



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN**

# **T e s i s**

**Determinación de la tenacidad a la fractura en capas  
borurizadas empleando redes neuronales**

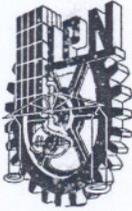
**Que para obtener el grado de:  
Maestro en Ciencias en  
Ingeniería Mecánica**

**Presenta:  
Ing. Rodolfo Sosa Rojas**

**Director:  
Dr. Iván Enrique Campos Silva**

**MEXICO, D.F.**

**2007**



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 15 del mes de Febrero del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. para examinar la tesis de grado titulada:

**“DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN CAPAS BORURIZADAS EMPLEANDO REDES NEURONALES”.**

Presentada por el alumno:

**SOSA**

Apellido paterno

**ROJAS**

Apellido materno

**RODOLFO**

Nombre(s)

Con registro: 

B	0	2	1	8	8	3
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. IVÁN ENRIQUE CAMPOS SILVA

Segundo Vocal

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA

Secretario

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Presidente

DR. ALEXANDER BALANKIN

Tercer Vocal

DR. JOSÉ MARTÍNEZ TRINIDAD

Suplente

M. EN C. GABRIEL VILLA Y RABASA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



SECRETARIA DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D. F., el día 25 del mes Junio del año 2007

el(la) que suscribe Rodolfo Sosa Rojas alumno (a) del Programa de  
Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Mecánica

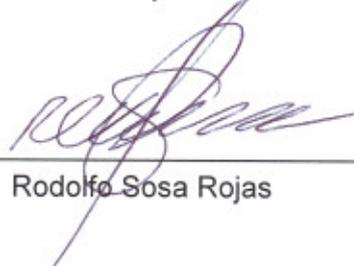
con número de registro B021883 adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la  
E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis  
bajo la dirección del Dr. Iván Enrique Campos Silva y cede los derechos del  
trabajo intitulado: Determinación de la Tenacidad a la Fractura en Capas Borurizadas al  
Empleando Redes Neuronales

Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines Académicos y de Investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo  
sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la  
siguiente dirección: rodolfo\_sosa@hotmail.com icampos@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente  
del mismo.

Nombre y Firma



Rodolfo Sosa Rojas

# INDICE

<b>Lista de figuras</b>	<b>I</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>II</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>Marco Teórico</b>	<b>VII</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>VIII</b>
<b>Justificación</b>	<b>X</b>
<b>Objetivo General</b>	<b>XI</b>
<b>Objetivos Específicos</b>	<b>XI</b>
<b>Metodología.</b>	<b>XII</b>

## **1. INTRODUCCIÓN.**

1.1 Generalidades del Tratamiento Termoquímico de Borurización.	1
1.1.1 Materiales susceptibles para la borurización	3
1.1.2 Cinética de crecimiento de capas boruradas	5
1.1.3 Dureza de las fases boruradas	7
1.1.4 Influencia de los elementos aleantes en la borurización	9
1.1.5 Aplicaciones del tratamiento termoquímico de borurización	9

## **2. FUNDAMETOS DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA Y LA APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN CAPAS BORURADAS.**

2.1 Características de la prueba de microindentación Vickers..	11
2.1.1 Orígenes de la prueba de tenacidad a la fractura mediante microindentación Vickers	12
2.1.2 Modelos de tenacidad a la fractura mediante indentación Vickers.	15
2.1.2.1 Ecuación de B. R. Lawn y M. Swain (1974)	16
2.1.2.2 Ecuación de B. R. Lawn y E. Fuller (1975)	16
2.1.2.3 Ecuación de A. G. Evans y T. R. Wilshaw (1976)	17
2.1.2.4 Ecuación de A. G. Evans y E. A. Charles (1976)	18

2.1.2.5 Ecuación de B. R. Lawn, A. G. Evans y D. B. Marshall (1980)	18
2.1.2.6 Ecuación de G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn y D. B. Marshall (1981)	20
2.1.2.7 Ecuaciones de T. Laugier (1985)	20
2.2 Introducción a la inteligencia artificial.	21
2.2.1 Redes neuronales artificiales.	21
<b>3 ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS EN CAPAS BORURIZADAS PARA ACEROS ESTRUCTURALES AISI 1045.</b>	
3.1 Proceso experimental de Borurización en pasta.	29
3.2 Fractura por Microindentación en capas Borurizadas.	32
3.3 Modelo de Redes Neuronales.	36
<b>4 ANALISIS DE RESULTADOS.</b>	
4.1 Evaluación de la Tenacidad a la Fractura por el Modelo de Grieta Radial–Media.	43
4.1.1 Calculo de forma experimental del valor de $K_{IC}$ en la fase $Fe_2B$	43
4.1.2 Pruebas de Microdureza.	44
4.1.3 Medición de la Longitud de Grieta.	45
4.1.4 Determinación del valor de tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) obtenida por el modelo de agrietamiento radial-media para la fase $Fe_2B$	46
4.2 Validación del modelo de red neuronal.	48
Conclusiones	56
Recomendaciones para trabajo futuro.	59
Anexos	
Anexo A Códigos fuente de la red neuronal.	60
Anexo B Valores experimentales de Dureza, Longitud de Grieta y Tenacidad a la fractura	77
Referencias	95

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Aplicaciones industriales de diferentes aceros borurizados	9
Tabla 2.1 Funciones de activación empleadas en el modelo de redes neuronales.	23
Tabla 3.1 Tamaño de grieta ( $c$ ) promedio por cada distancia desde la superficie hasta la interfase $Fe_2B$ /substrato.	35
Tabla 3.2 Valores promedio de tenacidad a la fractura a diferentes distancias de indentación sobre aceros borurizados AISI 1045. Carga 200 g.	36
Tabla 3.3 Valores de salida obtenidos por el modelo de redes neuronales a la temperatura de $920^{\circ}C$ , 4 h de tratamiento y a una distancia de microindentación de $15\ \mu m$ .	41
Tabla 3.4 Valores de salida obtenidos por el modelo de redes neuronales a la temperatura de $950^{\circ}C$ , 4 h de tratamiento y a una distancia de microindentación de $15\ \mu m$ .	42
Tabla 4.1 Valores promedio de $l$ , $g$ , $C$ obtenidos a diferentes distancias de indentación sobre la fase de boruro de hierro $Fe_2B$	46
Tabla 4.2 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a $920^{\circ}C$ durante 4 h a una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ y $45\ \mu m$	47
Tabla 4.3 Valores de tenacidad a la fractura de materiales cerámicos importante en ingeniería.	48
Tabla 4.4 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a $1000^{\circ}C$ durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ , $45\ \mu m$ y $55\ \mu m$	50
Tabla 4.5 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a $1000^{\circ}C$ durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ , $45\ \mu m$ y $55\ \mu m$ .	51
Tabla 4.6 Tenacidad a la fractura obtenida mediante el uso de redes neuronales para probetas borurizadas a $1000^{\circ}C$ durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ , $45\ \mu m$ y $55\ \mu m$	52
Tabla 4.7 Tenacidad a la fractura obtenida mediante el uso de redes neuronales para probetas borurizadas a $1000^{\circ}C$ durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ , $45\ \mu m$ y $55\ \mu m$	53
Tabla 4.8 Porcentaje de error al comparar los valores de tenacidad a la fractura obtenida por mediciones experimentales contra los valores obtenidos por la red neuronal, para probetas a borurizadas a $1000^{\circ}C$ durante 4 h a una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ , $45\ \mu m$ y $55\ \mu m$	54
Tabla 4.9 Porcentaje de error al comparar los valores de tenacidad a la fractura obtenida por mediciones experimentales contra los valores obtenidos por la red neuronal, para probetas a borurizadas a $1000^{\circ}C$ durante 4 h a una distancia de la superficie de $15\ \mu m$ , $25\ \mu m$ , $35\ \mu m$ , $45\ \mu m$ y $55\ \mu m$	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de fases Hierro – Boro	2
Figura 1.2 Sección transversal de muestras borurizadas (aceros AISI 1045 y AISI M2) tratados a 1000°C con 6 h de tratamiento con espesores de pasta de boro de (a), (b) 3 mm y (c), (d) 4 mm (Cortesía Dr. Iván E. Campos, IPN SEPI-ESIME Zacatenco).	4
Figura 1.3 Evolución del frente de crecimiento del boruro de hierro Fe <sub>2</sub> B en el acero AISI 1045.	7
Figura 2.1 Vista en el plano y en sección transversal de un esquema idealizado de una microindentación Vickers de <i>a</i> grieta radial-media y <i>b</i> una microindentación con un sistema de grieta radial Palmqvist.	15
Figura 2.2 Representación esquemática de una neurona artificial.	22
Figura 2.3. Diagrama de flujo para el entrenamiento de un perceptrón.	24
Figura 2.4. Diagrama de flujo para el entrenamiento de un perceptrón.	26
Figura 3.1 Representación esquemática del molde de acrílico y las probetas de acero AISI 1045. Escala en mm. (Tomado de: Giselle Ramírez Sandoval "Caracterización de grietas auto-afines en capas borurizadas para aceros estructurales AISI 1045", Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, SEPI-ESIME Zacatenco, Octubre 2006)	31
Figura 3.2 Sección transversal de muestras de acero AISI 1045 borurizadas (capa Fe <sub>2</sub> B) con tiempos de tratamiento de 6 h y 5 mm de espesor de pasta de boro, a las temperaturas: (a) 920°C, (b) 950°C y (c) 1000°C. Magnificación 200x (Cortesía Dr. Iván Enrique Campos Silva, IPN SEPI-ESIME Zacatenco)	32
Figura 3.3 (a) Micrografía de la distribución de las indentaciones sobre la fase Fe <sub>2</sub> B (500x); (b) Criterio de medición para encontrar el valor de <i>c</i> , imagen por microscopía óptica (1000x). (Cortesía: Giselle Ramírez Sandoval, IPN-SEPI ESIME Zacatenco)	34
Figura 3.4 Gradiente de microdurezas sobre la capa Fe <sub>2</sub> B formada en la superficie de un acero AISI 1045 borurizado bajo tres temperaturas de tratamiento.	35
Figura 3.5 Estructura de la red neuronal empleada.	37
Figura 3.6 Dependencia entre el error promedio en la predicción del valor de tenacidad a la fractura de la fase Fe <sub>2</sub> B y el número de ciclos de entrenamiento realizados por el modelo de redes neuronales. (a) Temperatura 920°C, con 4 h de tratamiento y a una distancia de indentación desde la superficie de 15 µm. Desempeño alcanzado $9.76084 \times 10^{-7}$ , meta $1 \times 10^{-6}$ . (b) Temperatura 950°C, con las mismas condiciones experimentales. Desempeño alcanzado $8.8831 \times 10^{-7}$ , meta $1 \times 10^{-6}$	40
Figura 4.1 Diagrama del proceso experimental para el cálculo de $K_{IC}$	43
Figura 4.2 Perfil de microdureza a lo largo del espesor de la capa borurada Fe <sub>2</sub> B a las temperaturas de 920,950 y 1000°C.	45

# Nomenclatura

$a_{crit}$	Tamaño de grieta crítico
$a_b$	Longitud de la diagonal del indentador Vickers.
$c$	Tamaño de grieta desde la mitad de la diagonal del indentador Vickers hasta la punta de la grieta
$E$	Módulo de Young
$F$	Trabajo realizado por las cargas
$FeB$	Boruro de hierro
$Fe_2B$	Bi-boruro de hierro
$G$	Rapidez de liberación de energía
$G_c$	Valor crítico de la rapidez de liberación de energía
$g$	Longitud de grieta a partir del vértice de la indentación
$\bar{g}$	Promedio de $g$
$H_V$	Dureza Vickers
$K_C$	Tenacidad efectiva a la fractura o factor de intensidad de esfuerzos
$K_I$	Factor de intensidad de esfuerzos modo I
$K_{IC}$	Tenacidad a la fractura
$K_R$	Factor de intensidad de esfuerzos para una configuración de grieta radial ideal generada por un indentador agudo.
$k \equiv$	Constante de crecimiento parabólico [ $m^2/s$ ] que depende de la temperatura
$\Sigma l$	suma de las longitudes de las grietas de las cuatro esquinas de la indentación Vickers
$A$	trabajo crítico requerido para iniciar la fractura alrededor de la indentación Vickers
$A_{300}$	trabajo requerido para generar una suma total de la longitud de grieta de $300 \mu m$ alrededor de una microindentación Vickers
$W$	“resistencia a la fractura”
$\ell$	Longitud de la mitad de la diagonal de la indentación
$D$	mayor profundidad de la grieta media
$\bar{\ell}$	Promedio de $\ell$
$N$	Newtons

$\theta$	la mitad del ángulo del cono del indentador
$P$	Carga
$p_0$	Presión de contacto
$t$	Tiempo
$T$	Temperatura
$u$	Espesor de la capa Fe <sub>2</sub> B
$v$	Espesor de la zona de difusión desde la superficie de la muestra
$x$	Espesor de pasta de carburo de boro
$\xi_0$	Constante adimensional que depende de la naturaleza de la deformación producida por el indentador
$\mu$	coeficiente de fricción
$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_A$	Esfuerzo sobre un espécimen en modo I de fractura
$\sigma_{ij}$	Magnitud del esfuerzo
$\sigma_1$	Esfuerzo normal principal
$\sigma_\infty$	Esfuerzo aplicado a una distancia infinita
$\Omega_r$	constante dependiente del material
$\beta$	tamaño relativo de la zona plástica
$\nu$	Relación de Poisson
$\psi$	Factor geométrico adimensional del factor de intensidad de esfuerzos
$x_m(k)$	valores normalizados de entrada
$\log sig(n)$	función logarítmica sigmoidea
$x_n$	valores de entrada de una red neuronal
$I_j$	suma de los pesos de la entrada de una red neuronal
$Y_j$	función de activación de una red neuronal
$W_{ij}$	suma de los pesos de entrada en una red neuronal
$O_j$	salida de la red neuronal
$e_k$	error de la capa de salida
$d_k$	salida deseada
$\eta$	coeficiente de aprendizaje

## RESUMEN

En el presente estudio se evalúa la tenacidad a la fractura en capas de boruros de hierro Fe<sub>2</sub>B sobre aceros AISI 1045 empleando la técnica de modelación por redes neuronales. El método de endurecimiento superficial se realizó por borurización en pasta. La formación de la fase Fe<sub>2</sub>B se llevó a cabo dentro del rango de temperaturas de 920, 950 y 1000 °C con un tiempo de tratamiento de 4 y 6 h, y espesor de pasta de boro de 5 mm. Debido al potencial de boro empleado y la ausencia de elementos aleantes en el sustrato, se obtuvieron capas monofásicas y aserradas de boruros Fe<sub>2</sub>B.

Las microgrietas sobre la superficie de la capa Fe<sub>2</sub>B se generaron a través de ensayos de microindentación Vickers con una carga constante de 0.2 kg., variando las distancias de aplicación de carga entre 15 – 45  $\mu\text{m}$  desde la superficie hasta la interfase Fe<sub>2</sub>B/substrato. Para la evaluación experimental de la tenacidad a la fractura, se empleó la teoría de mecánica de la fractura por indentación. El tipo de grieta asumido en las capas borurizadas es del tipo radial-media, donde el valor de tenacidad a la fractura es obtenido por la ecuación:

$$K_{IC} = 0.028 \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{P}{c^{3/2}} \right).$$

El empleo de redes neuronales es una alternativa para la determinación del valor de tenacidad a la fractura, con la cual se garantiza la automatización y optimización de este parámetro mecánico en capas borurizadas. El modelo de redes neuronales fue construido a través del software MATLAB V7.0, tomando como valores de entrada la microdureza de la fase borurada y la longitud de grieta producida por la indentación Vickers, y como valor de salida, el factor de intensidad de esfuerzos crítico ( $K_c$ ). El entrenamiento de la red neuronal se realizó con los datos experimentales de microindentación recabados a las temperaturas de 920 y 950°C, con 4 y 6 h de tratamiento. Finalmente, la validación de la red neuronal para los valores de tenacidad a la fractura, fue efectuado con parámetros experimentales externos al entrenamiento de la red, obteniendo una precisión del 90.2% a la temperatura de 1000°C, con 4 h de tratamiento y del 86.6% para la misma temperatura considerando 6 h de tratamiento.

## ABSTRACT

The fracture toughness of boride layers obtained by the paste boriding process at the surface of borided AISI 1045 steels is evaluated in the present study using the technique of neural networks. The formation of the phase was carried out within the range of temperatures of 920, 950 and 1000 °C with treatment times of 4 and 6 h, and boron carbide paste thicknesses of 5 mm. Due to the boron potential used in the process and the absence of alloying elements in the substrate, were obtained a saw-toothed morphology of Fe<sub>2</sub>B borided layers.

A Vickers microhardness tester was used to generate microcracks at a load of 200g. The indentations were made across the thickness of the iron boride layer at four different distances (15 – 45 μm) from the surface. For the evaluation of the fracture toughness, the theory of fracture indentation was used. The type of the crack generated at the corner of the microindentation is radial-median, where the value of fracture toughness is obtained by the

$$\text{equation: } K_{IC} = 0.028 \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{P}{c^{3/2}} \right).$$

The use of neural networks is an alternative for the determination of the value of fracture toughness, and to control the automation and optimization of this mechanical parameter in borided layers. The model of neural networks was done using the software MATLAB V7.0, taking as input values the microhardness of borided phase and the crack length produced by the Vickers microindentation, and the output values, the critical stress intensity factor ( $K_c$ ). The training of the neural network was carried out with the experimental data at the temperatures of 920 and 950 °C, with 4 and 6 h of treatment time. The reliability of the technique used is compared with a set of experimental parameters external to the training of the neural network. The results of the Fe<sub>2</sub>B fracture toughness show a precision of 90.2% at the temperature of 1000 °C, with 4 h of treatment and 86.6% for the same temperature considering 6 h of time treatment.

## MARCO TEÓRICO

La borurización en pasta es un tratamiento termoquímico alternativo para la modificación de superficies de materiales ferrosos y no ferrosos a través de la difusión del boro y la subsecuente formación de fases boruradas tipo  $(Fe,M)B$  y  $(Fe,M)_2B$ , donde M corresponde a los elementos de aleación presentes en el sustrato y que difunden en las capas de boruros de hierro. Debido a la alta dureza obtenida por este tratamiento (alrededor de 2000  $H_V$ ) en comparación con tratamientos termoquímicos como la carburización, nitruración o carbonitruración, es necesario la interpretación de las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las capas de boruros de hierro formadas en la superficie del sustrato.

Una de las propiedades mecánicas más importantes en diseño es el valor de tenacidad a la fractura. Este parámetro mecánico indica el comportamiento del material con presencia de grietas, fisuras, porosidad, etc. y por ende, establece las condiciones óptimas de diseño en componentes ingenieriles para un buen funcionamiento. Tradicionalmente, los componentes endurecidos por el tratamiento de borurización, son empleados en la industria del vidrio, la industria textil, industria del plástico, etc. obteniendo buenos resultados por incrementar el tiempo de vida útil en elementos-maquina y herramientas de trabajo. Por ende, el presente trabajo de investigación determina el valor de tenacidad a la fractura por microindentación en capas borurizadas tipo  $Fe_2B$  formadas en la superficie de aceros AISI 1045, haciendo uso de la inteligencia artificial, particularmente del modelo de redes neuronales.

Particularmente, este trabajo es el inicio de la implementación de la inteligencia artificial en la determinación del valor de tenacidad a la fractura en capas borurizadas, siendo una herramienta poderosa en la automatización y optimización del proceso de evaluación de este parámetro mecánico. Por otro lado, este proyecto valida los resultados experimentales obtenidos en un trabajo de investigación anterior, donde se realiza un análisis de morfología de microgrietas producidas por microindentación Vickers en capas borurizadas [1].

## ANTECEDENTES

La borurización en pasta ha sido implementada en México a partir del año de 1997 [2]. Dentro de este trabajo pionero, se utilizó a la pasta de boro como una alternativa al proceso tradicional de borurización en caja empleado en Europa. Bajo el método por pastas, se determinó una alternativa de preparación de las muestras cuando se requiere reducir el trabajo manual utilizado en la borurización en polvo, además su ventaja radica en altos volúmenes de trabajo y en tratamientos selectivos. La pasta consta de  $B_4C$  (aproximadamente 76% en peso de boro) y activadores, en donde es posible el control del potencial químico de boro de acuerdo al espesor de pasta de boro que recubre la pieza y a la preparación de la pasta que está basado en la relación agua/polvo utilizado. Una atmósfera inerte es necesaria para la utilización de la pasta de boro, estableciendo una combinación de nitrógeno e hidrógeno en una relación de 90:10 ó 95:5. La atmósfera controlada determina la profundidad de la capa de boruro obtenida, teniendo mayor espesor en comparación con métodos de borurización en polvo [3,4]. Los primeros aceros endurecidos bajo el método de borurización en pasta fueron aceros comerciales principalmente en la industria de herramientas de corte, maquinaria, de construcción y en la industria alimenticia. Dentro de la caracterización mecánica realizada en la superficie de los substratos expuestos al tratamiento termoquímico, se determinaron inicialmente el comportamiento al desgaste e impacto, asimismo la cinética de crecimiento de fases boruradas con tiempos y temperaturas de tratamiento variables.

Por otro lado, es mínima la investigación que se ha realizado acerca de la tenacidad a la fractura en las fases  $FeB$  y  $Fe_2B$ . C. Bindal et al. [5-8] aplica los principios de fractura por indentación para evaluar la tenacidad a la fractura de las fases  $FeB$  y  $Fe_2B$  en substratos de hierro puro y aceros grado herramienta. Las grietas fueron generadas por microdurezas tipo Vickers en un rango de cargas entre 0.5 y 3 N. En este estudio, se asume una propagación de la grieta en forma lineal, estableciendo mediciones de la longitud total de la grieta en vértices simétricos de las indentaciones producidas sobre las capas boruradas. Los resultados muestran una variación de la tenacidad a la fractura en función

del tiempo de tratamiento, estableciendo una dependencia entre el espesor de la capa borurada y la tenacidad a la fractura.

Por otro lado, G. Ramírez et al. [9] determinó el valor de tenacidad a la fractura y tenacidad a la fractura fractal en aceros borurizados AISI 1045. Su estudio se basó en técnicas de microindentación Vickers, midiendo la longitud de grieta en los vértices de la indentación producida bajo una carga de 200 g., y estableciendo un comportamiento potencial de la tenacidad a la fractura de la fase  $Fe_2B$  en función de la mitad de la diagonal de indentación. Su estudio lo efectuó con más de 480 mediciones de microdureza realizadas a lo largo del espesor de la capa de boruro de hierro.

El empleo de la inteligencia artificial, que incluye tecnologías como redes neuronales, ha sido utilizado en el área de ingeniería de superficies, especialmente en tratamientos como carbonitruración y borurizado en polvo [10,11]. Los resultados de estas investigaciones presentan las posibilidades para predecir la variación de la dureza y del espesor de capa utilizando redes neuronales artificiales. El algoritmo de aprendizaje de la red neuronal fue de retro-propagación del error. Asimismo, se establecieron relaciones empíricas entre parámetros del proceso y capa borurizada, así como la variación de la microdureza de la fase a lo largo de la distancia de indentación.

Dentro del método de borurización en pasta, las técnicas de lógica difusa y modelación por redes neuronales han sido implementados [12,13]. Principalmente, estos estudios se basan en determinar la cinética de crecimiento de capas boruradas tipo  $Fe_2B$  en aceros estructurales AISI 1045, donde los espesores de capa dependen de los tiempos de tratamiento y los espesores de pasta de boro empleados en el proceso. En ambas técnicas de inteligencia artificial, se utilizaron dos parámetros de entrada y un parámetro de salida. Los resultados obtenidos por ambas técnicas y confrontados con resultados experimentales del espesor de la capa de boro  $Fe_2B$ , indican una precisión del 97% aproximadamente.

Actualmente, no se tiene información bibliográfica referente al empleo de redes neuronales para la determinación del valor de tenacidad a la fractura en capas borurizadas obtenidas por el proceso de borurización en pasta.

## JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación nace de la inquietud de implementar el método de redes neuronales al proceso de fractura por microidentación en capas borurizadas. Actualmente, el empleo de la inteligencia artificial en procesos termoquímicos ha tenido un gran auge. Con esto, es posible automatizar y optimizar los valores de tenacidad a la fractura para diferentes materiales expuestos a tratamientos de endurecimiento superficial. Este comentario es válido por la existencia de más de 19 ecuaciones empleadas para la evaluación de la fractura por indentación en materiales cerámicos. Aún más, no se tiene conocimiento bibliográfico de la implementación de modelos de redes neuronales para la determinación de este parámetro mecánico en capas de boruros de hierro.

La ventaja de implementar esta técnica de inteligencia artificial es la flexibilidad del método. El entrenamiento y la validación de los valores de tenacidad a la fractura obtenidos por redes neuronales, puede ser empleado para una amplia gama de materiales endurecidos por el tratamiento de borurización, y poder modificar los valores de entrada de la red (longitud de grieta, carga de aplicación, valores de microdureza y longitudes de las diagonales de indentación) obteniendo resultados confiables con un porcentaje de error mínimo.

