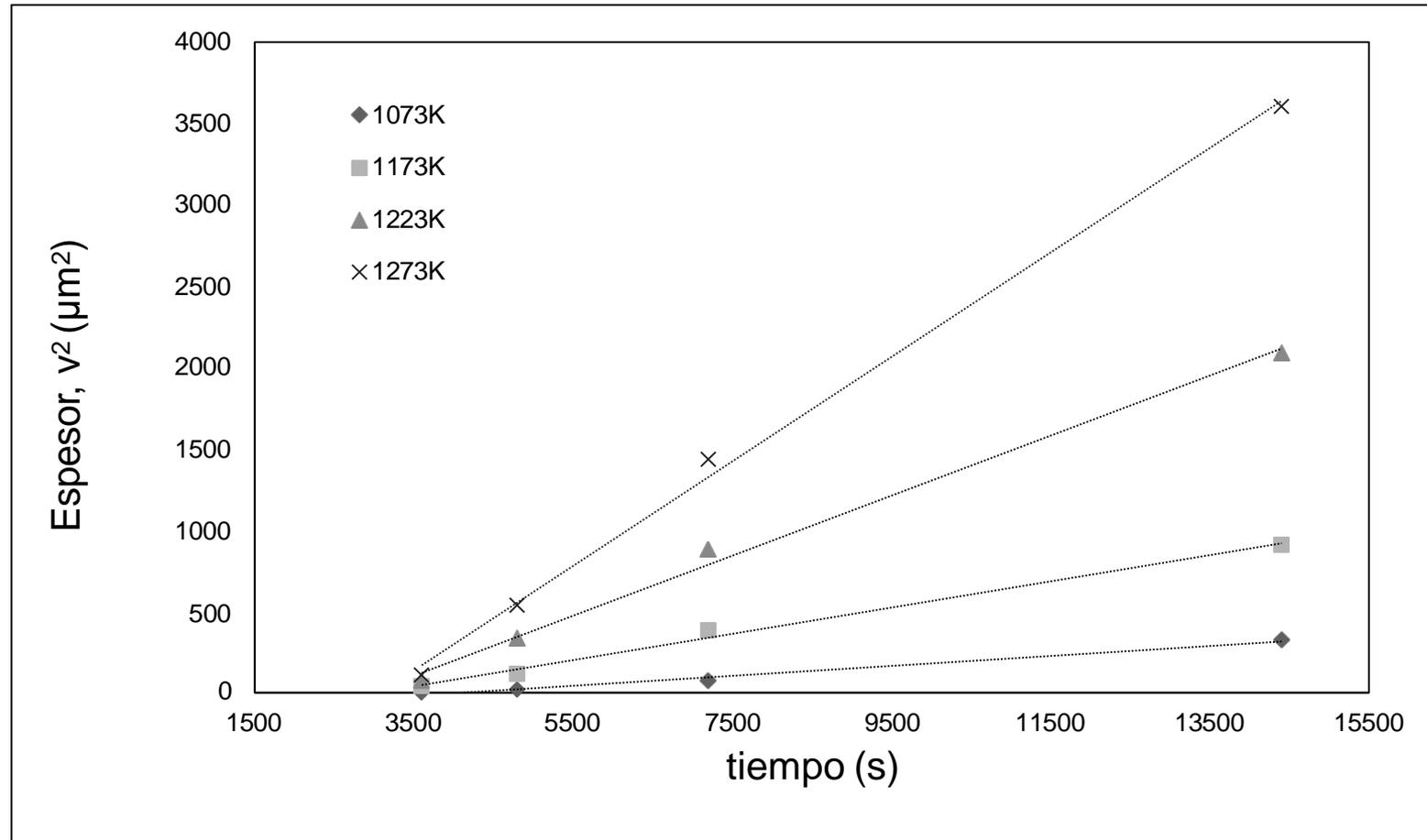
Los modelos de difusión tradicionales proponen que la capa de  $\text{Fe}_2\text{B}$  tiende a seguir la ley de crecimiento parabólico:

