

01149



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN
INGENIERÍA**

**“APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL A LA
CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE UN ACERO DE ALTO MANGANESO
13% (HADFIELD), SOMETIDO A TRATAMIENTO
TÉRMICO DE TEMPLE”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(AREA METAL-MECÁNICA)**

P R E S E N T A:

ING. MARCELO GARCÍA TREJO

ASESOR: DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ.



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. NOVIEMBRE 2004.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, especialmente a mi madre, la señora Ignacia Trejo Mendoza, quien ha sido un ejemplo para mí a seguir de empeño y dedicación, sabiduría y respeto, amor y confianza, "Gracias mamá"

A todos mis hermanos y sobrinos, por verlos algún día rebazar la meta que he alcanzado, y que ellos tendrán muchas por alcanzar y seguir saliendo adelante.

A todos aquellos que me han dado su confianza y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Armando Aguilar Márquez, por su gran apoyo y disposición para poder llevar a cabo la realización de este trabajo, y así poder cumplir una meta mas en mi vida.

Al M. en I. Enrique Curiel Reyna por el tiempo dedicado para desarrollar este trabajo, pues fue muy importante para poder llevarlo a cabo.

Al profesor Garibay por sus valiosas asesorias.

A mi jurado, que gracias a sus correcciones y sugerencias se hizo posible la presentación de un mejor trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, pues gracias a esta institución recibí un gran apoyo durante el tiempo en que estuve cursando la maestría.

De igual forma, a la Dirección General de Estudios de Posgrado, por la ayuda recibida por medio de la beca.

Al Ing. Noé Alberto Cotés Guerrero, por su apoyo y disposición para ayudarme durante la parte experimental de este trabajo, de igual manera a “Juanito y Benito”, gracias por su apoyo.

A mis amigos de la maestria, Pedro, Gilberto, Sinhue, Eriberto, Carlos y Miguel, con los cuales compartimos momentos de trabajo, alegría y de parranda.

A alguien muy especial en mi vida, quien su apoyo incondicional ha sido presente en todo momento, el cual no podre pagar su apoyo recibido, sin embargo le estoy profundamente agradecido “gracias Lupita”.

A Dios por darme la vida y oportunidad de conocer y aprender lo que hasta hoy he vivido.

EN LA VIDA DEL HOMBRE, ESTE TIENE QUE
DECIDIRSE SI SE LANZA A BUSCAR EL ÉXITO A
PESAR DEL FRACASO, O A QUEDARSE A VIVIR
POR EL RESTO DE SU VIDA EN LA
INCERTIDUMBRE.

UNA JORNADA BIEN CUMPLIDA Y PLENA DA
LUGAR A UN SUEÑO TRANQUILO;
UNA VIDA BIEN EMPLEADA
DA LUGAR A UN A MUERTE PACIFICA.

EL ÉXITO NO DA LUGAR A EXPLICACIONES;
EL FRACASO NO DA LUGAR A EXCUSAS.

INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES | 4 |
| 2.1. Composición química y sus efectos en las propiedades del acero Hadfield | 5 |
| 2.2. Tratamiento térmico del acero de alto Manganeso | 9 |
| 2.3. Calentamiento en los aceros al Manganeso | 10 |
| 2.4. Estructuras presentes en aceros al Manganeso | 13 |
| 2.5. Propiedades de los aceros al alto Manganeso | 15 |
| 2.6. Propiedades mecánicas | 18 |
| 2.6.1. Prueba o ensayo de tensión | 19 |
| 2.6.1.1. Resistencia a la tensión | 21 |
| 2.6.1.2. Modulo de Young | 21 |
| 2.6.1.3. Carga máxima | 22 |
| 2.6.1.4. Límite de elasticidad | 22 |
| 2.6.2. Prueba de dureza | 22 |
| 2.6.3. Microscopia | 24 |
| 2.6.3.1. Microscopia óptica | 25 |
| 2.6.3.2. Microscopia de barrido (SEM) | 25 |
| 3. MODELO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA | 27 |
| 3.1. Contrastes lineales entre medias de tratamientos | 32 |
| 3.2. Superficie de respuesta | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 4. MATERIAL Y MÉTODOS | 36 |
| 4.1. Diseño experimental | 36 |
| 4.2. Preparación de las probetas | 37 |
| 4.3. Ensayo de tensión | 38 |
| 4.4. Ensayo de dureza | 39 |
| 4.5. Microscopia óptica | 39 |
| 4.6. Microscopia de barrido (SEM) | 40 |
| 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 41 |
| 5.1. Ensayo de tensión | 41 |
| 5.1.1. Modulo de Young | 41 |
| 5.1.2. Carga máxima o resistencia a la tensión | 48 |
| 5.1.3. Límite de elasticidad o esfuerzo de cedencia | 56 |
| 5.2. Prueba de dureza | 63 |
| 5.3. Resultados de microscopia (óptica y de barrido SEM) | 71 |
| 6. CONCLUSIONES | 80 |
| | |
| ANEXOS | 82 |
| | |
| Anexo 1 Tablas de Análisis de Varianza (ANOVA) | 83 |
| Anexo 2 Gráficas Esfuerzo - Deformación | 86 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 96 |