## OBJETIVO GENERAL

Aplicación de la inteligencia artificial en la evaluación de la fractura por microindentación en capas de boruros de hierro empleando el método de redes neuronales para la determinación del valor de tenacidad a la fractura.

### Objetivos específicos

1. Validar los resultados experimentales obtenidos de la tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) de la fase  $Fe_2B$ , utilizando los principios de falla por indentación en materiales cerámicos opacos, para evaluar el comportamiento de  $K_{IC}$  en función de la distancia a la que se aplica la carga sobre la capa borurada.
2. Crear una red neuronal constituida por tres capas, empleando el software MATLAB V7.0 para el entrenamiento y validación de los valores de tenacidad a la fractura obtenidos para diferentes tiempos, temperaturas del proceso y distancias de indentación en las capas de boruros de hierro  $Fe_2B$ .

# METODOLOGÍA

1. Se verificó el estudio experimental de borurización en pasta en aceros endurecidos AISI 1045. Los parámetros experimentales de tiempo, temperatura y espesor de pasta de boro que influyen en la cinética de crecimiento de las capas boruradas de la fase  $Fe_2B$  fueron tomados de [1]. Igualmente, se retomaron los valores de microdureza (480 mediciones) realizados a diferentes distancias de microidentación a partir de la superficie del substrato y los valores de longitud de grieta producidos en los vértices de las indentaciones. Los resultados de la tenacidad a la fractura para las capas de boruros de hierro

fueron obtenidos de la ecuación  $K_c = 0.028 \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{P}{c^{3/2}} \right)$ . Las temperaturas

de tratamiento fueron de 920 y 950°C, con tiempos de 4 y 6 horas y 5 mm de espesor de pasta de boro. Por otro lado, la carga de aplicación en los ensayos de microdureza fue de 200 gramos.

2. El método empleado para la determinación de la tenacidad a la fractura en capas boruradas fue el de redes neuronales artificiales. Con la ayuda del software MATLAB V7.0 se realizó un programa que simuló la red neuronal. Se utilizó una topología de red que cuenta con tres capas. La primera capa corresponde a las entradas, donde se vaciaron los datos de microdureza de la fase  $Fe_2B$  para diferentes distancias de microidentación, y la longitud de grieta correspondiente a cada microidentación. La segunda capa corresponde a la capa intermedia, la cual consta de 5 neuronas. La tercera capa corresponde a la salida, donde se introdujeron los datos correspondientes a los valores de tenacidad a la fractura de la capa. Se construyó una red para cada conjunto de experimentos a las temperaturas de 920 y 950°. Los resultados son obtenidos con la mayor reducción posible, buscando convergencia de la red al realizar el aprendizaje. Para introducir los datos experimentales de aprendizaje a la red, fue necesaria la normalización de los valores.

3. Se realizó la evaluación del modelo de redes neuronales con los valores experimentales de tenacidad a la fractura para el conjunto de experimentos a la

temperatura de 1000°C, con 4 y 6 horas de tratamiento y 5 mm de espesor de pasta de boro. Esta serie de datos no fue utilizada en el diseño del modelo de la red neuronal. La evaluación realizada determina la confiabilidad de la modelación por redes neuronales en los valores de tenacidad de fractura de la capa borurizada.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades del Tratamiento Termoquímico de Borurización.

La borurización es la saturación de boro en la superficie de metales y aleaciones con el fin de elevar la dureza, la resistencia al desgaste, abrasión y corrosión en componentes ingenieriles cuyas aplicaciones industriales requieran la utilización de estas propiedades. Al someter un metal en un ambiente borurante, átomos de boro se difunden en la matriz de la superficie metálica para posteriormente ser absorbidos en los intersticios de la red del solvente [18,36].

La borurización se realiza en mezclas de polvos, sales y óxidos fundidos, medios gaseosos y a base de pastas [18,36,28,29]. La borurización en pasta es un método alternativo de preparación de las muestras cuando se requiere reducir el trabajo manual utilizado en la borurización en polvo, además su ventaja radica en altos volúmenes de trabajo y en tratamientos selectivos [36]. La pasta consta de  $B_4C$  (aproximadamente 76% en peso de boro) y activadores [28], en donde es posible el control del potencial químico de boro de acuerdo al espesor de pasta de boro que recubre la pieza y a la preparación de la pasta que está basado en la relación agua/polvo utilizado. Una atmósfera inerte es necesaria para la utilización de la pasta de boro, estableciendo una combinación de nitrógeno e hidrógeno en una relación de 90:10 ó 95:5 [18, 36, 28]. La atmósfera controlada determina la profundidad de la capa de boruro obtenida, teniendo mayor espesor en comparación con métodos de borurización en polvo. El material a borurar debe contener cierto grado de limpieza antes de ser tratado y debe someterse a temperaturas elevadas entre 700 a 1000 °C, en un rango de tiempo que puede variar desde 1 a 12 horas. Después de borurizar, es necesario templear para tener el endurecimiento del substrato, siendo el medio de temple más idóneo en aceite.

De acuerdo con el diagrama de fases Fe-B (Figura 1.1), el recubrimiento formado puede constar de boruro rómbico FeB con un contenido de boro aproximado del 16% en peso (cuyas dimensiones de la celda unitaria son  $a=0.4053$  nm,  $b=0.5495$  nm,  $c=0.2946$  nm) y boruro tetragonal  $Fe_2B$  con un contenido de boro aproximado del 9% en peso (los parámetros de celda son de  $a=0.5978$  nm y  $c=0.4249$  nm), que forman cristales columnares característicos cuyo crecimiento se da preferencialmente en la dirección cristalográfica [001] debido a que la densidad de los átomos de boro es máximo a lo largo de esta dirección [30,31]. El recubrimiento formado depende del potencial de boro que rodea a la muestra, en donde se ha establecido que con potenciales de boro bajos a intermedios se da un crecimiento preferencial de la fase  $Fe_2B$  [31]. La formación de la fase FeB requiere de un alto potencial de boro, aunado con la influencia de los elementos de aleación que contiene el acero, especialmente con cantidades altas de cromo, níquel y carbono [32].

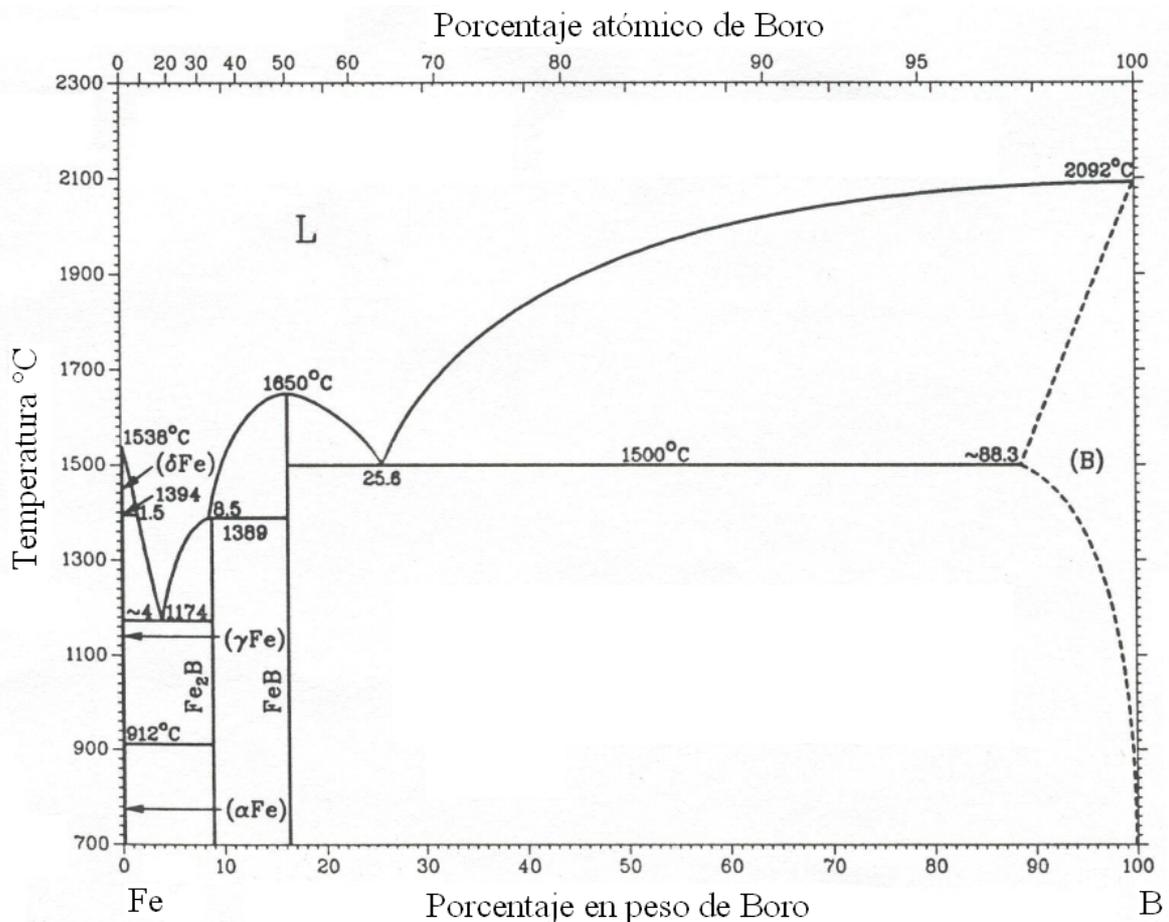


Figura 1.1 Diagrama de fases Hierro – Boro [24]

### 1.1.1 Materiales susceptibles para la borurización

Todos los materiales ferrosos como el acero estructural, los aceros grado maquinaria, los aceros grado herramienta, aceros colados, los hierros y aceros sinterizados, y materiales no ferrosos como el níquel, tungsteno, molibdeno, cobalto y titanio son capaces de ser borurizados.

Debido a que la capa borurada es la que está sujeta al desgaste y no el sustrato, éste debe coincidir en su composición con los siguientes puntos:

- Ser extremadamente duro y resistente al desgaste.
- Tratable térmicamente.
- Tener las características necesarias como alta dureza y por consiguiente alto esfuerzo de fluencia para resistir la aplicación de altos esfuerzos.

Una gran variedad de aleaciones ferrosas pueden ser tratadas con boro y esto da una gran ventaja al proceso ya que se obtienen aceros de mejor calidad para diversas aplicaciones como herramientas de corte, flechas, cojinetes y en general donde se necesite una superficie endurecida y baja fricción. Se utilizan aceros estructurales, aceros templados y revenidos, aceros herramienta, inoxidable, así como hierros de fundición. La figura 1.2 presenta las secciones transversales de aceros borurados estructural AISI 1045 y alta velocidad AISI M2 a la temperatura de 1000°C con tiempo de de tratamiento de 6 horas y espesores de pasta de boro de 3 y 4 mm que rodeó la superficie del sustrato al inicio del tratamiento termoquímico.

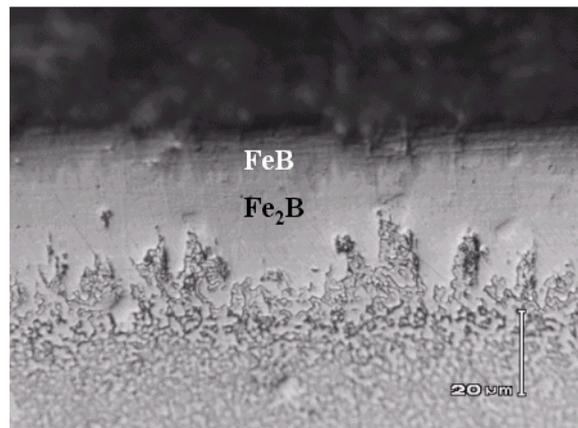
La morfología de las capas es aserrada, en donde el grado de aserración entre la capa y el sustrato depende esencialmente de la cantidad de elementos aleantes que contiene el material, generalmente los aceros de baja y media aleación, generan capas de mayor aserración, en comparación con los aceros de alta aleación, cuyos frentes de crecimiento de las fases boruradas tienden a ser planos [33].

El mecanismo de formación y crecimiento de las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B en hierro ARMCO y aceros de baja y alta aleación ha sido establecido por C. Martini et al. [34]. Su estudio establece que el crecimiento de la fase FeB en la parte más superficial de la muestra, se da como consecuencia de la transformación de cristales de Fe<sub>2</sub>B<sup>1</sup> que se encuentran en esa zona, además de los altos potenciales de boro sobre la superficie. Conforme los tiempos y temperaturas de tratamiento aumentan, las regiones de FeB se hacen mucho más profundas, y crecen a partir de cristales compactos y orientados de Fe<sub>2</sub>B. El crecimiento de las fases se da preferencialmente sobre el plano (002), aumentando el esfuerzo mecánico sobre la interfase FeB/Fe<sub>2</sub>B. En el caso de aceros de alta aleación, el crecimiento de las fases boruradas se da en la misma orientación (002), donde la presencia de los elementos aleantes generan interfases con frentes planos en comparación con aceros de baja aleación y hierro puro, cuyas interfases son aserradas.

Los elementos de aleación, en aceros aleados, se introducen en forma sustitucional y tienden a concentrarse en los extremos de las aserraciones de la capa del boruro formado, reduciendo el flujo de boro activo en esa zona y disminuyendo la columnaridad de los frentes generados en la interfase Fe<sub>2</sub>B/substrato. El mismo fenómeno se presenta en la interfase FeB/Fe<sub>2</sub>B.



(a)



(b)

---

<sup>1</sup> Generalmente, se crea un crecimiento aleatorio y mecánicamente inconsistente de la fase Fe<sub>2</sub>B sobre la superficie de la muestra.

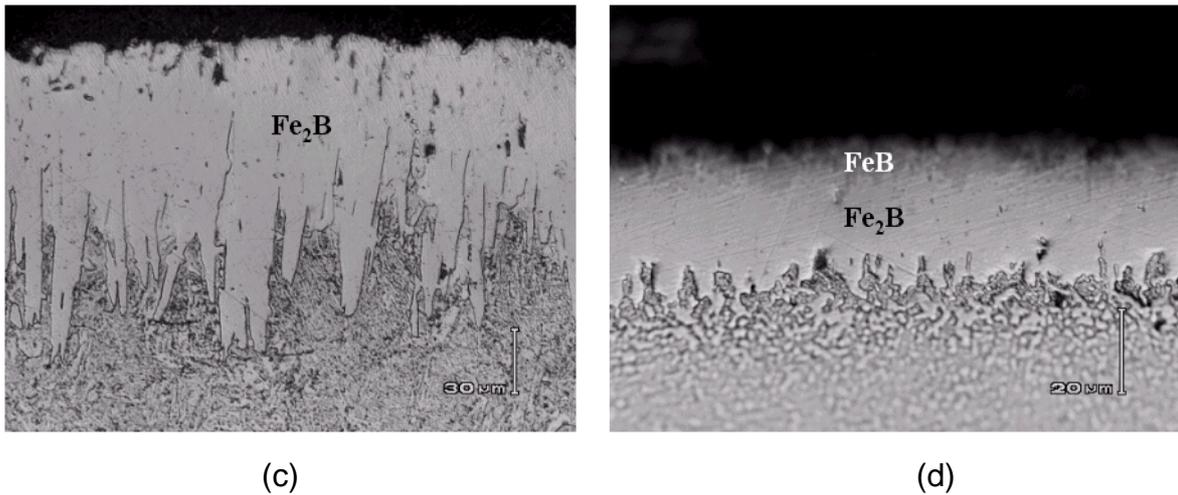


Figura 1.2 Sección transversal de muestras borurizadas (aceros AISI 1045 y AISI M2) tratados a 1000°C con 6 h de tratamiento con espesores de pasta de boro de (a), (b) 3 mm y (c), (d) 4 mm (Cortesía Dr. Iván E. Campos, IPN SEPI-ESIME Zacatenco).

### 1.1.2 Cinética de crecimiento de capas boruradas

El estudio de la cinética de crecimiento de los boruros de hierro ha sido de particular interés durante los últimos 20 años [29-31,33,35]. Conociendo los parámetros cinéticos del proceso, es posible la automatización y optimización del proceso de borurización. El proceso típicamente consiste en dos reacciones. En primer lugar, ocurre la nucleación de las partículas de boro en la superficie del sustrato, y en segundo lugar un proceso difusivo en donde comienza el crecimiento de la capa de boruro de hierro en la superficie metálica. El espesor de la capa crecida dependerá de la temperatura a la que se realice el proceso y del tiempo de tratamiento. El crecimiento de las capas boruradas obedece la ley de crecimiento parabólico:

$$d = k\sqrt{t} \quad (1.1)$$

donde:

$k$  ≡ Constante de crecimiento parabólico [ $m^2/s$ ] que depende de la temperatura

$d$  ≡ Espesor de la capa [ $\mu m$ ]

$t$  ≡ Tiempo [seg.] de difusión.

Por otro lado, el espesor de la capa formada depende de cuatro factores: tiempo de tratamiento, temperatura, composición del sustrato y el potencial de boro que rodea la superficie del sustrato.

La evolución de los frentes de crecimiento de los boruros de hierro se determina por la influencia del espesor de la pasta de boro, que modifica la concentración en la superficie del material y alcanza rápidamente los valores críticos de concentración para la formación de las fases boruradas. La diferencia entre los potenciales de boro utilizados, a temperatura y tiempos constantes, es la generación de capas más compactas y continuas de los boruros conforme se aumenta el espesor de pasta de boro. Asimismo, la dependencia del tiempo y la temperatura en el tratamiento, se refleja en el aumento de la cinética de crecimiento de las fases presentes. Por otro lado, el incremento en el tiempo, temperatura y potenciales de boro reflejan una mayor zona de difusión (o precipitación masiva del boruro de hierro  $\text{Fe}_2\text{B}$  por debajo de las capas).

La figura 1.3 presenta el crecimiento de los boruros de hierro en función del tiempo del tratamiento termoquímico en aceros de alta aleación. Aquí las constantes de crecimiento parabólico para las fases boruradas, son los valores de las pendientes presentadas en la figura 1.3. Estas constantes de crecimiento parabólico dependen de la concentración de boro en la superficie del material, las cuales se modifican con el espesor de pasta de boro e induce el aumento en magnitud de las constantes bajo temperatura constante.

La mayoría de los modelos determinísticos empleados para determinar la velocidad de difusión del boro en las fases presentes en la superficie del material, involucran el perfil de concentraciones entre las interfases de crecimiento contemplando la solución fundamental de la ecuación de transferencia de masa propuesta por Fick, así como las ecuaciones de balance de masa de las fases presentes en el sustrato. Las soluciones que satisfacen los balances de masa en las fases de crecimiento, asumen que las capas boruradas crecen de una forma parabólica y la velocidad de difusión es independiente de la concentración de boro en cada una de las interfases. Por

otro lado, el coeficiente de difusión del boro en las fases  $\text{Fe}_2\text{B}$  y  $\text{FeB}$  en el rango de las temperaturas del proceso, asume un comportamiento tipo Arrhenius, con lo cual es factible predecir la energía de activación del sistema para el fenómeno de difusión. Sin embargo, los modelos determinísticos son sensibles a la medición experimental de los espesores de capa, lo que origina en ciertos casos, una variabilidad del valor del coeficiente de difusión del boro en las fases presentes [35].

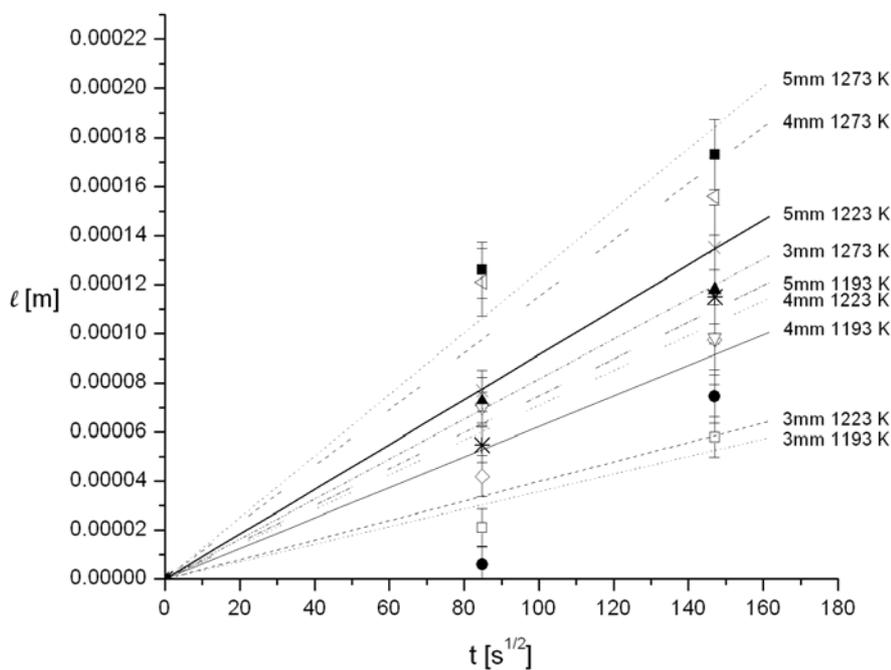


Figura 1.3 Evolución del frente de crecimiento del boruro de hierro  $\text{Fe}_2\text{B}$  en el acero AISI 1045.

### 1.1.3 Dureza de las fases boruradas

El borurizado es un tratamiento con numerosas ventajas sobre otros tratamientos termoquímicos. Básicamente consiste en aumentar en forma drástica la dureza de la superficie del material y en hacer crecer su punto de fusión. La microdureza medida en la escala de Vickers ( $\text{kg}/\text{mm}^2$  ó  $H_v$ ) de los boruros formados en la aleación ferrosa tratada varía entre 1600 y 1900  $H_v$  dependiendo del tipo de material, mientras que la dureza de aleaciones ferrosas nitruradas va desde 650 a 1700  $H_v$ , siendo las durezas para las

aleaciones ferrosas de baja aleación cementadas entre 650 a 950 H<sub>v</sub> [21]. Con esta información, es visible que entre los tratamientos termoquímicos ya mencionados, el borurizado es el que brinda mayor dureza superficial brinda al acero.

La superficie del material borurizado no sólo es atractiva por su alta dureza, sino también por el bajo coeficiente de fricción. Una superficie con estas características permite menos generación de calor y por lo tanto, tenemos un material más resistente a corrosión, desgaste y fatiga. Con esto es posible sustituir algunos materiales de costo elevado por otros de bajo costo con superficies endurecidas ya que las aleaciones ferrosas borurizadas garantizan una mejor y más larga vida útil de componentes mecánicos.

Las pruebas mecánicas que se realizan en las capas boruradas, tradicionalmente, corresponden a ensayos de microdureza conforme a los métodos Vickers o Knoop. Estos métodos de medición de dureza son similares entre sí y exceden a otros en cuanto a su exactitud debido a que son pruebas micrométricas. En el caso del método de microdureza Vickers, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo de 136° entre las cargas opuestas. El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 120 Kg.

Para el caso del método de microdureza Knoop, el indentador tiene forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante, y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1. La forma piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales de 172°30' y ángulos transversales de 130°. La profundidad de impresión es como de 1/30 de su longitud.

Los valores de microdureza en boruros de hierro obtenidos de [23] son aproximadamente: para la capa FeB: 1900-2100 H<sub>v</sub> y para la capa Fe<sub>2</sub>B: 1800-2000 H<sub>v</sub>

#### 1.1.4 Influencia de los elementos aleantes en la borurización

A continuación, se muestran los efectos de los principales elementos de aleación en el crecimiento de las capas boruradas en materiales ferrosos:

- Carbono.- El incremento de carbono en el sustrato, ocasiona una reducción en el espesor de la capa borurada debido al enriquecimiento de carbono en la superficie del sustrato, el cual no es soluble en los boruros.
- Cromo.- Un incremento en el contenido de cromo resulta en un decremento en el espesor de la capa así como en la estructura aserrada.
- Tungsteno, Molibdeno, Vanadio.- Al incrementarse las concentraciones de estos elementos aleantes se produce una reducción en el espesor de la capa borurada y en la estructura aserrada de la misma.
- Manganeso, Níquel.- Estos elementos difícilmente influyen en el crecimiento de la capa. Sin embargo, se puede esperar una caída en el grado de aserración cuando se encuentran presentes en altas concentraciones.

#### 1.1.5 Aplicaciones del tratamiento termoquímico de borurización

La borurización es un método que incrementa considerablemente las propiedades mecánicas, físicas y químicas de la superficie de materiales expuestos a este proceso. En la tabla 1.1 se muestran algunas de las aplicaciones industriales para diferentes tipos de aceros borurizados .

Tabla 1.1. Aplicaciones industriales de diferentes aceros borurizados [26]

<b>ACERO</b>	<b>APLICACIÓN</b>
1015	ejes, engranes y diversos elementos de maquinaria
1045	pernos y discos abrasivos

4140	Pistones
E52100	Cojinetes y guías
D2, D3	bujes y herramientas para estampado
H11, H13	herramientas para moldes de inyección
L6	pernos y dados para forja
O2, O7	Rodillos para grabados
302, 316	partes para la industria química y textil
410	Moldes

## **CAPITULO 2**

### **FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA Y LA APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN CAPAS BORURIZADAS.**

En el presente Capitulo se hace una revisión cronológica de fórmulas propuestas para el cálculo de la tenacidad a la fractura mediante microindentación Vickers en materiales frágiles. Se describen algunas de las ventajas de este método y sus restricciones. Por otro lado, se realiza una breve descripción del uso de las redes neuronales, técnica de la inteligencia artificial, en la solución de problemas de ingeniería y se presentan algunos de los algoritmos más usados en este método.