$$d^2 = k_{\text{Fe}_2\text{B}} t$$

El principal factor que impide el crecimiento de la capa borurada es la difusión del boro en el hierro. Al graficar  $d^2$  contra  $t$ , la pendiente de cada línea aumenta con la temperatura, lo que indica que la constante de crecimiento parabólico tiene un comportamiento tipo Arrhenius:

$$k_{\text{Fe}_2\text{B}} = k_0 \exp\left(-Q/RT\right)$$

La última consideración en la difusión tradicional es considerar que la capa de boruro se comienza a formar en el tiempo  $t=0$ .



**Figura 13.** Gráfica de los espesores de las capas de boruro al cuadrado ( $v^2$ ) en función del tiempo de tratamiento (t) para el hierro

$$v^2 = k_{Fe_2B}^2 t_v = k_{Fe_2B}^2 \left( t - t_0^{Fe_2B}(T) \right)$$

**Tabla 3.** Constantes de crecimiento parabólico y tiempos de incubación

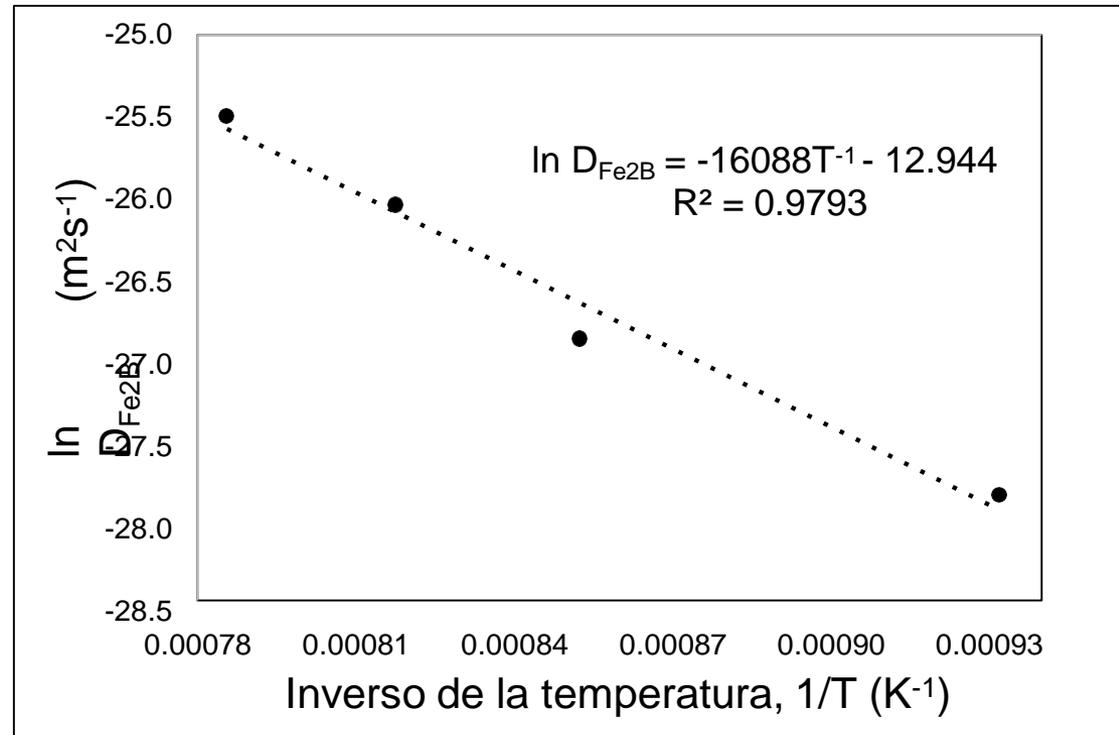
Temperatura (K)	Constante de crecimiento $k_{Fe_2B}^2$ ( $\mu m^2 s^{-1}$ )	Tiempo de incubación (s)
1073	0.03070	4128.339
1173	0.08090	3026.082
1223	0.18480	2940.043
1273	0.32140	3075.731

$$D_{Fe_2B} = k_{Fe_2B}^2 \frac{C_{low}^{Fe_2B} - 2C_0 + C_{up}^{Fe_2B}}{4(C_{low}^{Fe_2B} - C_{up}^{Fe_2B})}$$