1.- INTRODUCCIÓN

El acero ha sido uno de los materiales con mayor influencia en el desarrollo tecnológico de nuestra civilización, debido a que es uno de los más adaptables, ya que puede elaborarse con la suficiente dureza como para cortar vidrios, con bastante flexibilidad para ser utilizado como sujetapapeles o convertido en las hojas de metal que se usan para hacer latas. Puede hacerse elástico para los muelles de automóviles o máquinas de escribir, o rígido para las ruedas de vagones ferroviarios. Se transforma en alambre de una centésima de centímetro de espesor, o en vigas gigantescas para puentes y edificios. Se hace resistente al calor, a la herrumbre y a la corrosión química. Los materiales básicos con los que se fabrica (mineral de hierro, carbón bituminoso y piedra caliza) son relativamente abundantes.

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. Existen miles de aceros que tienen distintas composiciones y que han sido sometidos a diferentes tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas dependen fundamentalmente del contenido de carbono.

Los aceros más comunes se clasifican según su contenido de carbono, que puede ser, bajo, mediano y alto. Además, en cada grupo existen subclases de acuerdo con la concentración de otros elementos. Los aceros al carbono sólo contienen concentraciones residuales de otros elementos distintos al carbono. Los elementos de aleación se añaden intencionalmente en concentraciones predeterminadas con el objeto de obtener propiedades especiales, tal es el caso de la adición de manganeso, cuyas propiedades obtenidas se mencionan a continuación.

El intervalo de composición en el cual los aceros al manganeso retienen una estructura austenítica a baja temperatura es amplio, sin embargo, para grandes secciones de piezas, es difícil conservar una estructura austenítica total, debido al efecto de masa que se presenta, aun cuando los contenidos de carbono y manganeso sean los adecuados, este efecto es rápidamente producido después del enfriamiento, por los micro constituyentes que se presentan, que son productos de la transformación de la austenita.

Los aceros con alto manganeso y alto carbono llamados también Hadfield, en honor a su descubridor, son usados en aquellos servicios donde se requiere que el material tenga resistencia al alto impacto, con abrasión o alto impacto con fricción metal – metal, como ejemplo industriales de estos usos tenemos: industria minera en sus molinos, quebradoras, martillos de molienda, industria de ferrocarriles en los cambios de vías, industrias de movimientos de tierras en los dientes de cargadores frontales, etc.

Estos usos se deben a las propiedades metalúrgicas del acero, por su alto contenido de carbono y manganeso que estabilizan a la austenita por medio de un enfriamiento rápido. Esta condición de estabilización es de forma metaestable, ya que con una cantidad de energía, sea mecánica o térmica, se precipitan carburos en zonas preferenciales, obteniéndose de esta forma una modificación muy marcada en las propiedades mecánicas del acero Hadfield.

Existen varios tipos de acero Hadfield que se basan en los porcentajes de carbono y manganeso, pero con la adición de elementos de aleación como: cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio y bismuto. Son aceros modificados para productos que requieren la fabricación de piezas con tamaños de sección grande y aumento de espacio de las estructuras de la austenita.