#### **2.1 Características de la prueba de microindentación Vickers.**

En años anteriores, se ha demostrado interés en determinar la tenacidad a la fractura de materiales frágiles, a través de la medición de la extensión de la grieta asociada con ensayos de microindentación Vickers, debido a la facilidad de preparación de espécimen y a la simplicidad de la prueba.

La aplicación de la prueba de microindentación Vickers para la tenacidad a la fractura en materiales frágiles, particularmente en vidrios y cerámicos, ha tenido una amplia aceptación debido a:

1. Es usada en muestras pequeñas de material, que no servirían para realizar otro tipo de pruebas.
2. La preparación del espécimen es relativamente simple, solo necesita una superficie que sea plana, pulida y reflejante.
3. El indentador Vickers de diamante empleado, es el más duro que se dispone en las maquinas estándar o universales de pruebas de dureza.

4. En muchos casos la longitud de la grieta puede medirse de forma óptica sin ninguna dificultad adicional.
5. Además de ser rápida y de bajo costo.

Las ventajas de la técnica, sin embargo, también son acompañadas por algunas complicaciones como las siguientes:

1. La precisión en la medida de la longitud de la grieta (y por ende, la precisión de la tenacidad a la fractura).
2. La diversidad de ecuaciones reportadas en la literatura para el cálculo de la tenacidad a la fractura por microindentaciones.
3. Las discrepancias reportadas entre la tenacidad a la fractura por indentación de un material y por pruebas convencionales, tales como la prueba de flexión en tres puntos en muestras agrietadas (SENB por sus siglas en inglés).

### **2.1.1 Orígenes de la prueba de tenacidad a la fractura mediante microindentación Vickers**

La extensión radial de una fractura en la superficie de un material, la cual generalmente ocurre cuando materiales no dúctiles son microindentados por un indentador agudo tal como el Vickers o Knoop, fue en un principio reconocido, en el año de 1957 por S. Palmqvist [2-4], como un indicativo de la tenacidad a la fractura del material en cermets tipo WC-Co. Sin embargo, las fracturas radiales en la superficie de materiales alrededor de las microindentaciones Vickers (y que son menos frecuentes alrededor de las microindentaciones Knoop) en materiales frágiles, por ejemplo, vidrios, cerámicos y vidrios cerámicos, fueron generalmente vistas como un parámetro no muy adecuado para pruebas de microdureza. El cambio en este punto de vista se dio fundamentalmente cuando Lawn y su colaboradores [5-7] publicaron su trabajo acerca de los principios de la fractura por indentación en el año de 1975.

Su trabajo resume los resultados de Palmqvist y trabajos posteriores en cermets hasta antes del año de 1975, y en ellos se muestra la necesidad de considerar el estado de esfuerzos en la superficie del material antes de la

microindentación, basado en los datos de las pruebas por microindentación Vickers.

Palmqvist [2] determinó el trabajo realizado cuando un indentador Vickers se desplaza cierta distancia dentro de un material sólido bajo la acción de una carga  $P$  :

$$A = 0.0649(P_K)(P_K / H_V)^{1/2} \quad (2.1)$$

Donde  $A$  es el trabajo crítico requerido para iniciar la fractura alrededor de la indentación Vickers,  $H_V$  es la dureza Vickers y  $P_K$  es la carga crítica requerida para iniciar la fractura.

Sin embargo, es experimentalmente difícil determinar el valor de  $P_K$  de manera precisa. El problema fue resuelto cuando Palmqvist [3,4] observó que la suma de las longitudes de las grietas de las cuatro esquinas de la indentación Vickers  $\Sigma l$  contra la carga  $P$  del microindentador representaba una línea recta:

$$\Sigma l = a_1 P - a_2 \quad (2.2)$$

Donde  $a_1$  es la pendiente y  $a_2$  es la intersección cuando  $P = 0$ . Esta relación lineal fue confirmada por Dawihl y Altmeyer [8]. De esta forma, la carga crítica en el indentador  $P_K$  es dada por la intersección cuando  $\Sigma l = 0$   $P = P_K$ . Palmqvist, sin embargo, fue un paso más allá y redefinió la ecuación (2.1) de la siguiente forma:

$$A_{300} = 0.0649(P_{300})(P_{300} / H_V)^{1/2} \quad (2.3)$$

Donde  $A_{300}$  es el trabajo requerido para generar una suma total de la longitud de grieta de 300  $\mu$ m alrededor de una microindentación Vickers en carburos cementados, y  $P_{300}$  es la carga necesaria en el microindentador, la cual es calculada para un cermet dado usando los valores de  $a_1$  y  $a_2$ .

Para obtener resultados consistentes y reproducibles cuando se emplean las ecuaciones (2.1) y (2.3), las condiciones de la superficie del espécimen tienen

que ser altamente reproducibles y bien definidas debido a que la longitud de grieta es dependiente de las condiciones en la superficie del material [3,4,8]. La dependencia de las longitudes de las grietas radiales superficiales en cermet, con el método usado para la preparación de la superficie antes de ser microindentada, fue analizada por H. Exner [9] en el año de 1969. En su estudio se aclaran las inconsistentes y algunas veces contradictorias explicaciones que había en la literatura para esta dependencia, determinando experimentalmente que las fracturas pequeñas alrededor de la indentación Vickers en la superficie del material, fueron el resultado de esfuerzos residuales de compresión dentro de la fase de cobalto producidos por el desbaste de la pieza en su preparación, y que estos esfuerzos pueden ser removidos por un tratamiento térmico de recocido o pulido. Así, el incremento en la longitud de grieta a una longitud máxima después del recocido o pulido, fue el resultado de la remoción de la capa superficial deformada por el desbaste y por lo tanto, de los esfuerzos residuales superficiales extrínsecos de compresión. H. Exner también concluyó que la existencia de una carga crítica diferente de cero para que el microindentador inicie la formación de una grieta, es un indicativo de la presencia de esfuerzos superpuestos de compresión en la superficie. De esta forma,  $A$  en la ecuación (2.1) no es válida como un parámetro de tenacidad a la fractura y está relacionado por el estado de esfuerzos en la superficie del material.

Así, de acuerdo a la ecuación (2.2) se obtiene:

$$\Sigma l = a_1 P \quad (2.4)$$

y se define un parámetro llamado “resistencia a la fractura”  $W$ , representado por:

$$W = P/\Sigma l \quad (2.5)$$

De acuerdo a la ecuación (2.5),  $W$  es igual a  $1/a_1$  y tiene las unidades de fuerza por unidad de longitud, el cual corresponde a la energía por unidad de área. Además,  $W$  es independiente de la dureza Vickers  $H_V$  y no se especifica una carga crítica experimental, tal como  $P_K$  o  $P_{300}$  de las ecuaciones (2.1) y (2.3), respectivamente.

### 2.1.2 Modelos de tenacidad a la fractura mediante indentación Vickers.

Los numerosos modelos de fractura por indentación reportados en la literatura se clasifican en dos grupos: el primero asume que la forma de la grieta resultante de la microindentación Vickers tiene una forma radial-media bien definida, como se muestra en la figura 2.1 (a) y el segundo grupo asume que se forman grietas radiales tipo Palmqvist como se presenta en la figura 2.1 (b).

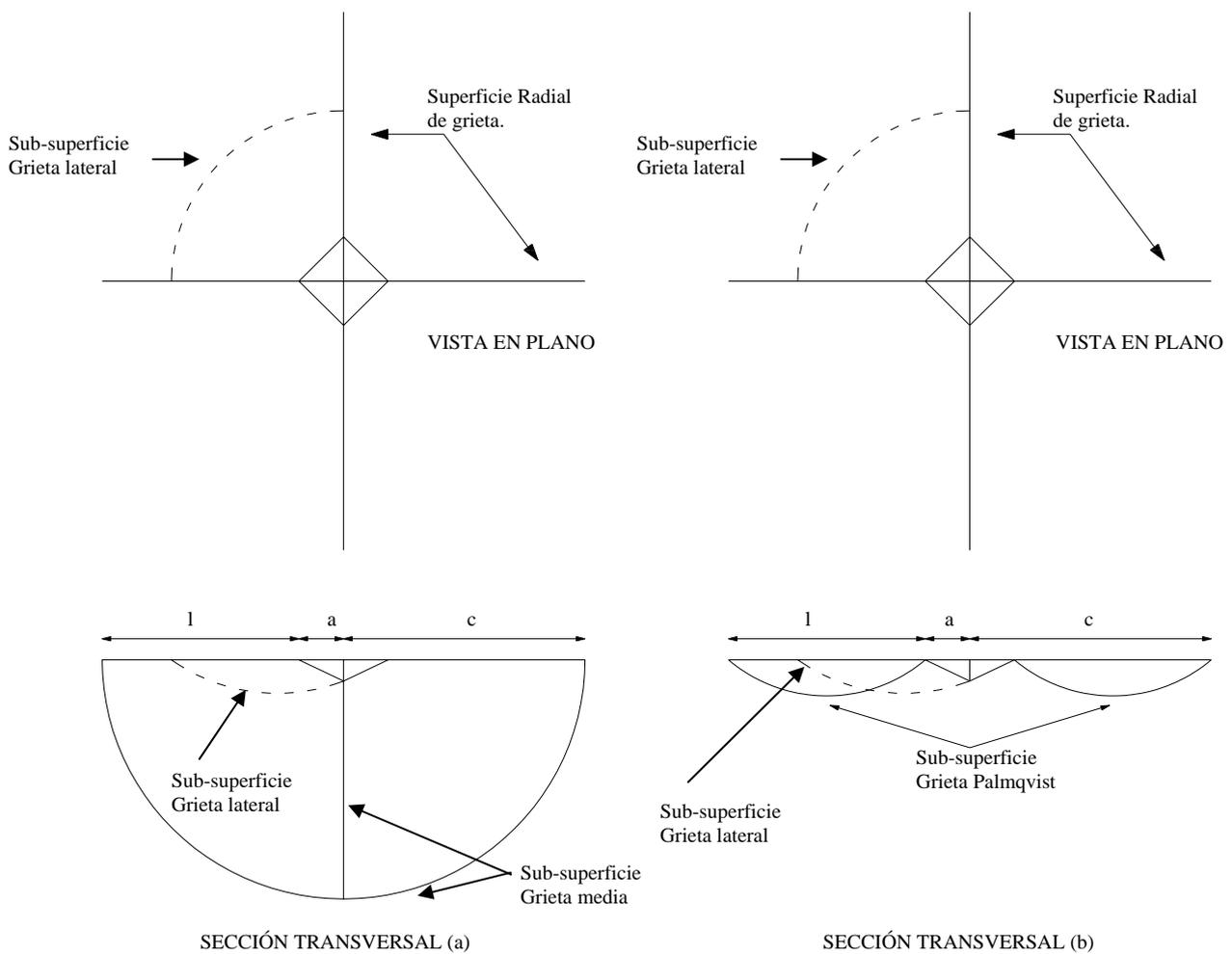


Figura 2.1 Vista en el plano y en sección transversal de un esquema idealizado de una microindentación Vickers de *a* grieta radial-media y *b* una microindentación con un sistema de grieta radial Palmqvist.

A continuación se muestran algunos de los modelos basados en la geometría de grieta radial-media.

### 2.1.2.1 Ecuación de B. R. Lawn y M. Swain (1974)

B. Lawn y M. Swain [5] usaron una aproximación estándar de la mecánica de la fractura bidimensional lineal elástica, basada en la solución de Boussinesq para un campo de esfuerzos en un material isotrópico, lineal elástico, bajo la acción de una carga normal:

$$K_e = \left[ (1 - 2\nu) / 2\pi^{3/2} \right] (HP / D)^{1/2} \quad (2.6)$$

Donde  $K_e$  es el factor crítico de intensidad de esfuerzos para la fractura por indentación,  $P$  es la carga aplicada,  $D$  es la mayor profundidad de la grieta media,  $\nu$  es la relación de Poisson y  $H$  es el contacto principal o presión de indentación ejercida por el indentador Vickers. Nótese que  $H$  es dada por  $P/2a^2$ , donde  $a$  es la mitad de la longitud de la diagonal de indentación, y es independiente de la carga aplicada por el indentador. Por otro lado, la ecuación (2.6) es válida únicamente para  $D \geq 2a$ , donde  $D$  puede ser medida directamente en materiales transparentes. Estudios posteriores [7,12] en vidrio demostraron que  $D \approx c$  (Vea la figura 2.1a, donde  $c$  es la superficie donde es factible medir la longitud de la grieta radial-media). Posteriormente, trabajos en alúmina y vidrios cerámicos opacos [12] indicaron que la sustitución de  $c$  por  $D$  en la ecuación (2.6) es también aceptable en materiales opacos.

### 2.1.2.2 Ecuación de B. R. Lawn y E. Fuller (1975)

B. Lawn y E. Fuller [7] observaron que las forma grietas internas radiales crecen de forma muy parecida a la de la idealización del sistema de grieta radial media durante la descarga (debido a los esfuerzos residuales resultantes de la deformación alcanzada entre la deformación plástica en la zona de microindentación y la matriz del material). Por medio del análisis de la mecánica de la fractura lineal elástica derivaron la siguiente ecuación válida para  $D \geq 2a$ .

$$K_e = \left[ 1 / \left( \pi^{3/2} \tan \Phi \right) \right] \left( P / D^{3/2} \right) \quad (2.7)$$

Donde  $\Phi = \theta \pm \arctan(\mu)$ , y  $\theta$  es la mitad del ángulo del cono del indentador y  $\mu$  es el coeficiente de fricción por deslizamiento entre el indentador y el material. La ecuación (2.7) para un indentador Vickers estándar se reescribe de la siguiente forma.

$$K_e = 0.0515 P / D^{3/2} \quad (2.8)$$

asumiendo  $\mu = 0$  y tomando  $\theta = 74^\circ$  [12].

### 2.1.2.3 Ecuación de A. G. Evans y T. R. Wilshaw (1976)

A. G. Evans y T. R. Wilshaw [13] reconocieron que la indentación en un campo de esfuerzos mediante un indentador agudo es por naturaleza elástico-plástico. Realizando un análisis dimensional de mecánica de fractura de la fractura en la microindentación, y empleando las soluciones para un campo de esfuerzos elástico, modificado por la presencia de la zona plástica en la microindentación, demostraron que en la superficie del material la longitud radial de la grieta  $c$  puede ser relacionada con la mitad de la longitud de la diagonal  $a$  de la indentación por:

$$K_c / \left( \sigma_Y a^{1/2} \right) = F_1(c/a) F_2(r_p/a) F_3(\nu) F_4(\mu) \quad (2.9)$$

Donde  $\sigma_Y$  es el campo de esfuerzos uniaxial,  $r_p$  es el radio de indentación en la zona plástica, y  $F_1, F_2, F_3, F_4$  son funciones empíricamente determinadas. En su trabajo, se asume que  $F_2, F_3$ , y  $F_4$  son constantes y la relación  $c/a$  es una función dependiente de  $K_c / \left( \sigma_Y a^{1/2} \right)$  o  $K_c \phi / \left( H_V a^{1/2} \right)$  debido a  $H / \sigma_Y \equiv \phi$ , donde  $\phi = f(E / \sigma_Y, \nu)$ ,  $H_V = 0.9272 H$ , y  $E$  es el modulo de Young.

Evans y Wilshaw ajustaron los datos de grietas radiales media y los valores de  $K_{Ic}$  obteniendo una ecuación aparentemente válida para  $0.6 \leq c/a < 4.5$ , donde se observa que  $H_V = 0.4636 P / a^2$  y  $\phi = 0.27$ . Las ecuaciones resultantes de este estudio para la tenacidad a la fractura por microindentación son:

$$\begin{aligned}
K_c &= 0.1704(H_\nu a^{1/2}) \log(4.5a/c) \\
K_c &= 0.079(P/a^{3/2}) \log(4.5a/c)
\end{aligned}
\quad (2.10)$$

#### 2.1.2.4 Ecuación de A. G. Evans y E. A. Charles (1976)

La validación de las relaciones propuestas en la ecuación (2.9) fue posteriormente investigada por A. G. Evans y E. A. Charles [14] usando datos de tenacidad a la fractura de la prueba convencional de doble torsión (DT). Los resultados son obtenidos en una atmósfera de nitrógeno para una variedad de materiales cerámicos tecnológicamente importantes. El trabajo de Evans y Charles demuestra que el valor de  $K_c$  disminuye conforme el aumento de la relación  $c/a$ . Asumieron que la influencia del módulo de Poisson  $\nu$  sobre la relación  $c/a$  no es significativa.

Evans y Charles realizaron un análisis dimensional de mecánica de la fractura obteniendo:

$$K_c \phi / (Ha^{1/2}) = F_1(c/a) F_2(E\phi/H) \quad (2.11)$$

La suposición de una función potencial para  $F_2$  estuvo justificada por los datos obtenidos en sus experimentos, que resulta en  $F_2 = (E\phi/H)^{1/2}$  para materiales policristalinos.

#### 2.1.2.5 Ecuación de B. R. Lawn, A. G. Evans y D. B. Marshall (1980)

El modelo elasto-plástico de una fractura por indentación causada por un indentador agudo fue extendido por B. Lawn et al [18], quien resolvió explícitamente el complejo campo de esfuerzos elasto-plástico por debajo de la microindentación a través de la componente de un campo reversible de esfuerzos elásticos, y una componente del campo de esfuerzos residuales irreversibles.

La contribución de la componente elástica a la propagación de la grieta, es pequeña comparada con la componente residual, debido a su naturaleza irreversible.

La componente elástica opera fuera de la zona plástica de la microindentación, causando la propagación de la grieta en la subsuperficie (media), pero suprime la propagación de la grieta en la superficie (radial) durante medio ciclo de carga. La componente residual proporciona la fuerza para continuar con la extensión de la grieta radial-media durante el medio ciclo de descarga, obteniendo el equilibrio con la configuración de la grieta radial media cuando no se aplica carga en el material .

Se observa que la componente de esfuerzos residuales está concentrada en un punto localizado en el centro de la grieta, y la interfase elástica/plástica, actúa como un punto de fuerza para la propagación de la grieta. Además, se asume que el volumen de la zona plástica microindentada, puede ser equivalente al volumen de una cavidad esférica interna presurizada, permitiendo el uso de la solución elasto-plástica de Hills al problema de cavidades esféricas [19].

B. Lawn et al [18] obtuvieron la siguiente relación para la extensión de una grieta radial media:

$$c = \left\{ \Phi_r (\cot \theta)^{2/3} \left[ (E/H)^{1/2} / K_c \right] \right\}^{3/2} P^{2/3} \quad (2.12)$$

Donde  $c$  es la longitud de la superficie radial de la grieta en equilibrio después de ser descargada,  $\Phi_r$  es una constante adimensional independiente del sistema indentador-espécimen y  $\theta$  es la mitad del ángulo característico del indentador. La ecuación (2.12) ha demostrado ser válido para  $c/a > \approx 2$  donde  $c$  es proporcional a  $P^{2/3}$ , y la constante  $\Phi_r$  fue evaluada con  $0.032 \pm 0.002$  usando  $\theta = 74^\circ$  y el cociente  $E/H$  para el vidrio. De este modo, la ecuación (2.12), se reescribió de la siguiente forma:

$$K_c = 0.0139(E/H)^{1/2} (P/c^{3/2}) \quad (2.13)$$

### 2.1.2.6 Ecuación de G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn y D. B. Marshall (1981)

G. R. Anstis et al [21] realizó una evaluación crítica de las técnicas para medir la tenacidad a la fractura por microindentaciones Vickers empleando la ecuación (2.13) en la forma:

$$K_c = \Omega_r (E/H)^{1/2} (P/c^{3/2}) \quad (2.14)$$

Donde  $\Omega_r$  es una constante dependiente del material, evaluada en materiales tales como vidrios cerámicos y cerámicos policristalinos.

### 2.1.2.7 Ecuaciones de T. Laugier (1985)

T. Laugier [27] obtuvo una ecuación modificada de las ecuaciones (2.12) y (2.13) mediante el empleo de la ecuación analítica  $\beta = (E/H)^{1/3}$  (donde  $\beta$  es el tamaño relativo de la zona plástica) siendo resultado de la solución elasto-plástica de Hills expandida para cavidades esféricas [18, 19, 26]:

$$E/H = 9[(1-\nu)\beta^3 - 2(1-2\nu)/3] / [2(1 + \ln \beta^3)] \quad (2.15)$$

donde  $K_c$  se expresa como:

$$K_c = 0.010(E/H)^{1/3} (P/c^{3/2}) \quad (2.16)$$

La constante de calibración de  $0.010 \pm 0.002$  fue evaluada usando los datos de Anstis [21].

T. Laugier uso los mismos datos para calibrar las relaciones de longitud de grieta de Evans y Charles [14]:

$$K_c \propto (E\phi/H_v)^{2/5} (P/c^{3/2})$$

donde el factor de corrección k se establece como:

$$k = K_{Ic} / [(E/H)^{2/5} (P/c^{3/2})]$$

siendo  $k = 0.022 \pm 0.005$ . Así el valor de  $K_c$  se reescribe:

$$K_c = 0.022(E/H_v)^{2/5} (P/c^{3/2}) \quad (2.17)$$

## 2.2 Introducción a la inteligencia artificial.

### 2.2.1 Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales son una muestra del interés humano por emular alguna de las capacidades naturales de los seres vivos. Las redes neuronales biológicas exhiben características importantes que las hacen muy atractivas de imitar; entre estas características se pueden citar las siguientes: *memorización, especialización, paralelismo, robustez, densidad, generalización y aprendizaje.*

Una red neuronal artificial es una aproximación no lineal, y es comparada por muchos autores y expertos con las redes neuronales que conforman el funcionamiento del cerebro humano. Esta comparación se debe a que de cierta forma existen similitudes entre las redes neuronales artificiales y las redes neuronales del cerebro, tales como:

- Cuentan con la capacidad de aprendizaje a partir de la experiencia. Las redes neuronales pueden ser entrenadas para realizar tareas sin la necesidad de programar todas las alternativas.
- Cuentan con una alta velocidad de respuesta una vez entrenadas.
- Cuentan con un alto grado de robustez. El aprendizaje afecta a todas las neuronas, por lo que si algún sector de la red falla, ésta puede seguir dando resultados.

Una neurona artificial es un modelo cuyos componentes tienen analogías directas con una neurona natural. En la Figura 2.2 podemos observar la forma básica de una neurona artificial. Las señales de entrada se representan como  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ . Estas señales son variables continuas y no los pulsos eléctricos discretos que ocurren en el cerebro. Cada una de estas entradas es modificada por un peso, conocido como peso sináptico, cuya función es análoga a la unión sináptica que existe entre las neuronas naturales. Dichos pesos pueden ser positivos o negativos, correspondiendo a la aceleración o inhibición del flujo de las señales eléctricas en el cerebro. La neurona artificial consiste en dos partes: la primera, suma el producto resultante entre las entradas y sus respectivos pesos; la segunda, es un filtro no lineal denominado función de activación, por la que la señal combinada fluye.

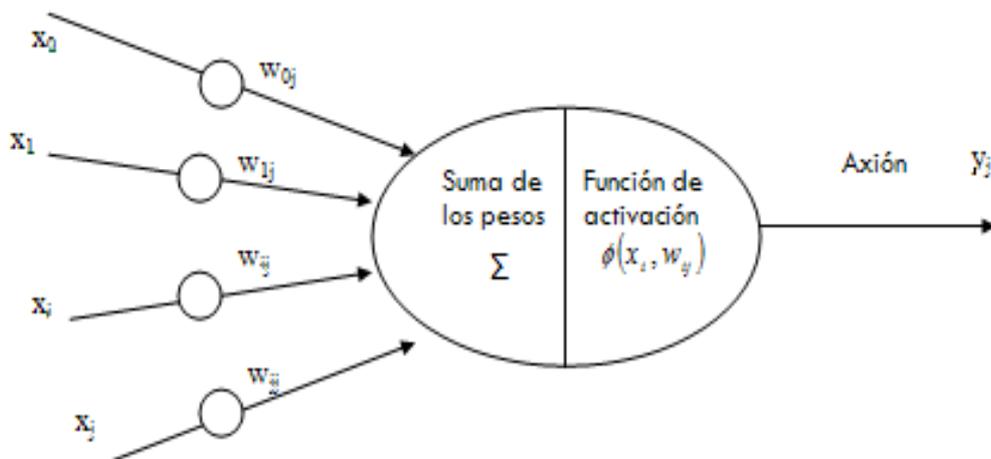


Figura 2.2 Representación esquemática de una neurona artificial.

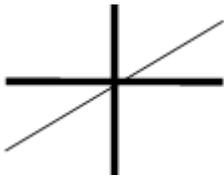
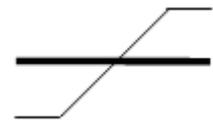
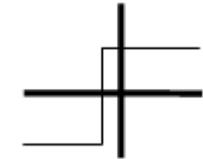
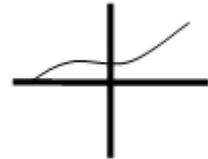
donde:

$$I_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} X_i \dots (2.18) \text{ es la suma de los pesos de la entrada,}$$

$$Y_j = \phi(I_j) \dots (2.19) \text{ es la función de activación,}$$

Existen diversos tipos de funciones de activación. En la tabla 2.1 se observa el tipo de funciones más comunes.