**Tabla 4.** Coeficientes de difusión del boro ( $D_{Fe_2B}$ ) obtenidos de la ecuación

Temperatura T (K)	Coeficiente de difusión $D_{Fe_2B}$ ( $m^2s^{-1}$ )
1073	$8.0494 \times 10^{-13}$
1173	$2.12116 \times 10^{-12}$
1223	$4.84537 \times 10^{-12}$
1273	$8.42697 \times 10^{-12}$

$$\ln D_{Fe_2B} = \ln D_0 - \left( \frac{Q}{RT} \right)$$

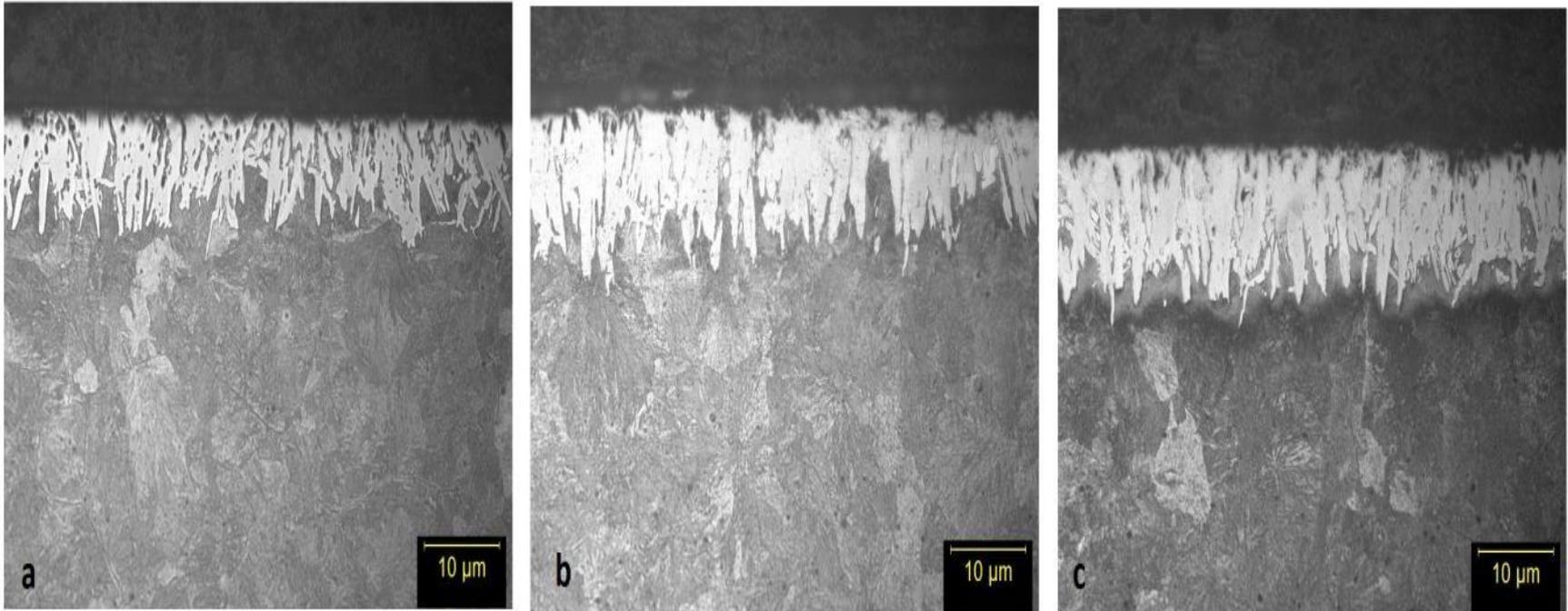