Los aceros Hadfield son muy difíciles de maquinar, debido a su composición cristalina; para que sean maquinables requieren antes un tratamiento térmico cuyo fin es reblandecer dicha estructura, así como, el uso de herramientas de gran dureza y resistencia al desgaste, tales como insertos de carburos.

Como ya fue descrito los aceros Hadfield son de gran importancia a nivel industrial; por ende, se han realizado diferentes estudios relacionados con sus propiedades mecánicas, por lo que es importante contar con modelos de superficie de respuesta consistentes que nos permitan predecir con cierto grado de exactitud las diferentes propiedades mecánicas del material sometido a diferentes condiciones de tiempo y temperatura durante el tratamiento térmico de temple. La utilidad de contar con modelos es que nos

permiten conocer la respuesta del material en todo el intervalo experimental, y no únicamente en las condiciones tiempo-temperatura fijadas en el estudio. Además permite determinar las regiones críticas para cada propiedad mecánica de interés.

El objetivo del presente trabajo es obtener los modelos de superficie de respuesta de las propiedades mecánicas del acero Hadfield sometido al tratamiento térmico de temple.

Aunque las propiedades mecánicas del acero Hadfield templado son conocidas, estas se refieren sólo a algunas combinaciones definidas de tiempo-temperatura en el tratamiento térmico de temple, pero no hay una descripción de las propiedades mecánicas en todo un intervalo de tiempo-temperatura. La respuesta mecánica del material en todo el intervalo experimental de tiempo-temperatura, conforma un sistema tridimensional conocido como superficie de respuesta. Se pueden determinar las zonas críticas para dichas propiedades. En los métodos tradicionalmente usados, únicamente se reportan diagramas bidimensionales, por lo que este trabajo aporta un avance en la interpretación y exploración de resultados obtenidos a partir de datos experimentales.

Tanto diagramas bidimensionales como tridimensionales se generan a partir de ecuaciones. En el presente trabajo las ecuaciones resultantes son polinomios que generan superficies, las cuales representan las repuestas de las propiedades mecánicas involucradas (Dureza, Módulo de Young, Límite Elástico y Carga Máxima) contra el tiempo y la temperatura en la amplitud experimental definida en este trabajo.

Modelar dichas superficies de respuesta por aproximación polinomial a partir de datos experimentales obtenidos en el laboratorio constituye el objetivo central del presente trabajo de tesis.

2.- ANTECEDENTES

Los aceros austeníticos al Manganeso derivan del primer acero austenítico al manganeso que contenía aproximadamente 1.2% C y 12% Mn, y fué descubierto por Sir Robert Hadfield en 1882. Son usados en donde se requiere que el material tenga alta resistencia al impacto y a la abrasión, por lo que este material también combina alta resistencia y ductilidad con una alta capacidad de endurecimiento por trabajo y buena resistencia a la abrasión, debido a lo cual tiene buena aceptación. ^[11,III,VII]

Dentro de las aplicaciones de este acero de alta aleación, tenemos, la industria minera en sus molinos, quebradoras de piedra, martillos de molienda, perforadoras en torres de petróleo, minería, manufacturación del cemento, bombas, manipulación de grava y rocas, etc. Otro uso es en las desviaciones de ferrocarril, donde los múltiples impactos en las intersecciones son muy severos; debido a que este material resiste el desgaste metal con metal, es usado en piñones, engranes, ruedas de ferrocarril, y en muchos otros elementos de maquinaria donde se requiere este tipo de acero. ^[11]

Los aceros austeníticos al Manganeso, también llamados aceros Hadfield, son aleaciones extremadamente tenaces y no magnéticas; En las cuales su mecanismo de endurecimiento por transformación ha sido suprimido por el alto contenido de Manganeso y un rápido enfriamiento desde alta temperatura. Se caracterizan por su alta resistencia, ductilidad y su excelente resistencia al desgaste. ^[XII]

El intervalo de composición en el cual los aceros al manganeso retienen una estructura austenítica a baja temperatura es amplia, sin embargo, los contenidos de carbono y manganeso no son los adecuados para grandes secciones de piezas para conservar la estructura de austenita. El efecto de masa en la pieza es rápidamente producido después del enfriamiento, por los microconstituyentes que se presentan, que son productos de la transformación de la austenita. ^[XIV]

Existen varios tipos de acero Hadfield, que se basan en los porcentajes de carbono y manganeso, pero con la adición de elementos de aleación como; cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio y

bismuto. Son aceros modificados para productos que requieren la fabricación de piezas con tamaños de sección grande, aumento de solubilidad de las estructuras de la austenita, etc.