Tabla 2.1 Funciones de activación empleadas en el modelo de redes neuronales.

<p>Función lineal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene una zona lineal.</li> <li>- Se implementa fácilmente.</li> </ul>	<p><math>f(x)=\alpha x</math> donde <math>\alpha</math> es una constante</p>	
<p>Función no lineal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se usa para representar operaciones no lineales simples.</li> </ul>	<p><math>f(x)=</math> 1 si <math>x \geq 1</math> <math>x</math> si <math>x &lt; 1</math> -1 si <math>x \leq -1</math></p>	
<p>Función escalón</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se implementa fácilmente.</li> <li>- Tiene un rango no lineal.</li> <li>- No puede imitar funciones continuas.</li> </ul>	<p><math>f(x)=</math> 1 si <math>x &gt; 0</math> -1 en otro caso</p>	
<p>Función sigmoideal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Es continuamente diferenciable.</li> <li>- Puede realizar decisiones difusas.</li> <li>- No es fácil de implementar.</li> <li>- La salida está limitada a valores positivos.</li> </ul>	<p><math>f(x)= 1/(1+e^{-\alpha x})</math> donde <math>\alpha</math> es un coeficiente de ajuste</p>	

Para entender la forma en que una red puede realizar su aprendizaje, el diagrama de flujo de un programa de entrenamiento para un perceptrón

(neurona conformada por 2 entradas y una salida) es presentado en la Figura 2.3.

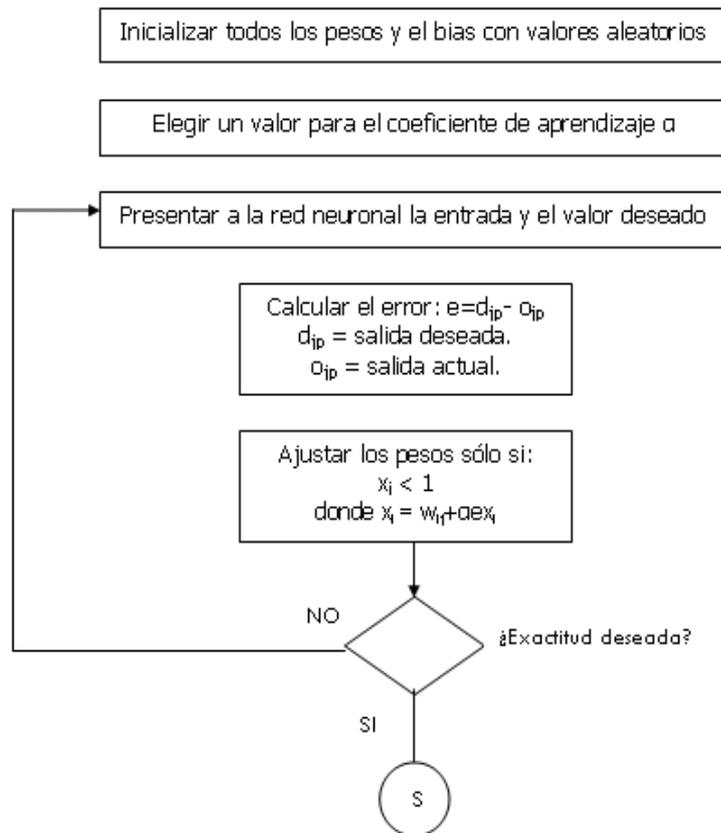


Figura 2.3. Diagrama de flujo para el entrenamiento de un perceptrón.

Entonces una red neuronal artificial está constituida por un largo número de elementos de procesamiento (neuronas artificiales) simples e interconectados entre sí, en una arquitectura inspirada por la estructura neuronal del cerebro. Estas neuronas artificiales están organizadas en capas con conexiones aleatorias o totales entre ellas. En la Figura 2.4 se observa una representación de una red neuronal artificial, la cual está integrada por tres capas: una de entrada, una capa intermedia y una de salida. Cabe destacar que la capa de entrada no es una capa que compute, ya que no cuenta con pesos ni funciones de activación. La capa de salida nos dará la respuesta ante una entrada dada. Las capas intermedias son también llamadas capas ocultas ya que no tienen conexiones con elementos externos.

Durante el proceso de entrenamiento, los datos de entrada son presentados a la red y los pesos son ajustados dependiendo del algoritmo matemático que se esté utilizando. Los algoritmos más comunes son los descritos a continuación:

- *Regla de Hebb*: Esta teoría está basada en la forma en que las neuronas naturales deben de aprender. Hebb utilizó la psicología y fisiología para sugerir que si dos neuronas en ambos lados de la sinapsis disparan un pulso eléctrico, entonces la conexión se fortalece. Se le conoce como la regla Hebbiana, y es considerada como la base de muchas técnicas de aprendizaje dentro de la inteligencia artificial.
- *Regla Delta generalizada*: También conocida como la regla del mínimo error cuadrado medio (LMS por sus siglas en inglés). Esta regla consiste en modificar constantemente la fuerza de las conexiones para reducir la diferencia, o la delta, entre la salida deseada y la salida actual. La técnica de retropropagación del error es la generalización más común de la regla delta.
- *Ley de aprendizaje de Kohonen*: Se aplica solamente para aprendizajes no supervisados. Cada neurona artificial debe de competir por la oportunidad de aprender. La neurona artificial con mayor salida será la ganadora y puede tanto inhabilitar a sus competidoras como excitar a sus “vecinas”. Sólo la ganadora podrá tener una salida y sólo ella y sus vecinas podrán ajustar sus pesos. El tamaño del “vecindario” puede variar, empezando generalmente con un tamaño grande, para luego reducirlo mientras se desarrolla el aprendizaje.

El entrenamiento puede ser supervisado o no supervisado. Durante el entrenamiento supervisado, se presentan las entradas de la red así como las salidas deseadas. La presentación de esta información es continua, para que los valores de los pesos de las entradas se vayan modificando hasta que la diferencia entre la salida deseada y la salida real alcance algún valor predeterminado. Después de cada evaluación del algoritmo de aprendizaje, la diferencia entre la salida actual y la salida deseada es comparada con el valor del error permisible. Si la diferencia es igual o menor al valor del error, entonces el proceso se detiene y se considera que la red está entrenada.

Durante el entrenamiento no supervisado, la salida deseada para una serie de entradas no es presentada. La red neuronal construye modelos internos que capturan regularidades en los patrones de entrada. Es necesario proveer a la

red de datos de entrenamiento que puedan cubrir la extensión del problema, y no caer en ambigüedades. El proceso de entrenamiento es repetido hasta que se alcance algún criterio específico.

La red de retropropagación del error, algunas veces llamada red de perceptrones multicapa, es uno de las estructuras de red más utilizadas. La retropropagación del error es una red multicapa en donde al menos dos de sus capas tienen pesos adaptables. La capa de entrada simplemente distribuye los valores a las capas ocultas. Los elementos de cada capa están conectados totalmente con los de capas anteriores y posteriores. En la siguiente figura podemos observar un tipo de red de retropropagación del error.

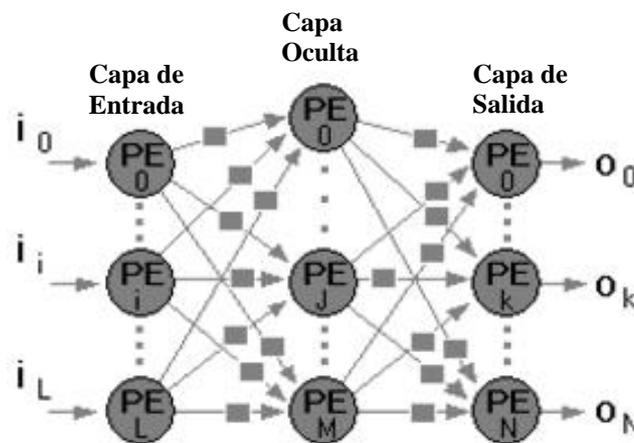


Figura 2.4. Diagrama de flujo para el entrenamiento de un perceptrón.

El entrenamiento de una red de retropropagación del error consiste en dos partes: una propagación hacia delante (también llamada fase de proceso) y una propagación hacia atrás (llamada fase de aprendizaje). Durante la fase de proceso un vector de entrada es presentada a la red. La capa de entrada simplemente pasa las entradas a la primera capa oculta. Cada neurona artificial de la capa oculta realiza la suma de los productos de las entradas por sus respectivos pesos, y pasa el resultado a la siguiente capa. Este proceso se repite hasta que la capa de salida produce un resultado. Durante la fase de aprendizaje, el error de salida es obtenido y propagado hacia atrás a través de las capas predecesoras. Los pesos se ajustan basados en el error calculado.

El algoritmo de una red de retropropagación del error es el siguiente:

- Se inicializan los pesos en valores aleatorios.

- Se presenta el vector de entrada.
- Se calcula la salida para cada neurona artificial de las capas ocultas con la Ecuación 3.

$$o_j = F\left(\sum_{i=0}^L w_{ij} \cdot i_i\right) \dots (2.20) \text{ donde } o_j \text{ es la salida de la neurona artificial}$$

de la capa oculta;  $w_{ij}$  es el peso entre la conexión de una neurona de la capa de entrada con una neurona de la capa oculta;  $i_i$  es la entrada de la neurona de la capa de entrada.

- Se calcula la salida para cada neurona artificial de la capa de salida con la Ecuación 4.

$$o_k = F\left(\sum_{i=0}^M w_{ki} \cdot o_i\right) \dots (2.21) \text{ donde } o_k \text{ es la salida de la neurona artificial}$$

de la capa de salida;  $w_{ki}$  es el peso entre la conexión de una neurona de la capa oculta con una neurona de la capa de salida;  $o_i$  es la salida de la neurona de la capa oculta.

- Se calcula el error para cada neurona artificial en la capa de salida con la Ecuación 5.

$$e_k = (d_k - o_k) \cdot F'\left(\sum_{j=0}^N w_{kj} \cdot o_j\right) \dots (2.22) \text{ donde } e_k \text{ es el error en la capa de}$$

salida,  $d_k$  es la salida deseada.

- Se calcula el error para cada neurona artificial de la capa oculta con la Ecuación 6.

$$e_j = F'\left(\sum_{i=0}^M w_{ji} \cdot i_i\right) \cdot \sum_{k=0}^N (e_k \cdot w_{kj}) \dots (2.23) \text{ donde } e_j \text{ es el error en la capa}$$

oculta.

- Se actualizan los pesos tanto para la capa de salida como para la capa oculta con las siguientes dos ecuaciones.

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \eta e_k o_j \dots (2.24) \text{ para la capa de salida.}$$

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta e_j i_i \dots (2.25) \text{ para la capa oculta, donde en ambos casos } \eta \text{ es el coeficiente de aprendizaje.}$$

Cabe señalar que en ocasiones la red no converge, por lo que es necesario realizar cambios en los parámetros de diseño, como el número de capas, número de neuronas por capa, número de entradas y de salidas, conexiones entre capas, etc.

## **CAPITULO 3**

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS EN CAPAS BORURIZADAS PARA ACEROS ESTRUCTURALES AISI 1045**

La metodología experimental se dividió en tres partes:

- Análisis del proceso experimental de borurización en pasta
- Evaluación de la fractura por microindentación en capas borurizadas.
- Construcción del modelo de redes neuronales

#### **3.1 Proceso experimental de borurización en pasta**

Los parámetros experimentales que deben ser considerados en el proceso de borurización en pasta [1] son los siguientes:

1. Composición química de la pasta de boro
2. Relación agua/pasta de boro
3. Elaboración de los moldes para controlar el espesor de la pasta de boro sobre la superficie del material
4. Geometría de las probetas
5. Tiempo y temperatura de secado de la pasta para eliminar el exceso de humedad
6. Medio donde se lleva a cabo el tratamiento termoquímico (atmósfera inerte).
7. Temperatura del proceso
8. Tiempo del tratamiento
9. Espesor de pasta de boro
10. Composición y constitución físico-químico del sustrato
11. El medio de enfriamiento para el temple de las muestras borurizadas

Se prepararon muestras de acero AISI 1045, cuya composición química es 0.43-0.50% C, 0.6-0.9% Mn, 0.040% P, 0.050% S, las cuales fueron maquinadas y posteriormente recristalizadas durante 1 h a 650°C para eliminar el endurecimiento por deformación producido por el maquinado de las piezas. La relación agua/polvo para la preparación de la pasta se fijó en 0.2. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en moldes de acrílico para la impregnación de la pasta de boro con espesores de 5 mm sobre la superficie de las muestras como se presenta en la Figura 3.1. Se realizaron 2 secados de las muestras impregnadas con pasta de boro a 100°C para eliminar cualquier residuo de agua y posteriormente realizar el tratamiento a 920, 950 y 1000°C durante 2, 4 y 6 h respectivamente. Finalizado el tratamiento, las muestras fueron templadas en aceite y cortadas en su sección transversal para su preparación metalográfica. La caracterización de la fase borurada sobre la superficie de las piezas se efectuó por microscopía óptica utilizando el analizador de imágenes MSQ y por microscopía electrónica de barrido.

La evolución de los frentes de crecimiento de los boruros de hierro se determina por la influencia del espesor de la pasta de boro, que modifica la concentración en la superficie del material y alcanza rápidamente los valores críticos de concentración para la formación de las fases boruradas. La diferencia entre los potenciales de boro utilizados, a temperatura y tiempos constantes, es la generación de capas más compactas y continuas de los boruros conforme se aumenta el espesor de pasta de boro. Asimismo, la dependencia del tiempo y la temperatura en el tratamiento, se refleja en el aumento de la cinética de crecimiento de las fases presentes [4,13-14].

La Figura 3.2 muestra la sección transversal de muestras borurizadas de acero AISI 1045 que fueron expuestas a las temperaturas de 920, 950 y 1000°C durante 6 horas y 5 mm de espesor de pasta de boro. La morfología de la capa de Fe<sub>2</sub>B es de tipo aserrada entre la interfase capa/substrato, característica de aceros de bajo y medio carbono y de hierro puro que son borurizados. Conforme se incrementa los elementos de aleación presentes en el sustrato, la morfología aserrada de la capa disminuye. Por debajo de las capas formadas, existe una zona de difusión presente por la precipitación masiva de boruros de hierro sin coalescerse y dispersos, esencialmente precipitados finos

de la fase  $Fe_2B$ , formando una interfase de coloración oscura con el núcleo del material [15].

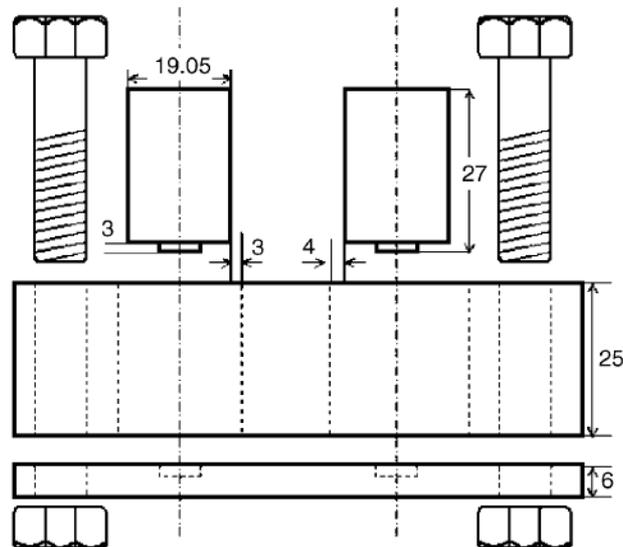


Figura 3.1 Representación esquemática del molde de acrílico y las probetas de acero AISI 1045. Escala en mm. (Tomado de: *Giselle Ramírez Sandoval "Caracterización de grietas autoafines en capas borurizadas para aceros estructurales AISI 1045", Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, SEPI-ESIME Zacatenco, Octubre 2006*)

Los elementos de aleación presentes en aceros de alta aleación como el Cr, W, Mo y V propician la formación de la fase FeB, sin embargo inhiben la cinética de crecimiento de las capas, debido a que estos elementos se introducen en forma sustitucional en los extremos de las aserraciones formadas por las capas, disminuyendo el flujo de boro activo en esas zonas y por ende, la columnaridad de los frentes de crecimiento. El resultado es un frente más plano en comparación con la capa de  $Fe_2B$  formada en el acero 1045. La desventaja en la formación concomitante de las dos fases (FeB y  $Fe_2B$ ) en aceros de alta aleación, es la presencia de esfuerzos residuales de tensión y compresión, promoviendo la formación de grietas en las interfases de crecimiento.

Por ende, en componentes ingenieriles expuestos al proceso de borurización, es deseable una capa monofásica tipo  $Fe_2B$  en lugar de una capa bifásica FeB/ $Fe_2B$ .

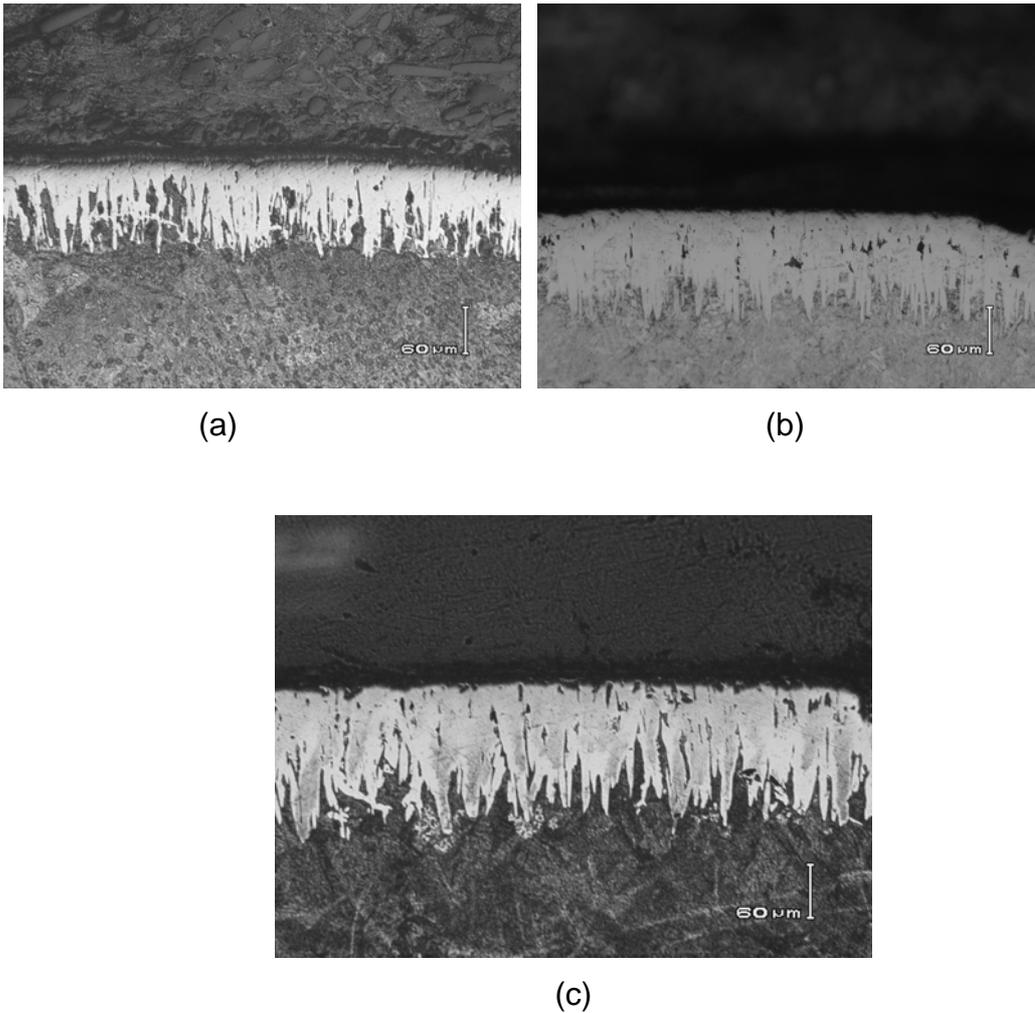


Figura 3.2 Sección transversal de muestras de acero AISI 1045 borurizadas (capa  $Fe_2B$ ) con tiempos de tratamiento de 6 h y 5 mm de espesor de pasta de boro, a las temperaturas: (a) 920°C, (b) 950°C y (c) 1000°C. Magnificación 200x (Cortesía Dr. Iván Enrique Campos Silva, IPN SEPI-ESIME Zacatenco)

### 3.2 Fractura por microindentación en capas borurizadas

Se han realizado diversas investigaciones de las propiedades tribológicas de los boruros de hierro, sin embargo, son pocos los autores que han determinado la tenacidad a la fractura en las fases FeB y  $Fe_2B$ , por medio pruebas de microdureza Vickers [5-9]. Lawn et al. [16-17] propone la teoría de la mecánica de fractura por indentación, sustentándola con un análisis del campo de esfuerzos en el punto de contacto y estableciendo una analogía con el factor de

intensidad de esfuerzos ( $K_c$ ), propio de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (MFLE). El resultado es que el factor residual de intensidad de esfuerzos ( $K_R$ ), equivale al factor crítico de intensidad de esfuerzos, o tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ), para la propagación de una grieta por indentación. La condición prevalece mientras la carga ( $P$ ) y el tamaño de la grieta ( $c$ ) mantengan una relación de equilibrio ( $P \propto c^{3/2}$ ).

$$K_R = \chi \cdot \left( \frac{P}{c^{3/2}} \right) [MPa \cdot m^{1/2}] = K_{IC}, \quad (P > P_c, c > \ell) \quad (3.1)$$

donde  $P_c$  es la carga crítica,  $\ell$  es la longitud del centro de la indentación al vértice de la misma.  $\chi$  es una constante adimensional,  $\chi = 0.028(E/H)^{1/2}$ , siendo  $E$  y  $H$  el modulo de Young y la microdureza Vickers de la fase  $Fe_2B$  respectivamente [5].

Los indentadores agudos (cónico o piramidal) son preferidos para el análisis de la tenacidad a la fractura en materiales cerámicos opacos, porque la presión de contacto es independiente del tamaño de la indentación, y la falla se propaga en los vértices de la impresión residual.

Se recabó la información experimental de las pruebas de microdureza en aceros borurados AISI 1045 [1].

Las pruebas de microdureza Vickers se llevaron a cabo con un microdurometro modelo VHS 1000 en las probetas borurizadas a 920, 950 y 1000°C, durante 6 h y con un espesor de pasta de boro de 5 mm, empleando la norma ASTM E384. Sobre la fase  $Fe_2B$ , se aplicaron 20 mediciones por cada carga de 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 y 1 Kg. a una distancia constante de la superficie ( $35 \mu m$ ), con el objetivo de corroborar la relación  $P \propto c^{3/2}$ . Posteriormente, con el fin de obtener una variación en el tamaño de la indentación y realizar la medición del tamaño de la grieta, se aplicó una carga constante de 200g<sup>1</sup> a distancias de 15, 25, 35 y 45  $\mu m$  sobre la fase  $Fe_2B$ , para el conjunto de experimentos, como se muestra en la Figura 3.3 (a). Se tomaron 120 mediciones por cada distancia, dando un muestreo total de 480 indentaciones.

---

<sup>1</sup> Se seleccionó la magnitud de 200 g porque el tamaño de la indentación permite aplicar cuatro pruebas de microdureza dentro de la fase  $Fe_2B$ , aquí el tamaño de la grieta es visible por microscopia óptica a 1000x.

Para calcular la tenacidad a la fractura, el valor de  $c$  es adquirido experimentalmente con la suma de el promedio de la mitad de la diagonal de la indentación ( $\bar{\ell}$ ), más el promedio de la longitud del perfil de microgrieta ( $\bar{g}$ ) (Figura 3.3 (b)) empleando la herramienta *Measurement Thickness* del software MSQ Plus [11]. Para fines de este estudio, el modulo de Young de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  es de 343 GPa [5,18].