**Figura 14.** Gráfica del  $\ln D_{Fe_2B}$  vs  $1/T$  para determinar la energía de activación en el acero SAE 1005

$$D_{Fe_2B} = 2.3905 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{133.8 \text{ kJmol}^{-1}}{RT}\right)$$

# Acero DIN UC1

## Microscopía óptica

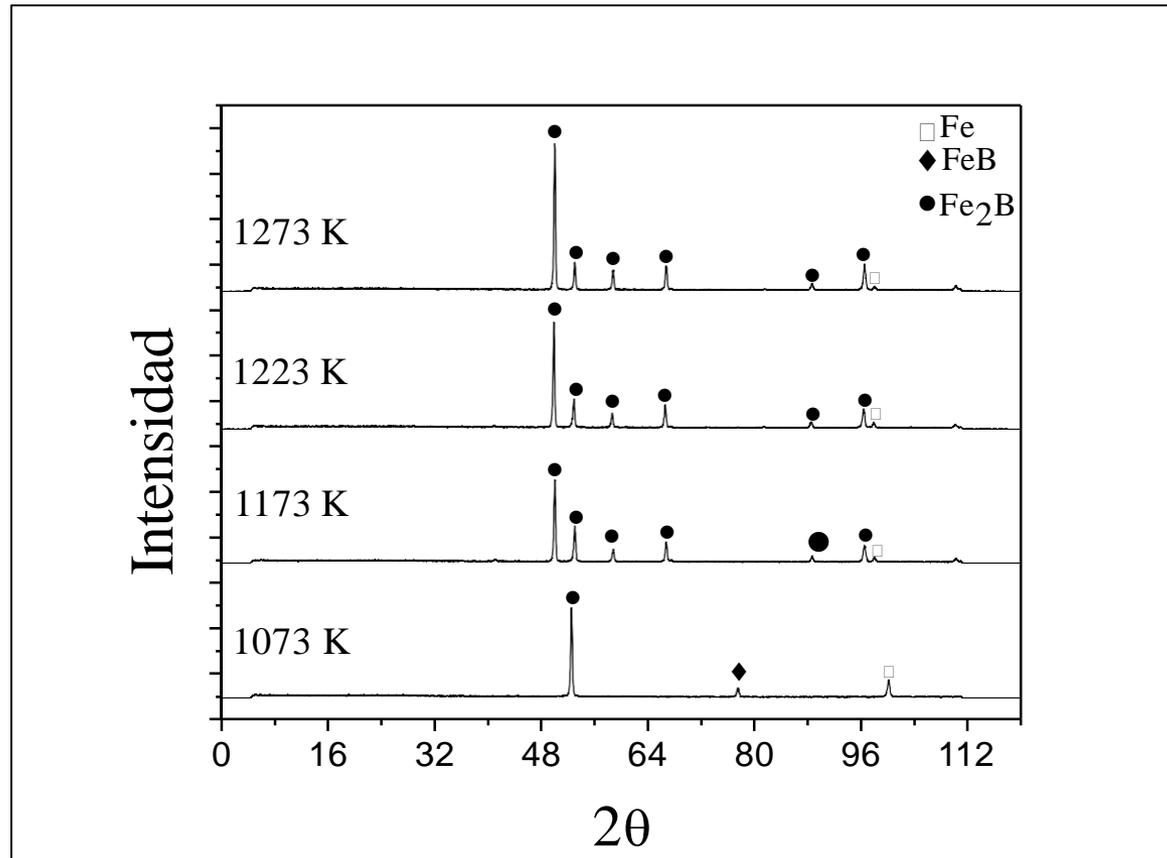


**Figura 17.** Micrografías a 200X de la capa de boruro de hierro ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) a 1273 K durante (a) 2, (b) 3 y (c) 4 horas