Los aceros Hadfield o alto manganeso se norman bajo ASTM A-128, Tabla 2.1. ^[11]

Tabla 2.1
Aceros al Manganeso (ASTM)^[11]

| Grado | Composición | | | | | | |
|-------|-------------|------------|---------|---------|---------|----------|---------|
| | C | Mn | Cr | Mo | Ni | Si (Máx) | P (Máx) |
| A | 1.05-1.35 | 11.0 min | ---- | ---- | ---- | 1.00 | 0.07 |
| B-1 | 0.9-1.05 | 11.5-14.0 | ---- | ---- | ---- | 1.00 | 0.07 |
| B-2 | 1.05-1.2 | 11.05-14.0 | ---- | ---- | ---- | 1.00 | 0.07 |
| B-3 | 1.12-1.28 | 11.05-14.0 | ---- | ---- | ---- | 1.00 | 0.07 |
| B-4 | 1.2-1.35 | 11.05-14.0 | ---- | ---- | ---- | 1.00 | 0.07 |
| C | 1.05-1.35 | 11.05-14.0 | 1.5-2.5 | ---- | ---- | 1.00 | 0.07 |
| D | 0.7-1.3 | 11.05-14.0 | ---- | ---- | 3.0-4.0 | 1.00 | 0.07 |
| E-1 | 0.7-1.3 | 11.05-14.0 | ---- | 0.9-1.2 | ---- | 1.00 | 0.07 |
| E-2 | 1.05-1.45 | 11.05-14.0 | ---- | 1.8-2.1 | ---- | 1.00 | 0.07 |
| F | 1.05-1.35 | 6.0-8.0 | ---- | 0.9-1.2 | ---- | 1.00 | 0.07 |

2.1 COMPOSICION QUIMICA Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL ACERO HADFIELD.

En la mayoría de las fundiciones, la composición nominal contiene 1.2% de carbono y de 12% a 13% de manganeso como elementos fundamentales. La producción industrial usa entre 1% a 1.4% de carbono y de 10% a 14% de manganeso según la norma ASTM conteniendo generalmente el valor medio de esta composición química; en los límites inferiores decrece la resistencia a la tensión. ^[11]

El carbono tiene efecto en el límite elástico, porque al disminuir éste también decrece el límite elástico, aunque puede verse enmascarado por el tamaño del cristal, sin embargo, el porcentaje óptimo es de 1.15%.

Los niveles elevados de carbono, figura 2.1 causan problemas en el tratamiento térmico del acero. Los bajos contenidos de carbono ayudan a eliminar el efecto de fragilización por precipitación de carburos, por abajo del límite de enfriamiento. [1,2,10]

El manganeso con límites de 10% a 14%, no tiene efecto significativo en el límite elástico, pero si beneficia la resistencia a la tensión y la ductilidad, figura 2.2, con menos del 10% de manganeso, la resistencia mecánica decrece rapidamente y la falla puede ser en la mitad del tiempo normal de uso; Por abajo del 8% de manganeso, el acero tiende a endurecerse al aire por la formación de estructuras de transformación metalúrgica. [11]