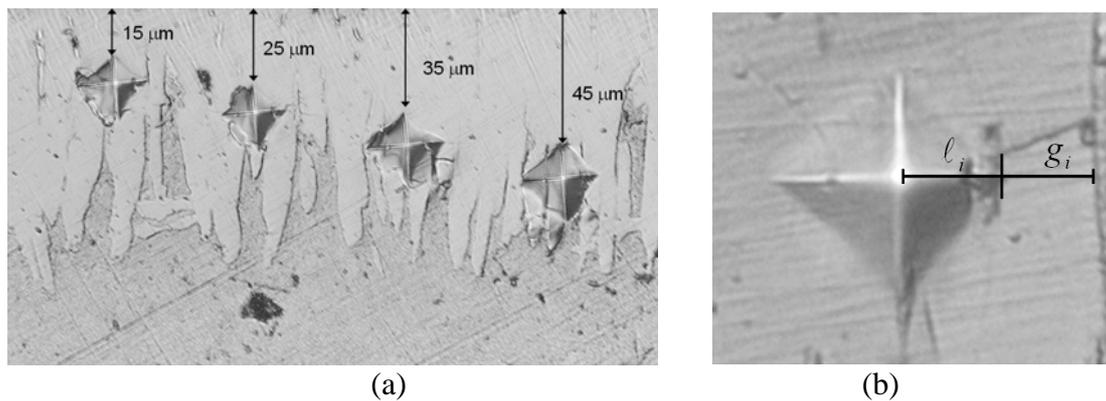


Figura 3.3 (a) Micrografía de la distribución de las indentaciones sobre la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  (500x); (b) Criterio de medición para encontrar el valor de  $c$ , imagen por microscopía óptica (1000x). (Cortesía: Giselle Ramírez Sandoval, IPN-SEPI ESIME Zacatenco)

El perfil de microdurezas con una carga de 200 g, se muestra en la Fig. 3.4. Los valores más elevados se presentan en el espécimen tratado a 1273 K, donde la microdureza presenta una variación mínima en el rango de 15 a 45  $\mu\text{m}$  ( $2255 \pm 42$  HV), debido a la conglomeración de nodos de  $\text{Fe}_2\text{B}$  en esta zona, los cuales están formados por cristales aciculares con diferentes orientaciones de crecimiento y mecánicamente inconsistentes sobre la superficie de la muestra, elevando el esfuerzo en la superficie del material y distorsionando la red cristalina [1,13]. Para las temperaturas de 1193 y 1223 K, la dureza prevalece casi constante hasta 25  $\mu\text{m}$ , porque el tamaño de capa es visiblemente menor en comparación con la obtenida a 1273K.

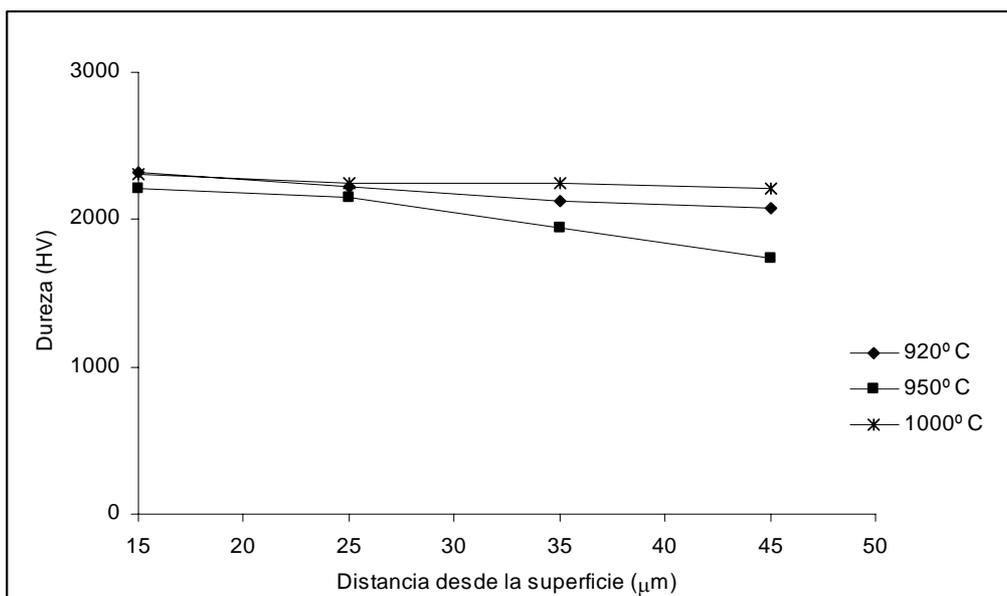


Figura 3.4 Gradiente de microdurezas sobre la capa  $Fe_2B$  formada en la superficie de un acero AISI 1045 borurizado bajo tres temperaturas de tratamiento.

La Tabla 3.1 presenta los valores promedio de la mitad de la diagonal de indentación ( $\ell$ ), longitud de grieta ( $g$ ) y el valor de  $c$  (*suma de  $\ell + g$* ) para el conjunto de experimentos a las temperaturas de 920 y 950°C, durante 4 y 6 h de tratamiento empleando 5 mm de espesor de pasta de boro.

Tabla 3.1 Tamaño de grieta ( $c$ ) promedio por cada distancia desde la superficie hasta la interfase  $Fe_2B$ /substrato.

Distancia desde la superficie	$\bar{\ell}$ ( $\mu m$ )	$\bar{g}$ ( $\mu m$ )	Valor de $c$ ( $\mu m$ )
15 $\mu m$	8.57	7.65	16.22
25 $\mu m$	8.85	7.12	15.97
35 $\mu m$	9.36	6.91	16.27
45 $\mu m$	10.01	6.06	16.12

Los valores de tenacidad a la fractura por microindentación en capas borurizadas  $Fe_2B$  son obtenidas a través de la ecuación (3.1). La Tabla 3.2 presenta los valores promedio de  $K_{IC}$  para las temperaturas de 920 y 950°C.

Tabla 3.2 Valores promedio de tenacidad a la fractura a diferentes distancias de indentación sobre aceros borurizados AISI 1045. Carga 200 g.

Distancia desde la superficie ( $\mu\text{m}$ )	$K_{IC}$ ( $\text{MPa m}^{1/2}$ )	$K_{IC}$ ( $\text{MPa m}^{1/2}$ )
15	3.43	3.44
25	3.52	3.54
35	3.46	3.53
45	3.49	4.09
<b>Temperatura de tratamiento (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>920</b>	<b>950</b>

### 3.3 Modelo de redes neuronales

Tomando en cuenta los valores experimentales de tenacidad a la fractura en capas borurizadas obtenidos en [1], se realizó, con la ayuda del software MATLAB V7.0, un programa que simuló la red neuronal. Se utilizó una topología de red que cuenta con tres capas (Figura 3.5). La primera capa corresponde a las entradas, donde se vaciaron los datos de microdureza de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  para diferentes distancias de indentación, y la longitud de grieta correspondiente a cada indentación. La segunda capa corresponde a la capa intermedia, la cual consta de 5 neuronas. La tercera capa corresponde a la salida, donde se introdujeron los datos correspondientes a los valores de tenacidad a la fractura de la capa. Se construyó una red para cada conjunto de experimentos a las temperaturas de 920 y 950°. La topología de la red neuronal se presente en la Figura 3.5 Los resultados son obtenidos con la mayor reducción posible, buscando convergencia de la red al realizar el aprendizaje. Para introducir los datos experimentales de aprendizaje a la red, se normalización los valores de entrada y de salida de la red neuronal a través de:

$$x_{in}(k) = \frac{x_i(k) - \min_{j=1}^N(x_i(j))}{\max_{j=1}^N(x_i(j)) - \min_{j=1}^N(x_i(j))} \quad (3.2)$$

donde  $x_{in}(k)$  representa los valores normalizados de entrada (longitud de grieta y microdureza con respecto al valor de tenacidad a la fractura de la capa Fe<sub>2</sub>B). La función de activación empleada para cada una de las capas de la red neuronal fue la logarítmica sigmoideal:

$$\log sig(n) = \frac{1}{(1 + \exp(-n))} \quad (3.3)$$

Esta función es una función continua, donde el entrenamiento utilizado es el de retro-propagación del error, cuyo principio emplea una regla delta a través de un gradiente descendiente. Por esta razón, se buscan funciones continuas además de presentar, esta última función, transiciones suaves. La función logarítmica sigmoideal es una de las más utilizadas con estas metodologías de entrenamiento [20].

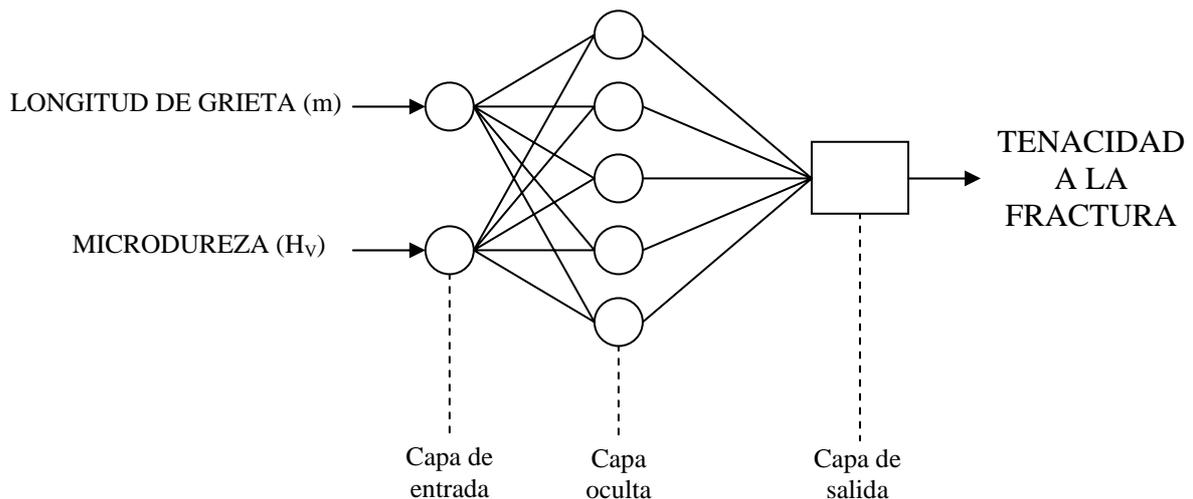


Figura 3.5 Estructura de la red neuronal empleada.

Los modelos de redes neuronales se crearon para cada una de las distancias de indentación conforme a los tiempos y temperaturas de tratamiento. A continuación se presenta el algoritmo del modelo de red neuronal para la temperatura de 920°C con 4 h de tratamiento y una distancia de indentación desde la superficie de 15 μm.

**clear all** (*Este comando limpia la memoria de datos*)

**clc** (*Limpia la pantalla*)

**Entrada** (*en esta sección se ingresan los datos de entrada para entrenar la red.*

*La primera secuencia de números son los valores normalizados de dureza, la segunda secuencia son los valores normalizados de la longitud de grieta)*

```
e= [0.117829028 0.729172695 0.29406832 0.247772829 0.15971845  
0.39155096 0.928320106 0.793039981 0.667656189 0.39155096 0.928320106  
0.608376497 0.496079057 0.608376497 1 0.442892765 0.496079057  
0.667656189 0 0.859379368;  
0.339623 0.503144 0.226417 0.509435 0.672957 0.415093 0 1 0.081761  
0.578614 0.396225 0.150943 0.424526 0.62264 0.207545 0.273586 0.122641  
0.613206 0.537736 0.301887];
```

**Salida Deseada** (*Se ingresan los valores de tenacidad a la fractura que se desean obtener, es conveniente mostrar que todos estos valores no están normalizados, unicamente se dividieron entre un factor de  $1 \times 10^{-7}$  para que su valor fuese menor que 1)*

```
w= [0.369579038 0.247897802 0.474750881 0.25996565 0.201921246  
0.304590546 0.947570618 0.122798409 0.706174511 0.226965031  
0.297114909 0.566120295 0.295144713 0.206069275 0.459757005  
0.413252471 0.627288351 0.207685633 0.255823959 0.367806629];  
t=w; (indica al programa que el valor de w son los valores meta)
```

**Creacion y prueba de la red** (*En la red se ingresan dos vectores con valores entre 0 y 1, hay 2 neuronas de la capa de entrada, 5 en la capa oculta y una en la capa de salida, la función de entrenamiento es la logarítmica sigmoideal y se entrena con el comando "trainlm")*

```
net = newff ([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim (net,e);
```

**Entrenamiento y nueva prueba de la red** (*el entrenamiento termina hasta las 10000 iteraciones, o cuando se alcance el error promedio de  $1 \times 10^{-6}$  entre la salida de la red y el valor de tenacidad a la fractura deseado, cualquiera de los*

dos casos detendrá el entrenamiento, por último la salida se vuelve a su valor original al ser multiplicada por el factor  $1 \times 10^7$ , )

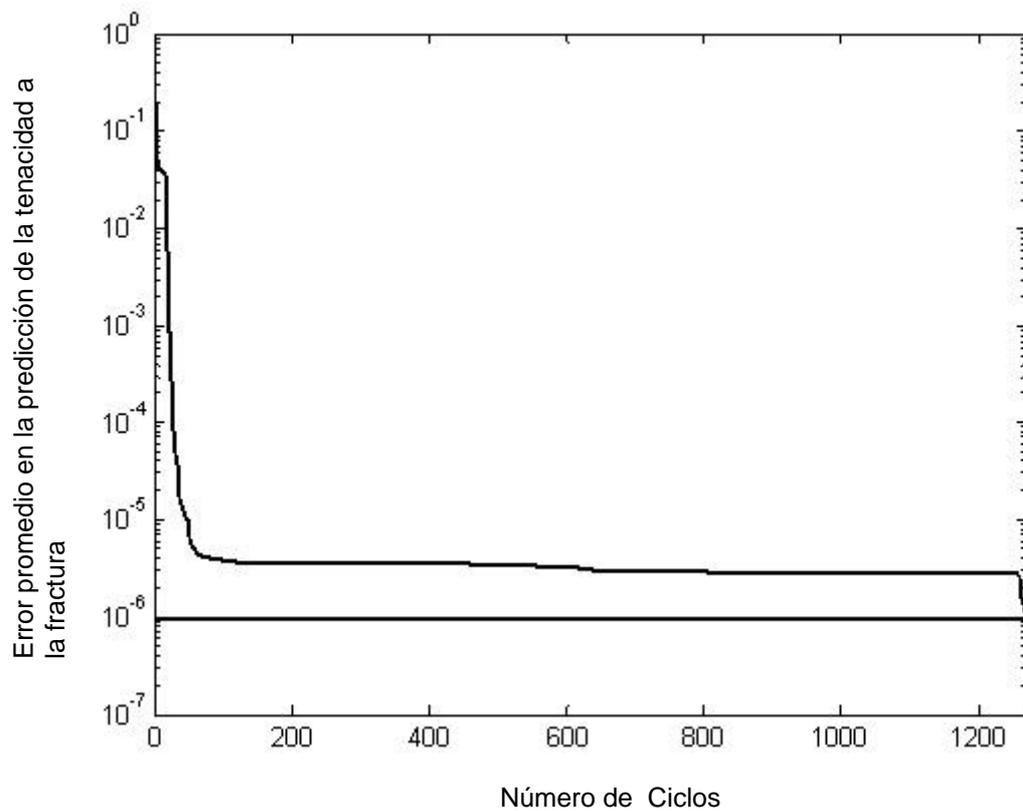
```
net.trainParam.epochs = 10000
```

```
net.trainParam.goal = 1e-6;
```

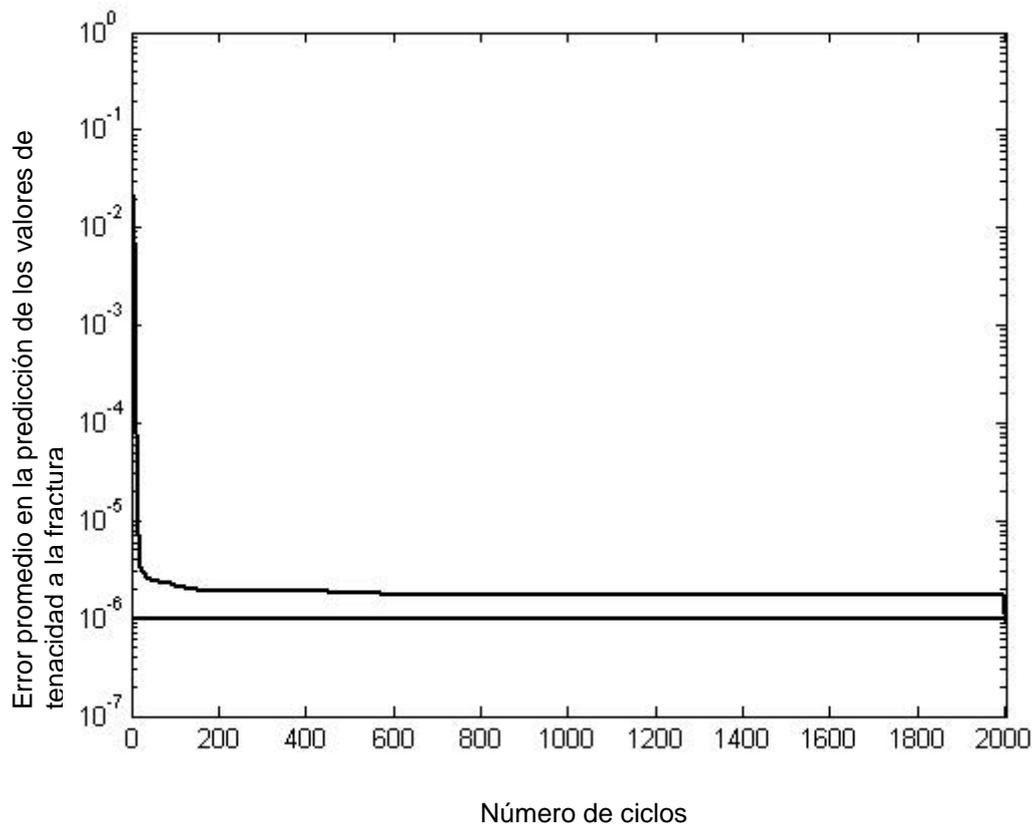
```
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);
```

```
sal=sim(net,e)*1e7
```

La Figura 3.6 muestra el error promedio en la predicción de los valores de tenacidad a la fractura del boruro de hierro  $\text{Fe}_2\text{B}$  en función de los ciclos de entrenamiento de la red neuronal para las temperaturas de 920 y 950°C.



(a)



(b)

Figura 3.6 Dependencia entre el error promedio en la predicción del valor de tenacidad a la fractura de la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  y el número de ciclos de entrenamiento realizados por el modelo de redes neuronales. (a) Temperatura  $920^\circ\text{C}$ , con 4 h de tratamiento y a una distancia de indentación desde la superficie de  $15\ \mu\text{m}$ . Desempeño alcanzado  $9.76084 \times 10^{-7}$ , meta  $1 \times 10^{-6}$ . (b) Temperatura  $950^\circ\text{C}$ , con las mismas condiciones experimentales. Desempeño alcanzado  $8.8831 \times 10^{-7}$ , meta  $1 \times 10^{-6}$

Finalmente, la validación del ciclo de entrenamiento para los valores de tenacidad a la fractura del boruro de hierro  $\text{Fe}_2\text{B}$  respecto a los parámetros de la longitud de grieta producida por la microindentación y la microdureza de la fase borurada, para las temperaturas de  $920$  y  $950^\circ\text{C}$ , son mostrados en las Tablas 3.2 y 3.3. Los valores de salida de la red son menores al 1% de error, lo que garantiza la confiabilidad del modelo de redes neuronales. El conjunto de experimentos restantes en la validación del valor de tenacidad a la fractura son presentados en el Anexo A.

Tabla 3.3 Valores de salida obtenidos por el modelo de redes neuronales a la temperatura de 920°C, 4 h de tratamiento y a una distancia de microindentación de 15  $\mu\text{m}$ .

<b><math>H_V</math> (Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>c</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><math>Kc</math> (MPa*m<sup>1/2</sup>)</b>	<b><math>Kc</math> (MPa*m<sup>1/2</sup>) Salida</b>	<b>% de error</b>
2030	14.8467	3.70	3.6825	0.359608554
2363	18.4209	2.48	2.4905	0.464787417
2126	12.3723	4.75	4.7658	0.385279789
2101	18.5584	2.60	2.6008	0.04398648
2053	22.1326	2.02	2.0159	0.164046985
2179	16.4963	3.05	3.0376	0.272676147
2471	7.42335	9.48	9.4737	0.021171867
2397	29.281	1.23	1.2316	0.294458724
2329	9.21046	7.06	7.0691	0.104151106
2179	20.0705	2.27	2.2703	0.028624947
2471	16.0839	2.97	2.9802	0.304626417
2297	10.7226	5.66	5.6535	0.136065539
2236	16.7025	2.95	2.9476	0.130347314
2297	21.0328	2.06	2.0559	0.232579652
2510	11.9598	4.60	4.5962	0.02979944
2207	13.4033	4.13	4.1362	0.08893564
2236	10.104	6.27	6.2660	0.109734391
2329	20.8266	2.08	2.0748	0.099011866
1966	19.177	2.56	2.5694	0.436253618
2433	14.0219	3.68	3.6781	0.000916459

Tabla 3.4 Valores de salida obtenidos por el modelo de redes neuronales a la temperatura de 950°C, 4 h de tratamiento y a una distancia de microindentación de 15  $\mu\text{m}$ .

<b><i>H<sub>v</sub> (Kg/mm<sup>2</sup>)</i></b>	<b><i>c (<math>\mu\text{m}</math>)</i></b>	<b><i>Kc (MPa*m<sup>1/2</sup>)</i></b>	<b><i>Kc (MPa*m<sup>1/2</sup>) Salida</i></b>	<b><i>% de error</i></b>
1806	35.0547	1.08	1.0808	0.081363212
2198	13.472	4.11	4.1098	0.12537048
2045	16.7713	3.07	3.0590	0.527372367
2126	16.3589	3.12	3.1272	0.319661733
2126	12.5097	4.67	4.6851	0.019696493
2409	18.2834	2.48	2.5057	0.068592615
2198	12.7847	4.45	4.4508	0.264337564
2143	16.4963	3.07	3.0777	0.417951354
2236	14.7092	3.57	3.5821	0.004133466
2236	10.1727	6.21	6.2107	0.35737115
2016	17.1837	2.98	2.9681	0.21566646
2256	13.0596	4.25	4.2499	0.242277964
2363	11.2725	5.18	5.1601	0.560476923
2109	13.472	4.19	4.1932	0.144625009
2217	21.1703	2.08	2.0756	0.211359948
2179	11.135	5.49	5.5059	0.243274627
2016	19.3832	2.49	2.4802	0.25305018
2179	10.7226	5.81	5.8097	0.024952986
2077	13.747	4.10	4.0957	0.70333068
2276	9.760033	6.55	6.5491	0.00896179

# CAPITULO 4

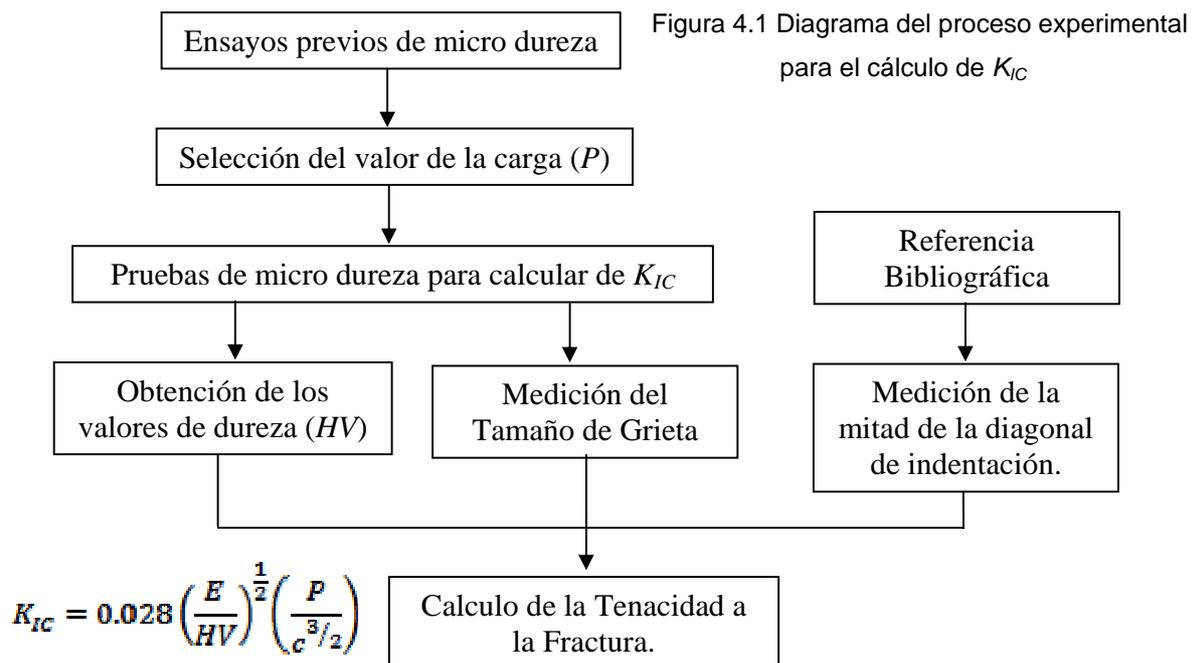
## ANÁLISIS DE RESULTADOS

El Capítulo 4 se divide en dos secciones principales: en la primera parte se realiza la revisión de los valores de tenacidad a la fractura obtenidos experimentalmente a través del modelo de agrietamiento radial-media en aceros borurizados AISI 1045 que han sido presentados por G. Ramírez [1], así mismo, en la segunda parte se analiza el modelo de redes neuronales para la validación de los valores de tenacidad a la fractura obtenidos bajo esta técnica de inteligencia artificial.