**Tabla 9.** Resultados del espesor de la capa del proceso de borurizado del acero DIN UC1

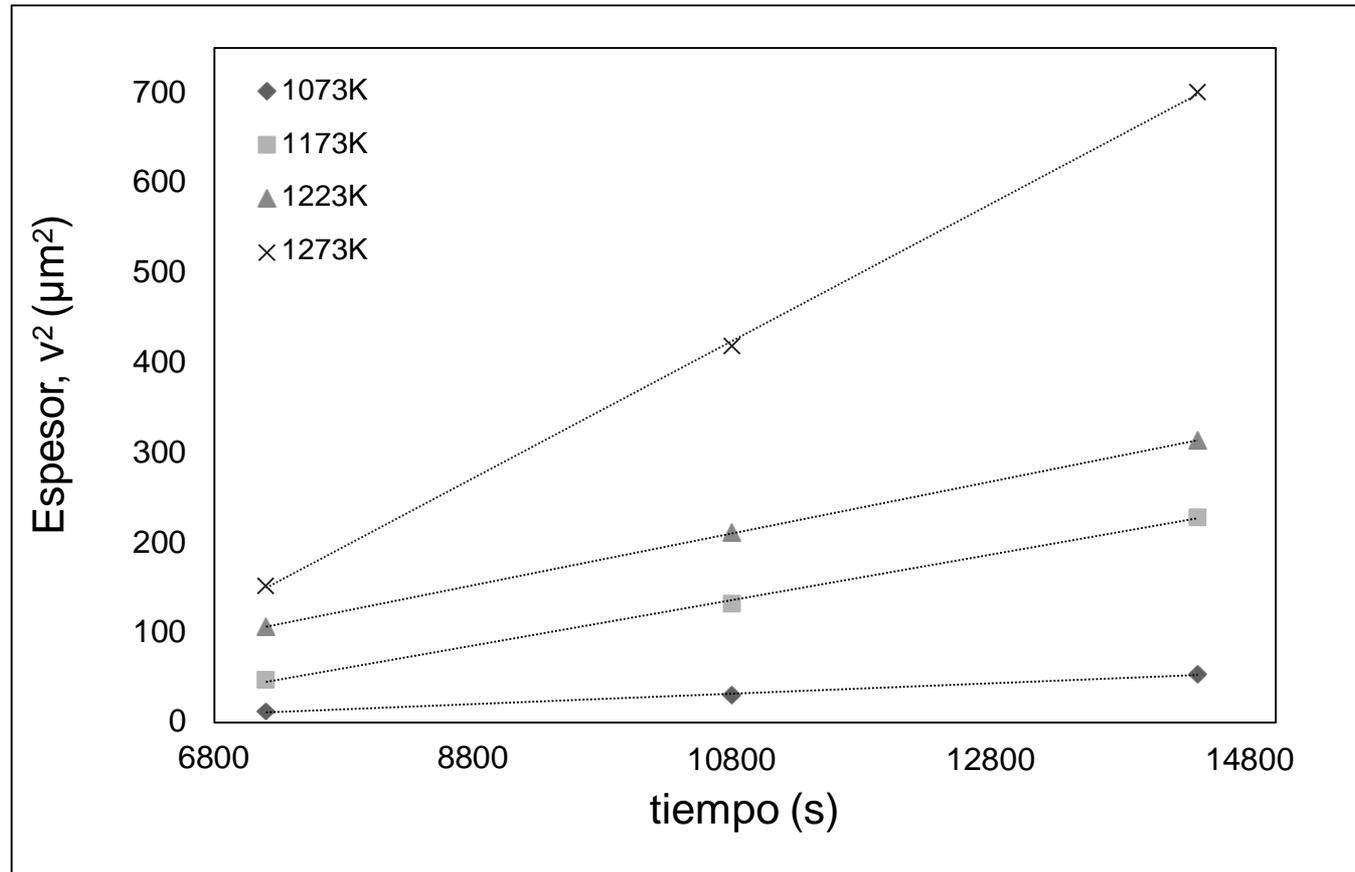
Tiempo (h)	Espesor de la capa ( $\mu\text{m}$ )			
	1073 K	1173 K	1223 K	1273 K
2	3.51 $\pm$ 1.45	6.90 $\pm$ 2.14	10.31 $\pm$ 1.27	12.35 $\pm$ 1.53
3	5.53 $\pm$ 2.54	11.50 $\pm$ 1.42	14.53 $\pm$ 1.06	20.47 $\pm$ 2.02
4	7.33 $\pm$ 3.47	15.12 $\pm$ 2.05	17.70 $\pm$ 2.11	26.48 $\pm$ 1.85