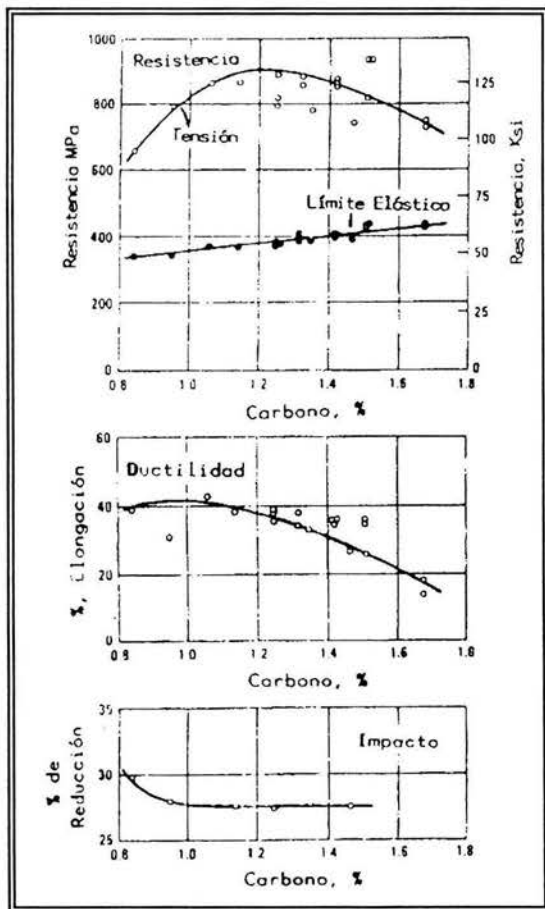


Figura 2.1 Cambio de las propiedades mecánicas con el contenido de carbono en un acero austenítico con 13% de manganeso. [11]

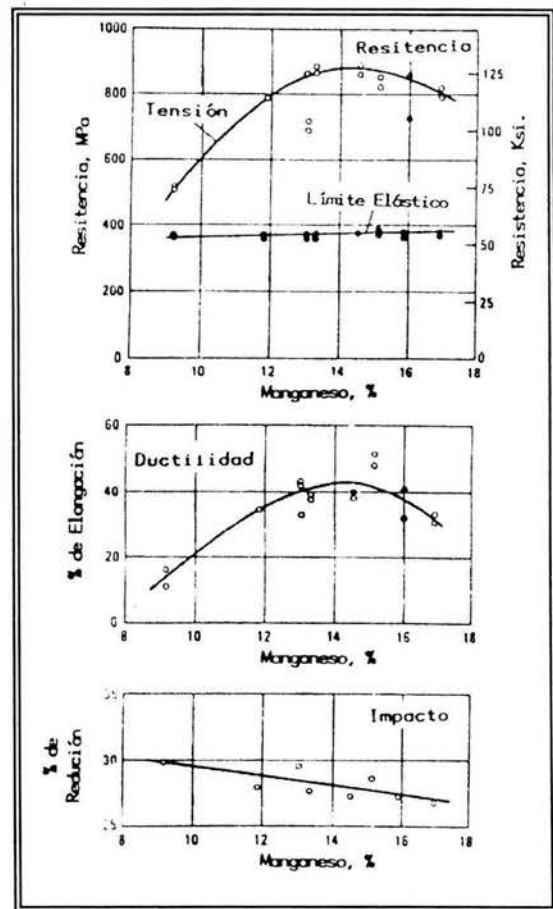


Figura 2.2 Cambio de las propiedades mecánicas con el contenido de manganeso, en un acero austenítico con 1.15% de carbono. [11]

La composición química permite cualquier transformación a la austenita cuando las aleaciones son templadas en agua por arriba de la línea A_{cm} . Esto significa que el material pierde ductilidad en secciones gruesas. El efecto se debe a la precipitación de carburos intercrystalinos en los bordes de cristal, figura 2.3. [II,XII,XVII]

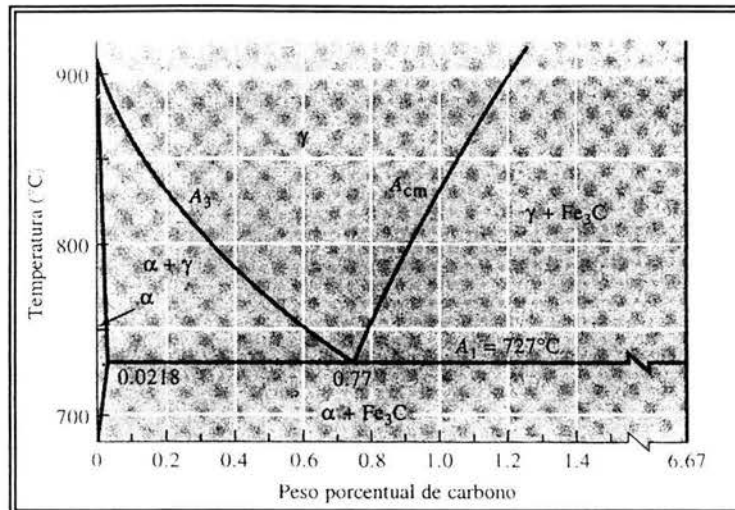


Figura 2.3
Solubilidad de Carbono en un Acero [4]

El efecto del contenido de carbono y manganeso sobre la temperatura, M_s , de una austenita totalmente homogénea se observa en la figura 2.4. [1]

El comportamiento de un acero Hadfield depende básicamente del contenido presente de carbono y manganeso.