### 4.1 Evaluación de la Tenacidad a la Fractura por el Modelo de Grieta Radial–Media.

#### 4.1.1 Calculo de forma experimental del valor de $K_{IC}$ en la fase $Fe_2B$ .

El proceso para calcular el valor de  $K_{IC}$  por indentación implica la aplicación de pruebas estandarizadas de microdureza Vickers, y las mediciones de grietas generadas en escala de micras. En la figura 4.1, se esquematiza el proceso experimental general para calcular la tenacidad a la fractura de la fase  $Fe_2B$  realizado en [1].



#### 4.1.2 Pruebas de microdureza.

La microdureza es influenciada por las siguientes variables durante el proceso de evaluación de las grietas generadas por microindentación y las diagonales de indentación para la obtención de la tenacidad a la fractura bajo esta técnica:

- 1.- La carga aplicada.
- 2.- El tiempo de aplicación de la carga.
- 3.- Distancia entre cada indentación.
- 4.- Alineación de la muestras con respecto a indentador.

Asimismo, la prueba de tenacidad a la fractura por microindentación es un método simple, que requiere únicamente una superficie pulida, además de ser no-destructiva. Los indentadores agudos (cónico o piramidal) son preferidos para el análisis de la tenacidad a la fractura en materiales cerámicos opacos, porque la presión de contacto es independiente del tamaño de la indentación, y la falla se propaga en los vértices de la impresión residual.

La revisión del proceso experimental para la determinación de la tenacidad a la fractura por microindentación se estableció con la finalidad de analizar el comportamiento de  $K_{IC}$  en función de las distancias de indentación a partir de la superficie del substrato. Con esto, se garantizó la obtención de diferentes tamaños de indentación debido a la naturaleza estequiométrica de la fase borurada. Los ensayos fueron realizados con una carga constante de 0.2 Kg a distancias de 15, 25, 35 y 45  $m\mu$  sobre la fase  $Fe_2B$ . El muestreo se realizó en las probetas borurizadas a 920, 950 y 1000 °C, durante 4 y 6h con 5mm de espesor de pasta de carburo de boro. Se tomaron un total de 120 mediciones por cada distancia, dando un total de 480 indentaciones [1]. A partir de estos datos experimentales, se construyó la base de datos con el que se realizó el entrenamiento y validación de la red neuronal.

Los valores de dureza, longitud de grieta y tenacidad a la fractura para las temperaturas de 920 y 950 °C se utilizaron para entrenar la red neuronal.

A continuación en la Figura 4.2 se muestran los perfiles de microdureza obtenidos en [1] para el conjunto de parámetros experimentales realizados en el proceso de borurización en pasta. Por otro lado, los valores de microdureza que se muestran en el Apéndice B fueron normalizados para entrenar a la red neuronal.

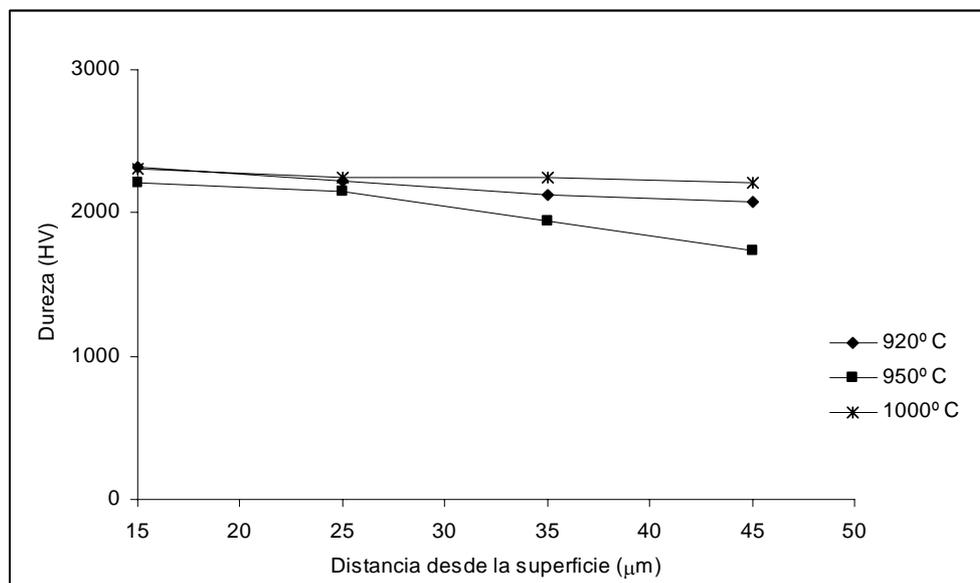


Figura 4.2 Perfil de microdureza a lo largo del espesor de la capa borurada Fe<sub>2</sub>B a las temperaturas de 920,950 y 1000°C.

#### 4.1.3 Medición de la Longitud de Grieta.

Para el cálculo de la tenacidad a la fractura es necesario medir la longitud de la grieta ( $c$ ), a través de la siguiente expresión.

$$c_j = \ell_i + g_i \quad (4.1)$$

Donde  $\ell_i$  es la mitad de la diagonal de la indentación,  $g_i$  es la longitud del perfil de grieta y  $j = 4$  son las distancias desde la superficie hacia el sustrato de la muestra donde se aplicaron las cargas (15, 25, 35 y 45  $\mu m$ ).

En la tabla 4.1 se presentan los valores promedio de la mitad de la diagonal de indentación, la longitud de grieta generada en los vértices de indentación y el valor de  $c = l + g$  para las diferentes distancias de indentación desde la superficie del sustrato.

Tabla 4.1 Valores promedio de  $l$ ,  $g$ ,  $C$  obtenidos a diferentes distancias de indentación sobre la fase de boruro de hierro  $Fe_2B$

Distancia desde la superficie	$a$ ( $\mu m$ )	$g$ ( $\mu m$ )	$c$ ( $\mu m$ )
$15 \mu m$	8.57	7.65	16.22
$25 \mu m$	8.85	7.12	15.97
$35 \mu m$	9.36	6.91	16.27
$45 \mu m$	10.01	6.06	16.12

#### 4.1.4 Determinación del valor de tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) obtenida por el modelo de agrietamiento radial-media para la fase $Fe_2B$

Para la determinación de la tenacidad a la fractura por microindentación de la fase  $Fe_2B$  obtenida sobre la superficie de un acero estructural AISI 1045, se aplicó la ecuación 2.14. El módulo de Young fue obtenido a través de referencias bibliográficas [1], el cual fue establecido en 290 GPa para la fase borurada  $Fe_2B$ .

A continuación en la tabla 4.2 se muestran los valores de tenacidad a la fractura obtenidos para 920 °C, 4 h de tratamiento y 5 mm de espesor de pasta de carburo de boro que rodeó la superficie del acero AISI 1045 antes del tratamiento termoquímico.

Tabla 4.2 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 4 h a una distancia de la superficie de 15 μm, 25 μm, 35 μm y 45 μm

<b>Tenacidad a la fractura (Pa m<sup>1/2</sup>)</b>			
<b>15 μm</b>	<b>25 μm</b>	<b>35 μm</b>	<b>45 μm</b>
3.70E+06	2.95E+06	2.74E+06	4.50E+06
2.48E+06	3.63E+06	3.64E+06	2.88E+06
4.75E+06	5.24E+06	4.60E+06	2.08E+06
2.60E+06	3.50E+06	3.74E+06	3.57E+06
2.02E+06	2.18E+06	2.39E+06	4.73E+06
3.05E+06	2.06E+06	2.71E+06	4.31E+06
9.48E+06	4.86E+06	2.87E+06	4.57E+06
1.23E+06	2.29E+06	3.15E+06	4.39E+06
7.06E+06	4.52E+06	2.91E+06	4.33E+06
2.27E+06	2.83E+06	2.42E+06	2.92E+06
2.97E+06	1.99E+06	3.52E+06	3.24E+06
5.66E+06	2.08E+06	4.04E+06	4.36E+06
2.95E+06	2.98E+06	4.57E+06	4.72E+06
2.06E+06	3.65E+06	3.64E+06	3.98E+06
4.60E+06	3.47E+06	3.41E+06	3.37E+06
4.13E+06	4.03E+06	4.21E+06	5.03E+06
6.27E+06	4.62E+06	2.73E+06	2.92E+06
2.08E+06	5.27E+06	1.75E+06	1.79E+06
2.56E+06	2.45E+06	1.96E+06	4.28E+06
3.68E+06	3.53E+06	2.13E+06	1.68E+06
<b>3.7791E+06 (Promedio)</b>	<b>3.4056E+06 (Promedio)</b>	<b>3.1564E+06 (Promedio)</b>	<b>3.6820E+06 (Promedio)</b>

Se compara la tenacidad a la fractura de la capas Fe<sub>2</sub>B con los valores de tenacidad a la fractura de algunos materiales cerámicos representativos en ingeniería. Estos datos se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores de tenacidad a la fractura de materiales cerámicos importante en ingeniería.

<b>Valores de Tenacidad a la fractura de materiales cerámicos en Pa m<sup>1/2</sup></b>	
Vidrio Pyrex	2.7 – 4.2
Vidrio Cerámico	2.4
TiO	2.5
Alumina	2.7 – 4.2
TiB	6 – 8
Carburo sinterizado	5 – 18
<b>Fe<sub>2</sub>B</b>	<b>3.44 – 3.54</b>

Como podemos observar la tenacidad a la fractura de las capas de boruros poseen una tenacidad a la fractura ligeramente superior a la mayoría de los materiales cerámicos siendo solamente superada por el carburo sinterizado y el TiB. Aquí cabe resaltar, que los valores de tenacidad a la fractura de los materiales cerámicos comparados con el boruro de hierro Fe<sub>2</sub>B no necesariamente fueron evaluados por la técnica de fractura por microindentación, siendo caracterizados por ensayos de flexión en tres puntos con presencia de muesca en la parte central de la probeta.

## 4.2 Validación del modelo de red neuronal.

La retropropagación fue creada a partir de la generalización de la regla de aprendizaje de Widrow-Hoff para redes multicapas y funciones de transferencia no lineales diferenciables. Los vectores de entrada y los correspondientes vectores objetivo son usados para entrenar una red hasta que esta se pueda aproximar a la función. Es decir, se asocian los vectores de entrada con vectores específicos de salida, o de otra manera, se clasifican los vectores de entrada en forma adecuada conforme a los valores que se hayan establecido.

Las redes contienen en una capa sigmoïdal a la funci3n de entrada y una funci3n lineal de salida, las cuales son capaces de aproximar cualquier funci3n con un n3mero finito de discontinuidades.

Hay numerosas variaciones del algoritmo b3sico, las cuales est3n relacionadas y fundamentadas en otras t3cnicas de optimizaci3n. La herramienta de redes neuronales de MATLAB cuenta con varias de estas; en este trabajo, se utilizo el algoritmo de Levenberg-Marquardt, el cual tiene la convergencia m3s r3pida.

Esta ventaja es especialmente notable si se requiere un entrenamiento muy preciso, en muchos casos es capaz de obtener los errores m3s peque1os que cualquier otro algoritmo. Sin embargo, como el n3mero de pesos de la red se incrementa, esto presenta una desventaja para el algoritmo, adem3s, el algoritmo tiene el problema de que en funciones de transferencia no lineales y en redes multicapa introduce demasiados errores m3nimos locales y como el gradiente descendente se compara contra el error m3nimo, es posible que la soluci3n de la red coincida con uno de esos errores m3nimos locales.

Esto puede pasar dependiendo de las condiciones de arranque iníciales. El establecer la soluci3n de la red con un m3nimo local podr3a ser bueno o malo, dependiendo de la cercan3a que tenga este m3nimo local del m3nimo global y que tan bajo sea el margen del error requerido.

En cualquier caso, se debe estar consciente de que a pesar de que sea una red de retropropagaci3n multicapa con varias neuronas, solo puede realizar una funci3n, as3, el m3todo de retropropagaci3n no encuentra siempre los pesos correctos para la soluci3n optima, siendo necesario reiniciar la red varias veces para garantizar que se ha encontrado la mejor soluci3n.

Por otro lado, la red tambi3n es sensible al n3mero de neuronas en la capa oculta. Muy pocas neuronas pueden hacer que no se ajusten los valores de salida.

Demasiadas neuronas pueden contribuir al sobre ajuste, en el cual todos los puntos de entrenamiento tienen un buen ajuste, pero la curva de ajuste tiene oscilaciones bruscas entre estos puntos.

La programación se realizó en MATLAB el cual presenta una herramienta de programación de redes neuronales, la cual es muy amigable a la hora de realizar la programación de la red, pero tiene la desventaja de que el entrenamiento de la red se tiene que realizar de forma manual con cada grupo de datos, siendo necesario realizar 16 programas de entrenamiento para la red, y en cada uno, entrenarse hasta generar la curva de entrenamiento más continua posible.

A continuación en las tablas 4.4 y 4.5 se muestran los datos experimentales del acero AISI 1045 borurizado a 1000 °C durante 4 y 6 h [1]. Los datos de tenacidad a la fractura de las tablas 4.4 y 4.5 se comparan con los valores de tenacidad obtenidos por el modelo de redes neuronales (tablas 4.6 y 4.7), el cual fue entrenado previamente. Cabe resaltar, que los datos experimentales son datos externos al entrenamiento de la red.

Tabla 4.4 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
1.41E+06	3.45E+06	2.65E+06	2.93E+06	1.92E+06
3.32E+06	2.28E+06	4.65E+06	2.93E+06	2.65E+06
5.30E+06	5.45E+06	5.33E+06	1.76E+06	1.82E+06
2.88E+06	3.94E+06	2.68E+06	2.24E+06	1.39E+06
5.23E+06	5.09E+06	2.45E+06	3.21E+06	2.17E+06
1.28E+06	5.37E+06	4.13E+06	2.40E+06	3.33E+06
4.16E+06	5.50E+06	5.42E+06	1.80E+06	2.68E+06
3.01E+06	2.51E+06	2.58E+06	3.69E+06	4.95E+06
2.03E+06	2.42E+06	3.85E+06	3.39E+06	1.83E+06
4.69E+06	2.82E+06	3.22E+06	4.06E+06	1.28E+06
4.12E+06	3.10E+06	4.91E+06	3.11E+06	3.26E+06
4.53E+06	2.97E+06	4.45E+06	2.63E+06	1.95E+06
1.87E+06	1.70E+06	1.49E+06	2.69E+06	7.36E+06
2.83E+06	2.33E+06	2.90E+06	3.05E+06	3.89E+06

2.69E+06	3.23E+06	2.90E+06	4.12E+06	2.51E+06
3.83E+06	3.22E+06	3.87E+06	5.61E+06	3.52E+06
3.14E+06	4.63E+06	2.01E+06	2.91E+06	3.54E+06
3.82E+06	1.92E+06	1.36E+06	1.25E+06	4.73E+06
1.47E+06	3.11E+06	3.33E+06	3.56E+06	3.57E+06
4.03E+06	1.31E+06	2.41E+06	3.53E+06	2.92E+06
<b>3.2806E+06 (Promedio)</b>	<b>3.3183E+06 (Promedio)</b>	<b>3.3289E+06 (Promedio)</b>	<b>3.0435E+06 (Promedio)</b>	<b>3.0643E+06 (Promedio)</b>

Tabla 4.5 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
3.53E+06	3.82E+06	6.35E+06	4.55E+06	3.94E+06
5.81E+06	3.34E+06	3.74E+06	5.49E+06	3.33E+06
4.06E+06	3.35E+06	2.92E+06	5.04E+06	4.29E+06
3.23E+06	3.66E+06	4.26E+06	3.40E+06	4.01E+06
3.26E+06	3.11E+06	4.93E+06	2.86E+06	4.14E+06
3.57E+06	2.23E+06	3.32E+06	3.38E+06	1.86E+06
3.82E+06	2.50E+06	2.74E+06	3.59E+06	4.42E+06
2.70E+06	4.30E+06	3.04E+06	3.57E+06	2.59E+06
1.41E+06	4.27E+06	2.76E+06	2.97E+06	4.39E+06
4.32E+06	3.91E+06	3.02E+06	3.35E+06	2.09E+06
3.28E+06	8.81E+05	2.17E+06	3.59E+06	1.21E+06
3.41E+06	6.14E+06	5.18E+06	2.78E+06	3.32E+06
2.00E+06	3.24E+06	4.11E+06	5.20E+06	3.79E+06
5.00E+06	4.38E+06	2.24E+06	5.91E+06	5.85E+06
3.26E+06	2.97E+06	2.46E+06	2.17E+06	2.17E+06
2.91E+06	3.88E+06	3.84E+06	3.11E+06	3.06E+06
4.52E+06	3.23E+06	3.66E+06	2.76E+06	3.03E+06
2.52E+06	4.46E+06	5.95E+06	1.71E+06	2.26E+06
3.90E+06	3.00E+06	2.94E+06	3.49E+06	3.03E+06
4.05E+06	3.66E+06	3.11E+06	2.21E+06	4.27E+06
<b>3.5292E+06 (Promedio)</b>	<b>3.5167E+06 (Promedio)</b>	<b>3.6373E+06 (Promedio)</b>	<b>3.5572E+06 (Promedio)</b>	<b>3.3527E+06 (Promedio)</b>

Tabla 4.6 Tenacidad a la fractura obtenida mediante el uso de redes neuronales para probetas borurizadas a 1000 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN MPa m<sup>1/2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
1.4798	3.5065	2.5069	2.9037	2.0902
3.5902	2.3239	4.4646	3.1563	2.4562
5.8499	5.4749	5.076	2.0848	2.0386
2.7819	3.931	2.4802	2.4158	1.412
5.6702	5.1441	2.3714	3.1592	2.1744
1.121	5.6066	3.9734	2.5159	2.9536
4.3043	5.5422	2.8531	2.095	2.4245
3.0986	2.622	2.4367	3.5704	4.1345
2.2172	2.4372	3.7615	3.4492	2.0431
5.1181	2.8514	3.1148	4.0124	1.1582
4.2233	3.0887	4.9168	3.1065	2.8869
4.8132	2.9152	4.3794	2.7129	2.1001
2.0419	1.9026	1.5174	2.7725	5.6891
2.8297	2.3948	2.8074	2.9981	3.3987
3.0265	3.2786	2.9407	4.4612	2.3875
3.9207	3.1925	3.7883	5.2993	3.1106
3.2045	4.5703	2.1068	2.8774	3.1073
4.2734	2.1247	1.1167	1.2983	4.0054
1.7767	3.086	3.2758	3.5032	3.1826
4.1152	1.2056	2.3671	3.7149	2.6386
2.9012	2.9128	2.7485	2.8259	2.4292

Tabla 4.7 Tenacidad a la fractura obtenida mediante el uso de redes neuronales para probetas borurizadas a 1000 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN MPa m<sup>1/2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
3.5287	3.935	7.389	4.9191	3.7606
6.0844	3.7236	3.4711	6.8606	3.3877
3.9968	3.6985	2.423	5.9754	4.3513
3.1816	3.9676	3.9566	3.4851	3.8125
3.2644	3.8772	5.0437	2.8172	3.8778
3.5534	2.7581	2.8892	3.483	2.1802
3.7739	3.0493	2.2537	3.7625	4.229
2.7195	4.4971	2.4049	3.7395	2.6011
1.162	4.3817	2.0764	2.8239	4.3226
4.1903	4.4484	2.5923	3.4334	2.1972
3.2274	1.0573	1.7094	3.7052	1.1816
3.2986	5.8601	5.0814	2.6886	3.3576
2.0249	3.779	3.7356	6.0517	3.5976
5.0717	4.4995	1.3915	7.4065	5.076
3.2005	3.5771	2.0476	1.9781	2.2544
2.7356	4.1425	3.4805	3.0931	2.9841
4.3932	3.6149	3.1045	2.5476	3.0482
2.3179	4.5029	6.2863	1.1131	2.3994
3.7993	3.6492	2.3163	3.6271	3.1379
4.1253	3.9676	2.6259	2.0584	4.1574
3.1618	3.5838	2.8637	2.5836	2.9916

Las tablas 4.8 y 4.9 contienen los porcentajes de error de de cada uno de los valores obtenidos a través de las redes neuronales al ser comparados con los valores experimentales de tenacidad a la fractura de la fase Fe<sub>2</sub>B, el error se calcula mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ de error} = (1 - \text{Medida experimental} / \text{Media por la red neuronal}) \times 100\% \quad (4.2)$$

Tabla 4.8 Porcentaje de error al comparar los valores de tenacidad a la fractura obtenida por mediciones experimentales contra los valores obtenidos por la red neuronal, para probetas a borurizadas a 1000 °C durante 4 h a una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm

Porcentaje de error %				
4.977459409	1.549411687	5.686281476	0.741260422	8.135811604
7.547862165	1.700741966	4.054031211	7.178355958	8.093645232
9.40413752	0.49280073	4.97880714	15.58310091	10.60239015
3.510462714	0.342614583	8.199878967	7.230684945	1.646416876
7.801841503	1.075880885	3.267574578	1.691710121	0.184943426
13.79070636	4.231205891	4.011046935	4.550879012	12.84716313
3.410999642	0.71633579	90.07814367	14.12242888	10.46252856
2.722430636	4.215113933	5.752916619	3.379453227	19.8092899
8.589302901	0.603059974	2.453286979	1.579514152	10.38167986
8.42369984	1.073357384	3.35000347	1.270199411	10.35512172
2.56007919	0.224785339	0.132029758	0.018783191	12.79108979
5.98413281	1.905836066	1.510303347	3.092942555	6.954746529
8.488932486	10.59910624	1.992742268	2.979007091	29.39595378
0.135892271	2.544934402	3.288167669	1.66131707	14.57865557
10.97393578	1.440376154	1.516112948	7.658377371	5.290116293
2.388615412	0.751304196	2.165882236	5.820277667	13.27423414
1.890640229	1.34617798	4.518383461	1.171108809	13.89984578
10.56456289	9.528339713	21.74409472	3.842727361	18.04945354
17.45636225	0.683198309	1.66189791	1.526179781	12.13269967
2.08967977	8.809364698	1.603993742	4.873222048	10.53255763
13.07622324	13.92193387	21.11616293	7.699374939	26.1455815
<b>6.635586788</b>	<b>2.691697296</b>	<b>8.598278955</b>	<b>4.498576499</b>	<b>11.47091716</b>

El error promedio de los valores de salida en comparación con los valores experimentales de tenacidad a la fractura es del 6.77%.

Tabla 4.9 Porcentaje de error al comparar los valores de tenacidad a la fractura obtenida por mediciones experimentales contra los valores obtenidos por la red neuronal, para probetas a borurizadas a 1000 °C durante 4 h a una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm

Porcentaje de error %				
0.124058348	2.895282268	14.00814592	7.547386265	4.889330938
4.472519692	10.22803648	7.854597073	19.943093	1.581304753
1.665469405	9.449993527	20.62624522	15.63193916	1.333011698
1.61512945	7.750324711	7.685868529	2.310449671	5.065858178
0.214134121	19.81749654	2.172463854	1.626084959	6.669998272
0.393880346	19.23889496	14.80005099	3.014385519	14.889396
1.224697032	18.11264852	21.76207953	4.577950807	4.503206687
0.600013986	4.411484291	26.34407353	4.566511572	0.464585104
21.74517483	2.622613085	32.81512106	5.200571302	1.636930975
3.103413027	12.07950283	16.5024649	2.397196717	4.708272658
1.494359385	16.63854374	26.78464662	3.115020643	2.064079592
3.412013489	4.75020701	1.911969505	3.311557402	1.143178087
1.012323869	14.14482365	9.959460259	14.01890518	5.319749158
1.429524214	2.69057829	60.91760473	20.16490587	15.30098488
1.909243729	16.96072446	20.15725043	9.49847933	3.779345966
6.415319669	6.290997891	10.2440838	0.485132388	2.642005643
2.872804482	10.6015989	17.91732757	8.475278127	0.548218568
8.684648962	0.955139042	5.315172495	53.97373987	5.980947663
2.747698186	17.67851532	26.89254307	3.678623356	3.3372324
1.739550767	7.750324711	18.45403753	7.256845973	2.681121721
11.61957529	1.872965605	27.01255863	37.6851143	12.06972758
<b>3.343798849</b>	<b>10.25338651</b>	<b>18.15626033</b>	<b>9.539702855</b>	<b>4.426937947</b>

El error promedio de los valores de salida en comparación con los valores experimentales de tenacidad a la fractura es del 9.14%..

Es factible establecer que los porcentajes de error entre la  $K_{IC}$  calculada experimentalmente y la  $K_{IC}$  obtenida mediante la red, se deben a que el algoritmo utilizado para el entrenamiento de la red no siempre calcula los pesos óptimos lo cual puede inducir errores a la salida, incrementando los porcentajes de error en algunas distancias de microindentación.

## CONCLUSIONES

La determinación de la tenacidad a la fractura de capas de boruros de hierro  $\text{Fe}_2\text{B}$ , obtenida a través del proceso de borurización en pasta sobre la superficie de aceros estructurales AISI 1045, ha sido evaluado mediante la técnica del modelo de redes neuronales empleando el método de retro-propagación del error utilizando el software MATLAB V 7.0. La base de datos para el entrenamiento de la red neuronal fue soportada por los datos experimentales del tratamiento termoquímico a las temperaturas de 920 y 950°C, con un tiempo de 4 y 6 h y un espesor de capa de carburo de boro de 5mm que rodeó a la superficie del substrato antes del tratamiento. Asimismo, la validación del modelo de redes neuronales para la obtención del valor de  $K_{IC}$  se realizó con datos experimentales externos al entrenamiento de la red, a la temperatura de 1000°C con 4 y 6 h de tratamiento y 5 mm de espesor de pasta de carburo de boro.