# Difracción de Rayos X (DRX)



**Figura 18.** Patrones de difracción del estudio de Rayos X para la muestras boruradas durante 3.5 h

# Cinética de la reacción de borurizado



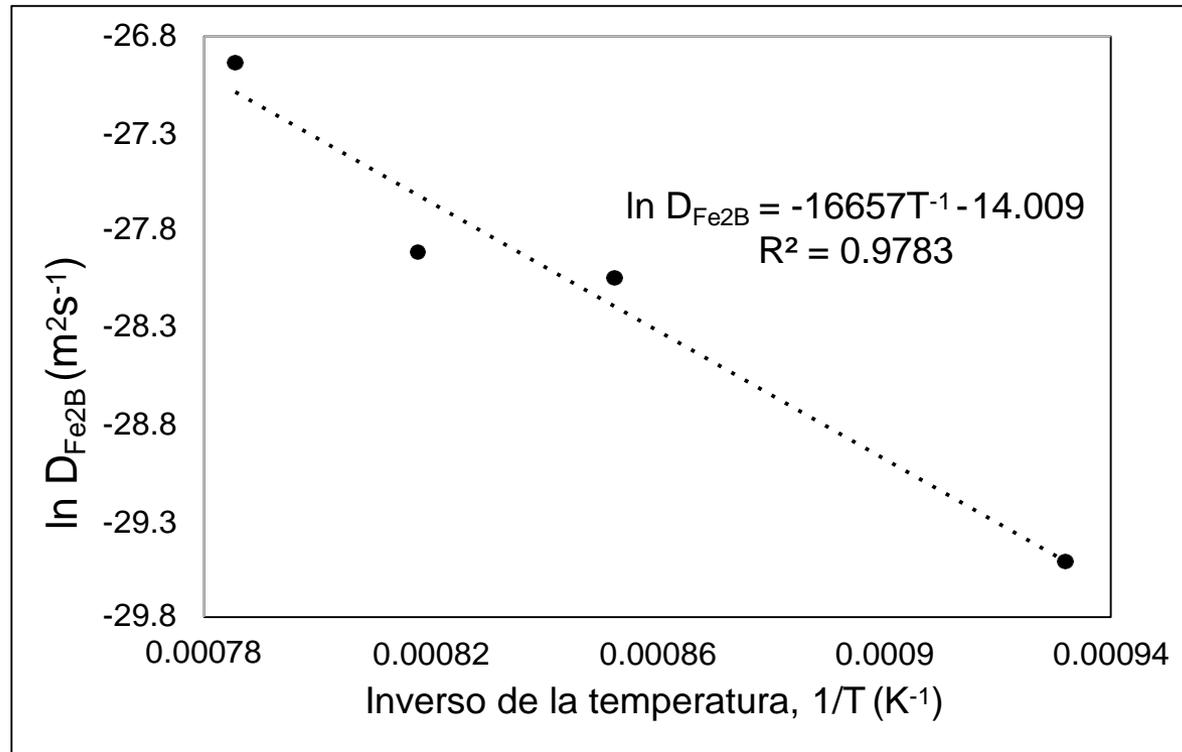
**Figura 19.** Gráfica de los espesores de las capas de boruro al cuadrado ( $v^2$ ) en función del tiempo de tratamiento ( $t$ )