El silicio se agrega en la fabricación de fundiciones con un porcentaje menor de uno; los porcentajes hasta 1% son para elevar el límite elástico y reducir la ductilidad del acero. [11]

El Silicio y Fósforo son dos elementos nocivos por arriba 2.2% y 0.07% respectivamente; el primero decrece la resistencia a la tensión y el segundo da fragilidad en caliente.

El Fósforo reduce la soldabilidad del acero cuando este presente, el máximo es de 0.05% para evitar su ruptura. [IV]

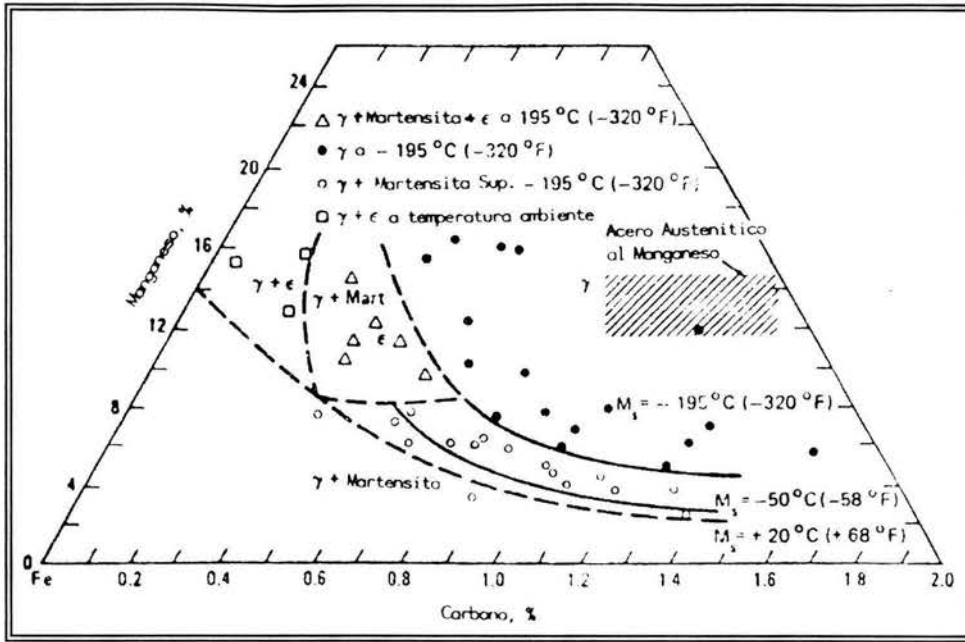


Figura 2.4 Variaciones de la temperatura M_s con Los contenidos de Carbono y Manganeso. ^[11]

Los elementos de aleaciones tales como; cromo, molibdeno y níquel también modifican el límite elástico, resistencia a la tensión y ductilidad selectivamente figura 2.5.

Níquel, aumenta considerablemente la estabilización de la austenita por efecto austenitizante de la estructura del hierro.

Cromo, este es un elemento que depende del porcentaje de carbono presente en el acero. Con contenidos bajos no tiene efecto en la estabilización de la austenita, pero si en las propiedades mecánicas. A mayor concentración se verá favorecida la formación de martensita y de carburos intercrystalinos. ^[10,11,15]