Se asumen las siguientes conclusiones:

a) Las microgrietas sobre la superficie de la capa  $\text{Fe}_2\text{B}$  se generaron a través de ensayos de microindentación Vickers con una carga constante de 0.2 kg., variando las distancias de aplicación de carga entre 15 – 45  $\mu\text{m}$  desde la superficie hasta la interfase  $\text{Fe}_2\text{B}$ /substrato. Sin embargo, la implementación del modelo de grietas tipo radial-media para la determinación del valor experimental de tenacidad a la fractura puede estar en duda, debido a que las grietas tienden a iniciarse en forma superficial en los vértices de la microindentación sobre la fase borurada. Es factible, utilizar modelos de agrietamiento alternativos para el cálculo de  $K_{IC}$ . Por otro lado, al tratarse el boruro de hierro  $\text{Fe}_2\text{B}$  como una fase intermetálica estequiométrica, los valores de dureza a lo largo del espesor de capa de la fase borurada no son constantes, modificando el valor de la tenacidad a la fractura a las diferentes distancias de la superficie donde se realizaron las microindentaciones.

b) El modelo de redes neuronales fue construido a través del software MATLAB V7.0, tomando como valores de entrada la microdureza de la fase borurada y la

longitud de grieta producida por la indentación Vickers, y como valor de salida, el factor de intensidad de esfuerzos crítico ( $K_{IC}$ ). El método empleado de aprendizaje para la red neuronal fue el de retro-propagación del error, donde se ajustan el valor de los pesos que conectan cada una de las neuronas reduciendo el error entre los valores producidos por la red y los valores reales. La función de activación empleada para cada una de las capas de la red neuronal fue la logarítmica sigmoideal; ésta es una función continua, donde el entrenamiento utilizado es el de retro-propagación del error, cuyo principio emplea una regla delta a través de un gradiente descendiente. Por esta razón, se buscan funciones continuas además de presentar, esta última función, transiciones suaves. La función logarítmica sigmoideal es una de las más utilizadas con estas metodologías de entrenamiento.

c) Durante el entrenamiento de la red con la base de datos experimentales, se buscó que el error existente entre los valores de salida que produce la red, con los valores de salida reales convergiera a  $1 \times 10^{-6}$ . Para llegar a esta convergencia, se determinó como máximo 1200 iteraciones del entrenamiento de la red. Si la convergencia no se obtenía en menos de las iteraciones deseadas, era necesario reiniciar los valores de la red y volver a realizar el entrenamiento. Los datos obtenidos por el entrenamiento de la red en comparación con los datos experimentales de la tenacidad a la fractura de la fase Fe<sub>2</sub>B fueron en promedio menores al 1%.

d) La principal ventaja de esta técnica de inteligencia artificial, es su aprendizaje conforme se presenta la información. La red realiza las inferencias y los ajustes pertinentes para reproducir de la manera más fiel posible, los resultados del proceso original. La capacidad de autoaprendizaje de la red neuronal es una gran ventaja, ya que dependiendo de los parámetros de proceso (como el número de iteraciones y el error de convergencia de la red), esta es capaz de auto ajustarse, modificando los pesos entre neuronas hasta que los resultados cuenten con el error deseado.

e) La validación del modelo de redes neuronales en la determinación del valor de tenacidad a la fractura (con datos externos al entrenamiento) fueron en promedio del 6.77% para el acero borurado AISI 1045 a la temperatura de 1000°C con 4 h de tratamiento y 5 mm de espesor de pasta de carburo de boro, y del 9.14% para la muestra con la misma temperatura de tratamiento y espesor de pasta y 6 h de tiempo de tratamiento. Por otro lado, la desventaja de este modelo, es que los datos experimentales de  $K_{IC}$  no pueden ser validados fuera del rango de experimentación.

## RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

1. Evaluar en diferentes aceros de baja y alta aleación empleados en la industria metal-mecánica, la tenacidad a la fractura de las capas boruradas, empleando la técnica de micro-agrietamiento por indentación Vickers, para determinar el comportamiento del modelo de grieta presentado en las fases boruradas, trátase de grietas tipo Palmqvist o radial-media.
2. Determinar el valor de la tenacidad a la fractura en capas boruradas tomando en cuenta la influencia de las cargas de aplicación, de las distancias de microindentación, temperaturas y tiempos de tratamientos para diferentes aceros borurados.
3. Emplear el método de redes neuronales a través de modelos desarrollados bajo arquitecturas feedforward: redes perceptrónicas multicapas y redes de base radial para la determinación de  $K_{IC}$  en capas monofásicas tipo  $Fe_2B$  o en capas polifásicas  $FeB/Fe_2B$ .
4. Finalmente, determinar bajo otras técnicas de la inteligencia artificial, llámense algoritmos genéticos, lógica difusa o clusters, los parámetros experimentales más importantes que permitan la optimización y automatización del proceso termoquímico de borurización en pasta.

## APENDICE A

### CODIGOS FUENTE DE LA RED NEURONAL

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 4 hrs y 15 µm de distancia de la superficie.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.117829028 0.729172695 0.29406832 0.247772829 0.15971845 0.39155096  
0.928320106 0.793039981 0.667656189 0.39155096 0.928320106 0.608376497  
0.496079057 0.608376497 1 0.442892765 0.496079057 0.667656189 0  
0.859379368;  
0.339623 0.503144 0.226417 0.509435 0.672957 0.415093 0 1 0.081761  
0.578614 0.396225 0.150943 0.424526 0.62264 0.207545 0.273586 0.122641  
0.613206 0.537736 0.301887];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.369579038 0.247897802 0.474750881 0.25996565 0.201921246  
0.304590546 0.947570618 0.122798409 0.706174511 0.226965031 0.297114909  
0.566120295 0.295144713 0.206069275 0.459757005 0.413252471 0.627288351  
0.207685633 0.255823959 0.367806629];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 4 hrs, 15 µm de distancia de la superficie y 60 µm de distancia de la medición anterior.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.278484568 0.160311613 0 0.839033566 0.607221875 0.412580557  
0.377411148 0.106419946 0.525377661 0.694981295 0.650327291 0.839033566  
0.890681429 0.525377661 0.944302954 1 0.741281815 0.188503106  
0.890681429 0.412580557;  
0.555558 0.347229 0.031593 0.277779 0.875003 1 0.041676 0.916668 0.083342  
0.527784 0.997793 0.895835 0.437501 0.282265 0.270838 0.125008 0.038534 0  
0.666673 0.333337];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.294508677 0.362737515 0.524318947 0.349905235 0.217946857  
0.205743896 0.485821317 0.22931396 0.451965859 0.282834384 0.198737855  
0.207685633 0.298094057 0.364581339 0.347326352 0.402820987 0.461614489  
0.527298775 0.245147883 0.352725852];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 4 hrs y 25 µm de distancia de la superficie.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.17802235 0.26500214 0.16642501 0.20321909 0.34833878 0 0.36137531  
0.58940913 0.2715024 0.19594427 1 0.34707429 0.72504063 0.23925638  
0.5021213 0.37615618 0.31887809 0.30642804 0.34707429 0.17572831;  
0.505553 0.227777 0.061105 0.216663 0.616665 0.549999 0.427774 0.305556  
0.427774 0.630553 0.161107 0.133331 0 0.23333 0.249996 0.099998 0.483334 1  
0.850002 0.783337];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.273668162 0.364448868 0.460338522 0.373522531 0.238853383  
0.271134826 0.286559775 0.315049061 0.29110384 0.242318164 0.352347648  
0.404381351 0.457459822 0.363696071 0.340789637 0.420509428 0.272792133  
0.17537442 0.195540785 0.212918801];
```

```
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');
```

```
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;
```

```
net.trainParam.goal = 1e-6;
```

```
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);
```

```
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 4 hrs y 35 µm de distancia de la superficie.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.48262351 0.6187022 0.81589811 0 0.38154611 0.77375538 0.69364505  
0.655556 0.5830308 0.30773335 0.23131362 0.85951942 1 0.54849176  
0.52606592 0.73302517 0.655556 0.54849176 0.51503765 0.73302517;  
0.096012 0.432036 0.72798 0.336023 0.074673 0.096012 0.064011 0.096012  
0.112013 0.464037 0.384026 0.080011 0.016001 0.176016 0.309361 0 0.416035  
0.951998 0.128014 1];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.450419638 0.28812171 0.208290863 0.3569101 0.472516333 0.430946821  
0.457319995 0.438543732 0.433216005 0.292422809 0.323759368 0.435850329  
0.471621721 0.39821837 0.336792976 0.50250558 0.291651158 0.179210156  
0.427906578 0.167812261];
```

```
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');
```

```
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;
```

```
net.trainParam.goal = 1e-6;
```

```
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);
```

```
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 6 hrs y 15 µm de distancia de la superficie.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.524107373 0.843780409 0.746426575 0.654031332 0.699626257  
1.000000001 1.111553143 0.221539291 0.524107373 0.566326314 0.291759753  
0.291759753 0.609632655 0.365460328 0.154535268 0.524107373 0.794475151  
0.122210477 0 0.365460328;  
0.500003 0.333338 0.324564 0.333338 0.210529 0.307016 0.63158 0.526318  
0.157898 0.149124 0.421057 0.14035 0.114035 1 0 0.114035 0.289475 0.359653  
0.096494 0.219303];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.243964015 0.295433813 0.302522466 0.301737491 0.364064391  
0.302179245 0.195298327 0.244888726 0.406835467 0.411249231 0.278240412  
0.43180486 0.436475136 0.146588059 0.581227401 0.44082501 0.317329496  
0.30972223 0.486609157 0.373071098];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 6 hrs, 15 µm de distancia de la superficie y 60 µm de distancia de la medición anterior.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.244947367 0.41044664 0.360297935 0.547291839 0.360297935  
0.436468071 0.999999999 0.576788151 0.10435312 0.336112611 0.518521221  
0.266943589 0.360297935 0.547291839 0.266943589 0.223472355 0.436468071  
0 0.244947367 0.41044664;  
0.430768 0.061541 0.069235 0.048268 1 0.569232 0.046153 0.184617 0.176923  
0.207693 0.246152 0.215387 0.223075 0.238463 0.276922 0.13077 0 0.769231  
0.26154 0.038464];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.249693135 0.462333836 0.45884103 0.464716704 0.127821497  
0.200217858 0.43418782 0.350375515 0.388197463 0.350624511 0.317011459  
0.350356525 0.339579364 0.319663176 0.315045663 0.414434033 0.529999421  
0.172795792 0.324668115 0.486734933];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 7 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 6 hrs,<sub>i</sub> y 25 μm de distancia de la superficie.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.2747964 0.197207277 0.078015253 0.235062727 0.143729732 0.506777761  
0.2747964 0.338235219 0.110120251 0.161139349 0.235062727 0 0.383283889  
0.316549949 0.126723506 0.358057377 1 0.03251793 0.093883907  
0.316549949;  
0.537499 0.237497 0.399996 0.774996 0.774996 0 0.362497 0.237497 0.625  
0.112497 0.675002 1 0.25 0.25 0.412499 0.824998 0.625 0.324998 0.362497  
0.587501];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.301424276 0.43180486 0.366233327 0.243203178 0.248639953  
0.565161761 0.364294374 0.417830622 0.287692474 0.515668907 0.266172706  
0.214377315 0.407129459 0.413277494 0.356739614 0.226426283 0.239085554  
0.404078113 0.380651263 0.283979164];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 7 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)
```

Red neuronal en Matlab para 920 °C, 6 hrs y 35 µm de distancia de la superficie.

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.64974662 0.47592563 0.55987384 0.68112522 0.81429939 0.74611487  
0.68112522 1 1 0.92295951 0.44918261 0.50328941 0.61911155 0.58915348  
0.3003182 0.50328941 0.37233184 0 0.58915348 0.50328941;  
0.606558 0.16393 0.081986 0.647539 0.327866 0.385244 0.122949 0.204917 0  
0.122949 0.254096 0.368853 1 0.278686 0.155737 0.204917 0.377051 0.073769  
0.631147 0.13934];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.209510464 0.410155786 0.474733614 0.198864307 0.298028701  
0.276180561 0.430591784 0.355666513 0.534797894 0.417268802 0.352060723  
0.292348295 0.14004508 0.331680307 0.42716714 0.379736198 0.294354866  
0.52526893 0.205223399 0.427671673];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 7 1],{'logsig' 'logsig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 4 hrs y 15 µm de distancia de la superficie.

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[0 0.649059227 0.396652953 0.530492443 0.530492443 1 0.649059227  
0.55912381 0.712609951 0.712609951 0.347102766 0.745547256 0.922749437  
0.502524732 0.680470908 0.618375373 0.347102766 0.618375373 0.448402904  
0.779284819;  
1 0.146749 0.277184 0.26088 0.108705 0.336963 0.119577 0.266312 0.19566  
0.016314 0.293487 0.130445 0.059794 0.146749 0.451094 0.054358 0.380443  
0.038054 0.157621 0];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.107999822 0.410972196 0.306685471 0.312255643 0.466950774  
0.248264413 0.444554222 0.307118317 0.357127793 0.620944627 0.297894963  
0.425003356 0.517855482 0.419490716 0.207733597 0.549238416 0.248656587  
0.581227401 0.41015131 0.654878873];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 7 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 4 hrs, 15 µm de distancia de la superficie y 60 µm de distancia de la anterior medición.

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.414265855 0.786064045 0.291338091 0.890463657 0.890463657  
0.414265855 0.638511399 0 0.500904172 0.500904172 0 0.176227697  
0.457112287 0.103489825 0.545735209 1.000000002 0 0.033787079  
0.068285613 0.331421119;  
0.076099 0.456585 0.282648 0.554423 0.010874 0.173937 0.456585 0.206549  
0.195676 0.032613 0.478332 0.141925 0.91317 1 0.141324 0.163063 0.108711 0  
0.206549 0.326134];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.486609157 0.286263423 0.368212386 0.255418569 0.51809505  
0.421140955 0.289971202 0.418794314 0.405353831 0.517254101 0.300555367  
0.450844344 0.190282943 0.183348146 0.436004252 0.406336548 0.481725761  
0.570564455 0.415975137 0.347355128];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 4 hrs y 25 µm de distancia de la superficie.

**clc**

**clear all**

**%Entrada**

```
e=[0.533841872 0.749028973 0.67142092 0.502696312 0.769451669 1  
0.925433635 0.855677136 0.314351903 0.350779999 0.652992135 0.350779999  
0.566228621 0.130957101 0 0.291114961 0.246973804 0.226008398  
0.472718487 0.634933234;  
0.578946 0.157893 1 0.052625 0.026312 0.302625 0.026312 0.105259 0  
0.065785 0.078946 0.473688 0.552634 0.61842 0.407893 0.263151 0 0.842107  
0.131571 0.842107];
```

**%Salida Deseada**

```
w=[0.282699913 0.409871527 0.200065421 0.483924241 0.476836522  
0.337455485 0.464798184 0.427566941 0.535509649 0.490262536 0.456374556  
0.320964171 0.287452626 0.296126333 0.367212237 0.398162046 0.54282258  
0.243561733 0.443495213 0.225333599];  
t=w;
```

**%Creacion y prueba de la red**

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

**%Entrenamiento y nueva prueba de la red**

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 4 hrs y 35 µm de distancia de la superficie.

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.71366905 0.81057035 0.90048036 0.3416435 0.90048036 0.30755109  
0.1524733 0.14652155 0.22380731 0.88176655 0.29127241 0.06619421  
0.1524733 0.02070682 0.11793726 0 0.07107027 0.22380731 0.23802944 1;  
0.045454 0 0.651515 0.636361 0.606062 0.621217 0.348485 0.469701 0.560608  
0.318186 0.333333 0.727268 0.409093 1 0.590907 0.787876 0.636361 0.545454  
0.681814 0.075763];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.510888062 0.528086377 0.286301007 0.321553744 0.296424812  
0.327632449 0.424623121 0.383046035 0.349727139 0.378413071 0.417526708  
0.319389784 0.402661788 0.267943991 0.349703695 0.31067512 0.341362846  
0.353967174 0.317665813 0.470784587];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 7 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 6 hrs y 15 µm de distancia de la superficie.

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.598573172 0.663355935 0.368830515 0.536924348 0.630571509  
0.395216542 0.3176971 0.293257172 0.478189685 0.840530173 0.449865843  
0.293257172 0.999999999 0.598573172 0.156627795 0.598573172 0.536924348  
0.536924348 0 0.3178782;  
0.084905 0.646227 0.778301 0.353774 0.037735 0.089623 0.146226 0.240566  
0.457547 0.094341 0 0.339624 0.075473 0.254716 0.349056 0.066037 0.212265  
0.141508 1 0.136793];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.468034698 0.128490557 0.111143884 0.223355481 0.558198655  
0.47485962 0.397747745 0.304546932 0.182348888 0.436956866 0.674917949  
0.239551206 0.457711366 0.279813947 0.240048627 0.501862115 0.316229428  
0.389988429 0.090062352 0.409847493];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 6 hrs, 15 µm de distancia de la superficie y 60 m de distancia de la anterior.

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.555684212 0.794494608 0 0.436646112 0.534730405 0.400331046 1  
0.742082994 0.621527351 0.821690229 0.555684212 0.907445942 0.668050208  
0.742082994 0.692129235 0.907445942 0.968342106 0.418286061 0.474588934  
0.742082994;  
0.454548 0.686872 0.959602 0.989904 0.464651 0.282829 0.545455 0.222224 1  
0.666665 0.083579 0.454548 0.292932 0.303028 0.464651 0 0.141412 0.202024  
0.787883 0.36364];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.328688753 0.239454235 0.215218652 0.190492596 0.325740981  
0.430677637 0.271610861 0.443962542 0.182245967 0.243609739 0.585333063  
0.308775841 0.403026874 0.391769614 0.316380103 0.650195053 0.489667213  
0.487598679 0.228669585 0.358978226];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 6 hrs, y 25 µm de distancia de la superficie

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[0.553436721 0.502870613 0.589090111 0.226182333 0.571054388 1 0  
0.425648551 0.519343821 0.645743022 0.665530146 0.818148375 0.470968819  
0.215685317 0.281796302 0.519343821 0.571054388 0.519343821 0.771842829  
0.534261588;  
0.008329 1 0.058328 0.124998 0.391664 0.466662 0.408334 0.399999 0.591666  
0.191667 0.158332 0 1.258331 0.424998 0.183332 0.049999 0.116663 0.291665  
0.491668 0.224996];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.527477102 0.143885139 0.507370345 0.436004252 0.308150518  
0.255579115 0.253284409 0.324744802 0.225978193 0.392363614 0.40475973  
0.554817794 0.109524824 0.276653341 0.429323652 0.544975038 0.45004543  
0.328688753 0.250278144 0.350725555];  
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

Red neuronal en Matlab para 950 °C, 6 hrs, y 35 µm de distancia de la superficie

```
clc
```

```
clear all
```

```
%Entrada
```

```
e=[1 0.974903982 0.082499083 0.486132629 0.435931391 0.13599975  
0.858785521 0 0.424027788 0.378745416 0.367981432 0.435931391  
0.448092656 0.795869713 0.142446619 0.213414799 0.326996285 0.229172195  
0.499362493 0.077024785;
```

```
0.014392 0.201441 1 0.071943 0.251802 0.136689 0.05036 0.266188 0  
0.453238 0.23741 0.021582 0.18705 0.05036 0.230214 0.294966 0.079138  
0.316548 0.115107 0.093525];
```

```
%Salida Deseada
```

```
w=[0.490767002 0.327841471 0.145245826 0.483026893 0.34024628  
0.46547077 0.463557799 0.380716132 0.585047542 0.249988967 0.355998164  
0.552160247 0.382781992 0.470238642 0.386676533 0.336878604 0.496935889  
0.323221266 0.437356242 0.521035145];
```

```
t=w;
```

```
%Creacion y prueba de la red
```

```
net = newff([0 1;0 1],[2 5 1],{'logsig' 'tansig' 'logsig'},'trainlm');  
a=sim(net,e);
```

```
%Entrenamiento y nueva prueba de la red
```

```
net.trainParam.epochs = 10000;  
net.trainParam.goal = 1e-6;  
[net,tr,Y,E,Pf,Af] = train(net,e,t);  
sal=sim(net,e)*1e7
```