**Tabla 10.** Constantes de crecimiento parabólico y tiempos de incubación

<b>Temperatura (K)</b>	<b>Constante de crecimiento <math>k^2_{\text{Fe}_2\text{B}}</math> (<math>\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}</math>)</b>	<b>Tiempo de incubación (s)</b>
<b>1073</b>	0.00580	5155.690
<b>1173</b>	0.02510	5392.430
<b>1223</b>	0.02870	3493.380
<b>1273</b>	0.07620	5233.071

**Tabla 11.** Coeficientes de difusión del boro ( $D_{\text{Fe}_2\text{B}}$ ) obtenidos de la ecuación (12)

<b>Temperatura T (K)</b>	<b>Coeficiente de difusión <math>D_{\text{Fe}_2\text{B}}</math> (<math>\text{m}^2\text{s}^{-1}</math>)</b>
1073	$1.52073 \times 10^{-13}$
1173	$6.58111 \times 10^{-13}$
1223	$7.52501 \times 10^{-13}$
1273	$1.99793 \times 10^{-12}$



**Figura 20.** Gráfica del  $\ln D_{\text{Fe}_2\text{B}}$  vs  $1/T$  para determinar la energía de activación en el acero DIN UC1

$$D_{\text{Fe}_2\text{B}} = 7.5844 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{137.6 \text{ kJmol}^{-1}}{RT}\right)$$

# Conclusiones

Se realizó el tratamiento termoquímico de borurización, en los aceros SAE 1005 y DIN UC1, por empaquetamiento en una mezcla de polvos compuesta por ácido bórico, bórax y carburo de silicio a diferentes temperaturas (1073, 1173, 1223 y 1273 K) con la finalidad de establecer el efecto de la composición química en el espesor de la capa, la cinética de crecimiento y la energía de activación para la difusión de boro en el hierro, utilizando una ecuación de difusión tipo Arrhenius, en la cual se considera que los boruros comienzan a formarse después de un tiempo de incubación.

El espesor y composición de la capa fueron caracterizados mediante MO y DRX, respectivamente, concluyendo lo siguiente:

- la temperatura más baja a la cual se formó la capa de boruro fue a 1073 K como se mostró en los resultados obtenidos por MO y DRX,
- el análisis por MO confirmó que las capas de boruro crecieron proporcionalmente con la temperatura; pasando de 1.47  $\mu\text{m}$  (1073 K) a 60.04  $\mu\text{m}$  (1273 K) para el acero SAE 1005, y de 3.51  $\mu\text{m}$  (1073 K) a 26.48  $\mu\text{m}$  (1273 K) para el acero DIN UC1 respectivamente. Al aumentar la temperatura se incrementó la velocidad de difusión del boro confirmando que el mecanismo de reacción fue por difusión intersticial de boro en el hierro;

- el efecto de la composición química de los aceros se vio reflejado en un valor menor de energía de activación calculada para el acero SAE1005 ( $133.8 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) con respecto al DIN UC1 ( $137.6 \text{ kJ mol}^{-1}$ ), por efecto de la mayor cantidad de elementos aleantes como carbono, silicio y cromo. Además, el espesor de la capa fue más grande en el acero SAE 1005, es decir, donde hubo menor cantidad de elementos aleantes por lo que se demandó una energía de activación más baja para promover la difusión del boro a través del acero, y
- el análisis por DRX confirmó que la capa de boruro fue monofásica, formada por  $\text{Fe}_2\text{B}$ , en todos los tratamientos.



**ECORFAN®**

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCONIMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)