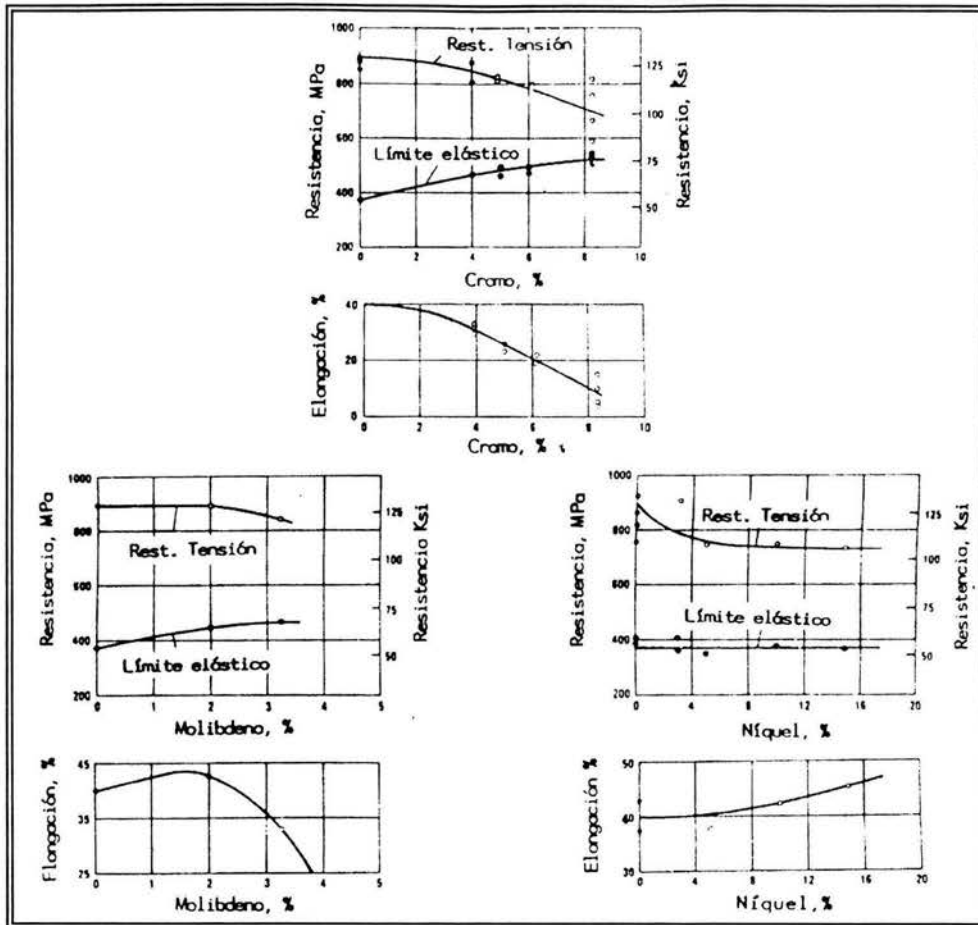


Figura 2.5 Efecto en las propiedades mecánicas de un acero de alto Manganeso con los contenidos de Ni, Mo y Cr. ^[11]

2.2 TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO DE ALTO MANGANESO.

Las características de un acero al alto manganeso en resistencia y tenacidad después del temple en agua, se debe a la homogenización de la estructura austenítica, sin embargo, pueden aparecer carburos que dependiendo de su continuidad y localización, imparten fragilidad en el material.

La figura 2.3 muestra el resultado de la relación entre la temperatura de calentamiento y la concentración de Carbono, para obtener las estructuras de un acero de alto manganeso. Para alcanzar la máxima resistencia, las temperaturas de austenitización deben de ser por arriba de

A_{cm} y de ésta forma el acero pueda ser totalmente austenítico y el carbono completamente solubilizado en la estructura de la austenita.^[1]

El intervalo de temperatura comunmente usado para la austenitización completa es de 990°C a 1100°C; el tiempo de permanencia no es crítico pero se puede establecer entre 30 a 45 minutos por pulgada de sección.

También estos aceros tienen un elevado riesgo de decarburización por el porcentaje de carbono presente y su elevada temperatura de austenitización. Cuando sucede el fenómeno de decarburización, la transformación de la austenita a otros componentes, principalmente a martensita, genera esfuerzos entre las zonas y el riesgo de formación de fracturas entre ellas es elevada.