```
clc
```

```
%Pruebas
```

```
%PROBETA 5
```

```
e1=[0.550294245;0.324218434];
```

```
e2=[0.517280724;0.327583489];
```

```
e3=[0.532751931;0.360317992];
```

```
e4=[0.531250619;0.343403618];
```

```
e5=[0.532751931;0.43199918];
```

```
e6=[0.531250619;0.260880987];
```

```
sal1=sim(net,e1)
```

```
sal2=sim(net,e2)
```

```
sal3=sim(net,e3)
```

```
sal4=sim(net,e4)
```

```
sal5=sim(net,e5)
```

```
sal6=sim(net,e6)
```

```
%PROBETA 6
```

```
e1=[0.437897905;0.293221];
```

```
e2=[0.49200018;0.215058];
```

```
e3=[0.574410627;0.481483];
```

```
e4=[0.549119792;0.397797];
```

```
e5=[0.659877855;0.315304335];
```

```
e6=[0.577996267;0.356249148];
```

```
sal1=sim(net,e1)
```

```
sal2=sim(net,e2)
```

```
sal3=sim(net,e3)
```

```
sal4=sim(net,e4)
```

```
sal5=sim(net,e5)
```

```
sal6=sim(net,e6)
```

## APENDICE B

### Valores experimentales de Dureza, Longitud de Grieta y Tenacidad a la fractura

Tabla B.1 Dureza medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>DUREZA EN Kgr /mm<sup>2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
2030	1966	1814	1946
2363	1890	1872	2030
2126	1786	1806	2152
2101	2329	1831	1648
2053	2179	1928	1884
2179	2053	1695	2126
2471	2030	1936	2077
2397	1855	2089	2053
2329	2126	1876	2008
2179	2236	1826	1838
2471	2207	2363	1791
2297	2329	1927	2179
2236	2363	2179	2266
2297	2126	1855	1987
2510	2397	2030	1973
2207	2433	1946	2101
2236	2266	1908	2053
2329	1908	1900	1987
1966	2363	1927	1966
2433	2053	1812	2101
<b>2260.53</b>	<b>2144.78</b>	<b>1926.02</b>	<b>2008.35</b>

Tabla B.2 Longitud de grieta medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>LONGITUD DE GRIETA EN µm</b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
14.8467	17.4586	18.8333	13.1971
18.4209	15.3966	15.3966	17.5274
12.3723	12.2725	13.3345	21.3412
18.5584	14.7092	15.2591	16.2901
22.1326	20.6204	20.208	12.9221
16.4963	21.8576	19.3832	13.1971
7.42335	12.3723	17.871	12.7847
29.281	21.0328	16.3589	13.1971
9.21046	12.7847	17.871	13.4033
20.0705	17.1837	20.3798	17.9398
16.0839	21.83576	14.57175	16.9087
10.7226	20.8266	14.2281	12.9909
16.7025	16.2901	12.5785	12.166
21.0328	14.7536	15.4653	14.2281
11.9598	14.6405	15.6715	15.9465
13.4033	13.1971	13.8157	11.9598
10.104	12.3412	18.5584	17.3212
20.8266	11.9598	24.9507	24.2281
19.177	18.5584	23.0949	13.6095
14.0219	15.2591	22.2701	24.8467
<b>16.142</b>	<b>16.268</b>	<b>17.505</b>	<b>15.8</b>

Tabla B.3 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
3.70E+06	2.95E+06	2.74E+06	4.50E+06
2.48E+06	3.63E+06	3.64E+06	2.88E+06
4.75E+06	5.24E+06	4.60E+06	2.08E+06
2.60E+06	3.50E+06	3.74E+06	3.57E+06
2.02E+06	2.18E+06	2.39E+06	4.73E+06
3.05E+06	2.06E+06	2.71E+06	4.31E+06
9.48E+06	4.86E+06	2.87E+06	4.57E+06
1.23E+06	2.29E+06	3.15E+06	4.39E+06
7.06E+06	4.52E+06	2.91E+06	4.33E+06
2.27E+06	2.83E+06	2.42E+06	2.92E+06
2.97E+06	1.99E+06	3.52E+06	3.24E+06
5.66E+06	2.08E+06	4.04E+06	4.36E+06
2.95E+06	2.98E+06	4.57E+06	4.72E+06
2.06E+06	3.65E+06	3.64E+06	3.98E+06
4.60E+06	3.47E+06	3.41E+06	3.37E+06
4.13E+06	4.03E+06	4.21E+06	5.03E+06
6.27E+06	4.62E+06	2.73E+06	2.92E+06
2.08E+06	5.27E+06	1.75E+06	1.79E+06
2.56E+06	2.45E+06	1.96E+06	4.28E+06
3.68E+06	3.53E+06	2.13E+06	1.68E+06
<b>3.7791E+06</b>	<b>3.4056E+06</b>	<b>3.1564E+06</b>	<b>3.6820E+06</b>

Tabla B.4 Dureza medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>DUREZA EN Kgr /mm<sup>2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
2386	2179	2340	2179
2564	2318	2256	2077
2510	2276	2126	2126
2458	2433	2297	2198
2484	2276	2198	2276
2651	2340	2593	2236
2714	2814	2340	2198
2217	2458	2409	2386
2386	2061	2161	2386
2409	2256	2217	2340
2256	2409	2297	2061
2256	2198	2041	2093
2433	2276	2458	2161
2297	2433	2386	2143
2179	2198	2179	1973
2386	2161	2431	2093
2537	2340	3129	2016
2161	1973	2077	1796
2093	2179	2143	2143
2297	2318	2386	2093
<b>2383.59</b>	<b>2294.87</b>	<b>2323.11</b>	<b>2148.59</b>

Tabla B.5 Longitud de grieta medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>LONGITUD DE GRIETA EN µm</b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
18.5584	18.8333	16.2214	21.1703
15.9465	12.2348	12.9221	13.7469
15.809	12.3723	14.7092	12.3726
15.9465	11.9976	18.8333	21.8576
14.0219	29.0061	18.8333	16.4963
15.534	21.3078	10.3102	17.4586
20.6204	11.9598	14.2968	13.0596
18.9708	14.4343	12.9221	14.4343
13.1971	14.2968	17.1837	10.9976
13.0596	14.8467	11.5474	13.0596
17.3212	15.534	17.7336	15.2591
12.9221	14.9842	21.3078	17.1837
12.5097	15.1216	13.0596	27.7688
26.3941	15.3966	13.0596	15.6715
10.7226	16.0839	14.8467	13.6095
12.5097	13.472	19.3832	14.4343
15.2591	11.135	17.1837	17.3212
16.3589	24.882	13.8844	12.2348
12.2348	15.809	14.2968	21.5827
14.1594	11.8224	16.7713	13.3345
<b>15.603</b>	<b>15.777</b>	<b>15.465</b>	<b>16.153</b>

Tabla B.6 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 920 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
2.44E+06	2.50E+06	3.01E+06	2.10E+06
2.95E+06	4.62E+06	4.32E+06	4.10E+06
3.03E+06	4.59E+06	3.66E+06	4.75E+06
3.02E+06	4.65E+06	2.43E+06	1.99E+06
3.64E+06	1.28E+06	2.49E+06	2.98E+06
3.02E+06	2.00E+06	5.65E+06	2.76E+06
1.95E+06	4.34E+06	3.64E+06	4.31E+06
2.45E+06	3.50E+06	4.18E+06	3.56E+06
4.07E+06	3.88E+06	2.88E+06	5.35E+06
4.11E+06	3.51E+06	5.16E+06	4.17E+06
2.78E+06	3.17E+06	2.66E+06	3.52E+06
4.32E+06	3.50E+06	2.14E+06	2.92E+06
4.36E+06	3.40E+06	4.07E+06	1.40E+06
1.47E+06	3.20E+06	4.13E+06	3.32E+06
5.81E+06	3.15E+06	3.57E+06	4.27E+06
4.41E+06	4.14E+06	2.26E+06	3.80E+06
3.17E+06	5.30E+06	2.39E+06	2.94E+06
3.10E+06	1.73E+06	4.04E+06	5.25E+06
4.87E+06	3.25E+06	3.81E+06	2.05E+06
3.73E+06	4.87E+06	2.84E+06	4.28E+06
<b>3.4350E+06</b>	<b>3.5286E+06</b>	<b>3.4669E+06</b>	<b>3.4907E+06</b>

Tabla B.7 Dureza medida experimentalmente en la probeta borurizada a 950 °C durante 4 hrs. a una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>DUREZA EN Kgr /mm<sup>2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
1806	2093	1817	1776
2198	2236	1960	1838
2045	2045	1908	1896
2126	2276	1796	1538
2126	2276	1973	1896
2409	2093	2126	1516
2198	2179	2077	1417
2143	1933	2030	1413
2236	2126	1671	1462
2236	2126	1695	1884
2016	1933	1896	1506
2256	2001	1695	1361
2363	2109	1838	1417
2109	1973	1549	1332
2217	2143	1462	1395
2179	2318	1656	1319
2016	1933	1626	1365
2179	1946	1612	1462
2077	1960	1776	1471
2276	2061	1884	1960
<b>2160.47</b>	<b>2088.08</b>	<b>1802.38</b>	<b>1561.15</b>

Tabla B.8 Longitud de grieta medida experimentalmente en la probeta borurizada a 950 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>LONGITUD DE GRIETA EN µm</b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
35.0547	12.2348	18.4209	12.5097
13.472	17.0462	14.0219	12.0973
16.7713	14.8467	22.8199	18.0085
16.3589	18.2834	12.9221	17.871
12.5097	11.41	12.6472	17.5961
18.2834	13.472	15.534	17.7336
12.7847	17.0462	12.6472	15.2591
16.4963	13.8844	13.472	16.3589
14.7092	13.7469	12.3723	17.1837
10.1727	11.6849	13.0596	14.9842
17.1837	17.3212	13.1971	15.1216
13.0596	13.0672	17.3212	18.6958
11.2725	22.8199	18.146	15.809
13.472	23.9179	18.8333	21.1703
21.1703	13.0596	16.6338	17.4586
11.135	13.3345	15.1216	19.2457
19.3832	12.6472	12.3723	17.871
10.7226	11.2725	21.1703	17.0462
13.747	13.8844	13.7469	18.2834
9.760033	15.3966	21.1703	12.7847
<b>15.376</b>	<b>15.019</b>	<b>15.781</b>	<b>16.654</b>

Tabla B.9 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 950 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
1.08E+06	4.87E+06	2.83E+06	5.11E+06
4.11E+06	2.86E+06	4.10E+06	5.28E+06
3.07E+06	3.68E+06	2.00E+06	2.86E+06
3.12E+06	2.55E+06	4.84E+06	3.22E+06
4.67E+06	5.18E+06	4.77E+06	2.96E+06
2.48E+06	4.21E+06	3.37E+06	3.28E+06
4.45E+06	2.90E+06	4.65E+06	4.25E+06
3.07E+06	4.19E+06	4.28E+06	3.83E+06
3.57E+06	4.05E+06	5.36E+06	3.50E+06
6.21E+06	5.17E+06	4.90E+06	3.78E+06
2.98E+06	3.01E+06	4.56E+06	4.18E+06
4.25E+06	4.51E+06	3.21E+06	3.19E+06
5.18E+06	1.90E+06	2.87E+06	4.03E+06
4.19E+06	1.83E+06	2.96E+06	2.68E+06
2.08E+06	4.36E+06	3.67E+06	3.50E+06
5.49E+06	4.06E+06	3.98E+06	3.11E+06
2.49E+06	4.82E+06	5.43E+06	3.41E+06
5.81E+06	5.71E+06	2.44E+06	3.54E+06
4.10E+06	4.16E+06	4.43E+06	3.18E+06
6.55E+06	3.47E+06	2.25E+06	4.71E+06
<b>3.9475E+06</b>	<b>3.8751E+06</b>	<b>3.8452E+06</b>	<b>3.6792E+06</b>

Tabla B.10 Dureza medida experimentalmente en la probeta borurizada a 950 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>DUREZA EN Kgr /mm<sup>2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
2340	2126	2363	2537
2386	2318	2109	2510
2179	1679	2061	1555
2297	2030	2143	1987
2363	2109	1796	1933
2198	2001	2126	1612
2143	2484	2537	2386
2126	2276	1580	1467
2256	2179	1987	1920
2510	2340	2077	1872
2236	2126	2198	1861
2126	2409	2217	1933
2622	2217	2363	1946
2340	2276	2030	2318
2030	2236	1786	1619
2340	2409	1849	1695
2297	2458	2077	1817
2297	2016	2126	1712
1920	2061	2077	2001
2143	2276	2318	1549
<b>2257</b>	<b>2201</b>	<b>2091</b>	<b>1912</b>

Tabla B.11 Longitud de grieta medida experimentalmente en la probeta borurizada a 950 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm

<b>LONGITUD DE GRIETA EN µm</b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
12.0973	15.809	11.135	11.41
28.4562	18.9708	27.4939	14.9842
32.3053	22.6825	11.9598	30.2433
19.9331	23.0949	13.0596	12.5097
10.7226	15.9465	17.4586	15.9465
12.2348	13.472	18.6958	13.7469
13.8844	17.0462	17.7336	12.0973
16.6338	12.6472	17.5961	16.2214
22.9574	23.2323	20.7579	11.135
12.3723	18.6958	14.1594	19.7956
9.62286	10.76033	13.6095	15.6715
19.5207	15.809	10.9976	11.5474
11.8224	13.6095	31.7554	14.7092
17.0462	13.7469	18.0085	12.0973
19.7956	15.9465	14.0219	15.534
11.5474	9.62286	11.8224	16.7713
15.809	11.5474	12.9221	12.6472
13.7469	12.3723	15.809	17.1837
38.7664	20.3455	19.1083	13.3345
13.6095	14.5718	14.7092	12.9221
<b>17.644</b>	<b>15.996</b>	<b>16.641</b>	<b>15.025</b>

Tabla B.12 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 950 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>			
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>
4.68E+06	3.29E+06	5.27E+06	4.91E+06
1.28E+06	2.39E+06	1.44E+06	3.28E+06
1.11E+06	2.15E+06	5.07E+06	1.45E+06
2.23E+06	1.90E+06	4.36E+06	4.83E+06
5.58E+06	3.26E+06	3.08E+06	3.40E+06
4.75E+06	4.31E+06	2.56E+06	4.65E+06
3.98E+06	2.72E+06	2.53E+06	4.64E+06
3.05E+06	4.44E+06	3.25E+06	3.81E+06
1.82E+06	1.82E+06	2.26E+06	5.85E+06
4.37E+06	2.44E+06	3.92E+06	2.50E+06
6.75E+06	5.85E+06	4.05E+06	3.56E+06
2.40E+06	3.09E+06	5.55E+06	5.52E+06
4.58E+06	4.03E+06	1.10E+06	3.83E+06
2.80E+06	3.92E+06	2.77E+06	4.70E+06
2.40E+06	3.16E+06	4.29E+06	3.87E+06
5.02E+06	6.50E+06	5.45E+06	3.37E+06
3.16E+06	4.90E+06	4.50E+06	4.97E+06
3.90E+06	4.88E+06	3.29E+06	3.23E+06
9.01E+05	2.29E+06	2.50E+06	4.37E+06
4.10E+06	3.59E+06	3.51E+06	5.21E+06
<b>3.4429E+06</b>	<b>3.5460E+06</b>	<b>3.5373E+06</b>	<b>4.0976E+06</b>

.Tabla B.13 Dureza medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm.

<b>DUREZA EN Kgr /mm<sup>2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
2276	2143	2318	2363	2109
2198	2217	2458	1987	2256
2256	2363	2593	2217	2179
2564	2386	2484	2061	2198
2318	2276	2217	2409	2484
2318	1973	2386	2161	2363
2433	2340	2409	2276	2682
2340	1817	2340	2564	2318
2198	2217	2217	2217	2198
2256	2143	2217	2318	2093
2484	2276	2126	2318	2409
2340	2409	2198	2198	2276
2537	2593	1861	2198	2143
2409	2061	2179	2409	2236
2045	2143	1896	1884	1544
2458	2340	2198	2433	2297
2386	2651	2318	2386	2409
2126	2143	2363	2077	2143
2030	2318	2126	2386	2061
2510	2161	2109	2045	2318
<b>2324.102768</b>	<b>2248.514147</b>	<b>2250.499578</b>	<b>2245.257355</b>	<b>2235.769064</b>

Tabla B.14 Longitud de grieta medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm.

<b>LONGITUD DE LA GRIETA EN µm</b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
27.219	15.2591	17.7336	16.4963	22.6825
15.534	19.871	11.9598	17.4586	17.871
11.2725	10.8978	10.7226	23.6448	23.2323
16.2214	13.472	17.1837	20.6204	27.7688
11.2725	11.5474	18.9708	15.3966	19.7956
28.8686	11.6849	13.0596	19.3832	15.1216
12.9221	10.8601	15.9465	23.0949	16.7713
16.2214	19.9331	18.0085	13.7469	11.6849
21.5827	19.1083	14.0219	15.2591	23.0949
12.2348	17.4586	15.809	13.3345	29.8309
12.9221	16.0839	12.0973	15.9465	15.2591
12.3723	16.2214	12.7847	18.146	21.8576
21.7202	22.9574	28.0438	17.871	9.21045
16.7713	20.0705	17.0462	15.9465	13.8844
18.2834	15.9465	17.871	14.1594	21.0328
13.6095	15.5341	14.0219	10.5851	14.7092
15.6715	11.6849	21.3078	16.4963	14.4343
14.2968	22.545	27.4939	30.3808	12.3723
27.4939	15.9465	15.6715	14.4343	15.1216
13.0596	29.0061	19.5207	15.2591	16.6338
<b>16.97748</b>	<b>16.80443</b>	<b>16.96374</b>	<b>17.383015</b>	<b>18.1184675</b>

Tabla B.15 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 4 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
1.41E+06	3.45E+06	2.65E+06	2.93E+06	1.92E+06
3.32E+06	2.28E+06	4.65E+06	2.93E+06	2.65E+06
5.30E+06	5.45E+06	5.33E+06	1.76E+06	1.82E+06
2.88E+06	3.94E+06	2.68E+06	2.24E+06	1.39E+06
5.23E+06	5.09E+06	2.45E+06	3.21E+06	2.17E+06
1.28E+06	5.37E+06	4.13E+06	2.40E+06	3.33E+06
4.16E+06	5.50E+06	5.42E+06	1.80E+06	2.68E+06
3.01E+06	2.51E+06	2.58E+06	3.69E+06	4.95E+06
2.03E+06	2.42E+06	3.85E+06	3.39E+06	1.83E+06
4.69E+06	2.82E+06	3.22E+06	4.06E+06	1.28E+06
4.12E+06	3.10E+06	4.91E+06	3.11E+06	3.26E+06
4.53E+06	2.97E+06	4.45E+06	2.63E+06	1.95E+06
1.87E+06	1.70E+06	1.49E+06	2.69E+06	7.36E+06
2.83E+06	2.33E+06	2.90E+06	3.05E+06	3.89E+06
2.69E+06	3.23E+06	2.90E+06	4.12E+06	2.51E+06
3.83E+06	3.22E+06	3.87E+06	5.61E+06	3.52E+06
3.14E+06	4.63E+06	2.01E+06	2.91E+06	3.54E+06
3.82E+06	1.92E+06	1.36E+06	1.25E+06	4.73E+06
1.47E+06	3.11E+06	3.33E+06	3.56E+06	3.57E+06
4.03E+06	1.31E+06	2.41E+06	3.53E+06	2.92E+06
<b>3.2806E+06</b>	<b>3.3183E+06</b>	<b>3.3289E+06</b>	<b>3.0435E+06</b>	<b>3.0643E+06</b>

Tabla 4.16 Dureza medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm.

<b>DUREZA EN Kgr /mm<sup>2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
2161	2622	2318	2317	2386
2179	2297	2093	2179	2178
2318	2340	2198	2161	2077
2198	2318	2317	2161	2386
2109	1896	2179	1896	2458
2179	2217	2143	1817	1960
2256	2179	2161	2093	2297
1987	2276	2363	2061	2318
2318	2386	2409	2409	2179
2484	2030	2109	2045	2458
2198	2363	2077	2276	2256
2318	2198	2363	2109	2198
2682	2126	2340	2340	2433
2276	2340	2433	2276	2622
2217	2077	2016	2297	2386
2386	2318	2236	2093	2386
2510	2318	2386	2458	2256
2564	2409	2433	2297	2161
2363	2030	2340	2093	2143
2126	2318	2198	2001	2236
<b>2291</b>	<b>2253</b>	<b>2256</b>	<b>2169</b>	<b>2289</b>

Tabla B.17 Longitud de grieta medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm, 45 µm y 55 µm.

<b>LONGITUD DE LA GRIETA EN µm</b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
14.9842	13.3345	9.8978	12.3723	13.472
10.7226	15.2348	14.5718	11.135	15.534
13.3345	15.1216	16.9087	11.8224	13.3345
15.809	14.2968	12.9221	15.3589	13.3345
15.9465	17.0462	11.9598	18.0085	12.9221
14.8467	20.208	15.6715	16.3589	23.7822
14.0219	18.833	17.7336	14.9842	12.6472
18.4209	12.9221	16.0839	15.1216	18.0085
26.944	12.7847	17.0462	16.2214	12.9221
12.5097	14.2968	16.7713	15.809	20.3455
15.6715	36.7043	21.0328	14.5718	30.2433
14.9842	10.3102	11.2725	17.7336	15.534
20.3455	15.9465	13.1971	11.2725	13.7469
11.6849	12.6472	19.5207	10.4477	10.0353
15.6715	17.0462	19.5207	20.3455	20.0705
16.4963	13.7469	14.0219	16.4963	15.9465
12.0973	15.534	14.1594	16.9087	16.3589
17.7336	12.3723	10.1727	23.7822	20.208
13.6095	17.0462	16.4963	15.2591	16.6338
13.7469	14.2968	16.2214	21.0328	13.0596
<b>15.479</b>	<b>15.986</b>	<b>15.259</b>	<b>15.752</b>	<b>16.40697</b>

Tabla B.18 Tenacidad a la fractura medida experimentalmente en la probeta borurizada a 1000 °C durante 6 hrs. A una distancia de la superficie de 15 µm, 25 µm, 35 µm y 45 µm.

<b>TENACIDAD A LA FRACTURA EN Pa m<sup>1/2</sup></b>				
<b>15 µm</b>	<b>25 µm</b>	<b>35 µm</b>	<b>45 µm</b>	<b>55 µm</b>
3.53E+06	3.82E+06	6.35E+06	4.55E+06	3.94E+06
5.81E+06	3.34E+06	3.74E+06	5.49E+06	3.33E+06
4.06E+06	3.35E+06	2.92E+06	5.04E+06	4.29E+06
3.23E+06	3.66E+06	4.26E+06	3.40E+06	4.01E+06
3.26E+06	3.11E+06	4.93E+06	2.86E+06	4.14E+06
3.57E+06	2.23E+06	3.32E+06	3.38E+06	1.86E+06
3.82E+06	2.50E+06	2.74E+06	3.59E+06	4.42E+06
2.70E+06	4.30E+06	3.04E+06	3.57E+06	2.59E+06
1.41E+06	4.27E+06	2.76E+06	2.97E+06	4.39E+06
4.32E+06	3.91E+06	3.02E+06	3.35E+06	2.09E+06
3.28E+06	8.81E+05	2.17E+06	3.59E+06	1.21E+06
3.41E+06	6.14E+06	5.18E+06	2.78E+06	3.32E+06
2.00E+06	3.24E+06	4.11E+06	5.20E+06	3.79E+06
5.00E+06	4.38E+06	2.24E+06	5.91E+06	5.85E+06
3.26E+06	2.97E+06	2.46E+06	2.17E+06	2.17E+06
2.91E+06	3.88E+06	3.84E+06	3.11E+06	3.06E+06
4.52E+06	3.23E+06	3.66E+06	2.76E+06	3.03E+06
2.52E+06	4.46E+06	5.95E+06	1.71E+06	2.26E+06
3.90E+06	3.00E+06	2.94E+06	3.49E+06	3.03E+06
4.05E+06	3.66E+06	3.11E+06	2.21E+06	4.27E+06
<b>3.5292E+06</b>	<b>3.5167E+06</b>	<b>3.6373E+06</b>	<b>3.5572E+06</b>	<b>3.3527E+06</b>

## REFERENCIAS

- [1] Giselle Ramírez Sandoval, “Caracterización de grietas auto-afines en capas borurizadas para aceros estructurales AISI 1045”, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, SEPI-ESIME Zacatenco, Octubre 2006.
- [2] E. Meléndez, I. Campos, E. Rocha, M.A. Barrón. *Structural and strength characterization of steels subjected to boriding thermochemical process*, Materials Science and Engineering A 234-236 (1997) 900-903.
- [3] I. Campos, J. Oseguera, U. Figueroa, J. A. García, O. Bautista, G. Kelemenis. *Kinetic study of boron diffusion in the paste boriding process*, Materials Science and Engineering A 352 (2003) 261-265.
- [4] I. Campos, O. Bautista, G. Ramírez, M. Islas, J. de la Parra, L. Zuñiga. *Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of Fe<sub>2</sub>B boride layers during the boriding process*. Applied Surface Science 243 (2005) 429–436.
- [5] I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, O. Ozdemir, C. Bindal. *Evaluation of borides formed on AISI P20 steel*. Materials and Design 28 (2007) 55-61.
- [6] Ozbek, C. Bindal. *Mechanical properties of boronized AISI W4 steel*. Surface and Coatings Technology 154 (1) (2002) 14-20.
- [7] U. Sen, S. Sen, F. Yilmaz. An evaluation of some properties of borides deposited on boronized ductil iron. Materials Processing Technology 148 (2004) 1-7.
- [8] S. Sen, I. Ozbek, U. Sen, C. Bindal. *Mechanical behavior of borides formed on borided cold work steel*. Surface and Coating Technology 135 (2001) 173-177.
- [9] G. Ramírez, I. Campos, A. Balankin. *Fracture toughness of iron boride layers obtained by the paste boriding process*. Materials Science Forum 553 (2007) 21-26.
- [10] Genel K., Ozbek I., Kurf A., Bindal C. *Boriding response of AISI W1 steel and use of artificial neural network for prediction of borided layer properties*. Surface and Coatings Technology 135 (2000) 258-267.
- [11] Malinova T., Malinov S., Pantev N. *Simulation of microhardness profiles for nitrocarburized surface layers by artificial neural network*. Surface and Coatings Technology 160 (2002) 38-43.

- [12] I. Campos, M. Islas, E. González, P. Ponce. *Use of fuzzy logic for modeling the growth of Fe<sub>2</sub>B boride layers during boronizing*. Surface and Coatings Technology 201 (2006) 2717-2723.
- [13] I. Campos, M. Islas, G. Ramírez, C. VillaVelázquez, C. Mota. *Growth kinetics of borided layers: artificial neural network and least square approaches*. Applied Surface Science (2007) in press.
- [14] I. Campos, R. Torres, O. Bautista, G. Ramírez, L. Zuñiga. *Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of polyphase boride layers during the boriding process*. Applied Surface Science 252 (2006) 2396-2403.
- [15] I. Campos, G. Ramírez, U. Figueroa, J. Martínez, O. Morales. *Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe<sub>2</sub>B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels*. Applied Surface Science 253 (2007) 3469-3475.
- [16] B. Lawn. *Fracture of Brittle Solids*. 2<sup>nd</sup> Ed. (Cambridge Solid State Science Series, 1993).
- [17] B. Lawn, R. Wilshaw. J. Mater. Sci. 10 (1975) 1049-1081.
- [18] A.K. Sinha. *Boronizing*. ASM Handbook, OH, USA, J. Heat Treatment 4 (1991) 437.
- [19] C. Martini, G. Palombarini, M. Carbucicchio, J. Mater. Sci. 39 (2004) 933-937.
- [20] L. Tsoukalas, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [21] Dearnley, P. Bell, T. *Surface Engineering*. Vol. 1 (No. 3). 1985. p 203 – 217.
- [22] D.N. Tsipas, J. Rus, H. Nogueira. *Proceedings of Heat Treatment '88*. The Metals Society. 1988. p. 203 – 210.
- [23] A. Graf von Matuschka. *Boronizing*. Hanser. 1980.
- [24] ASM Handbook
- [25] Chatterjee – Fischer, R. *Surface Modification Technologies*. Marcel Dekker. 1989.
- [26] S. Alwart, C. Ulrich. *Abrasive Resistant Hard Steel Surfaces produced by Boriding*. Industrial Heating; Oct. 1998; 65, 10; Career and Technical Education. p. 47.
- [27] Chatterjee – Fischer, R. Schaaber, O. *Proceedings of Heat Treatment '76*. The Metals Society. 1976. p 27 – 30.

- [28] Wahl G. Durferrit-Technical Information. Reprint from VDI-Z117 (1975), pp 785/789.
- [29] Iván Enrique Campos Silva, "Cinética de difusión en el proceso termoquímico de borurización en aceros estructurales, de baja aleación, herramientas e inoxidable". Tesis de grado en Ingeniería Metalúrgica, UAM-A, 1994, México.
- [30] I. Campos, R. Torres, O. Bautista, G. Ramírez, L. Zúñiga, *App. Surf. Sci.* 252 (2006) 2396-2403.
- [31] I. Campos, O. Bautista, G. Ramírez, M. Islas, J. de la Parra, L. Zuñiga, *App. Surf. Sci.* 243 (2005) 429-436.
- [32] C. Martini, G. Palombarini, M. Carbucicchio, *Journal of Materials Science* 39 (2004) 933-937.
- [33] I. Campos, G. Ramírez, U. Figueroa, J. Martínez, O. Morales, *App. Surf. Sci.* 253 (2007) 3469-3475.
- [34] C. Martini, G. Palombarini, M. Carbucicchio, *J. Mater. Sci.* 39 (2004) 933-937.
- [35] I. Campos, M. Islas, E. González, P. Ponce, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 2717-2723
- [36] A. Graf von Matuschka: *Boronizing*, 1980, Carl Hanser Verlag, Munich, FRG.