2.3 CALENTAMIENTO EN LOS ACEROS AL MANGANESO.

Cuando se calienta un acero de alto manganeso por arriba de 318°C, su fragilización se verá aumentada por la transformación de la austenita metaestable a carburos de manganeso que se precipitan a borde de cristal, la precipitación se ve favorecida entre mas alta sea la temperatura del sobrecalentamiento y que no sobrepase A_{cm} .^[1,15]

Las propiedades mecánicas de los aceros con 13% de manganeso, entre 45°C y 205°C, son adecuados para excelentes para múltiples aplicaciones, pero no se recomiendan en aplicaciones de desgaste para altas temperaturas por su estructura inestable entre 260°C y 870°C. En altas temperaturas carecen de resistencia mecánica y ductilidad. La resistencia a la tensión, límite elástico y elongación entre -195°C y 95°C para aceros conformados mecánicamente con 1.4% carbono, 12.5% manganeso y 0.12% silicio se muestran en la Tabla 2.2

Los aceros fundidos a -73°C conservan el 85% de sus propiedades de resistencia al impacto, como se presenta en la tabla 2.3, dando un factor de seguridad mayor que los aceros ferríticos, en servicios que demanden alto impacto con abrasión, fricción metal-metal a baja temperatura.

Asociada a la fragilización de alta temperatura, por el sobrecalentamiento por arriba de 300°C, existen cambios también en las propiedades físicas por las transformaciones metalúrgicas existentes.

Tabla 2.2
Propiedades mecánicas de un acero con 1.4%C - 12%Mn
a varias temperaturas. ^[11]

| Temperatura °C | Resistencia a la Tensión lb/in ² | Límite elástico lb/in ² | elongación % | Dureza H. V. |
|-------------------|---|--|-----------------|-----------------|
| 98 | 151,000 | 63,000 | 56 | 518 |
| 91 | 163,000 | 58,000 | 68 | --- |
| 23 | 151,000 | 67,000 | 48 | 524 |
| 22 | 158,000 | 43,000 | 62 | --- |
| -30 | 150,000 | 70,000 | 36 | 470 |
| -97 | 147,000 | 62,000 | 25 | --- |
| -110 | 138,000 | 76,000 | 25 | 438 |
| -150 | 137,000 | 101,000 | 12 | --- |
| -195 | 137,000 | 124,000 | 4 | 317 |
| -200 | 136,000 | 117,000 | 4 | --- |

Tabla 2.3
Resistencia al impacto (Charpy "V"). ^[14]

| Composición % | | | | Prueba de impacto | | | |
|---------------|------|------|------|-------------------|-------|---------------------|-------|
| | | | | A 24°C (75°F) | | A -73°C (-100°F) | |
| C | Mn | Si | Ni | J | ft*lb | J | ft*lb |
| 1.03 | 12.9 | 0.52 | --- | 128 | 94.5 | 71 | 52.5 |
| 1.18 | 13.0 | 0.50 | --- | 144 | 106.0 | 79 | 58.5 |
| 1.19 | 14.6 | 0.50 | --- | 141 | 104.0 | 79 | 58.5 |
| 0.84 | 12.5 | 0.48 | 3.46 | 136 | 100.0 | 108 | 80.0 |
| 1.17 | 12.7 | 0.53 | 3.56 | 142 | 104.5 | 119 | 88.0 |

Tanto la composición química y temperatura influyen en los cambios de conductividad y expansión térmica, como se muestra en la tabla 2.4.

La expansión térmica es una característica de los aceros al Manganeso como la que presentan los aceros austeníticos inoxidables Cromo-Níquel. El cambio en longitud es de 1.5 veces mayor que los aceros ferríticos.

Su coeficiente de expansión térmica lineal es de $18 \text{ mm/m}^\circ\text{C}$, Figura 2.6. Las transformaciones de la austenita a otras estructuras, como carburos y perlita modifican el coeficiente de expansión térmica en 360°C y 760°C .

Tabla 2.4
Expansión térmica de un acero con 13%
de Manganeso. ^[11]

| Temperatura $^\circ\text{C}$ | Calor especifico medio $\text{J/Kg}^\circ\text{K}$ | Coficiente medio De expansión Térmica Desde 0°C $\mu\text{m/m}^\circ\text{K}$ | Resistencia Eléctrica $\text{n}\Omega \text{ m}$ | Conductividad térmica $\text{W/m }^\circ\text{K}$ |
|---------------------------------|--|---|--|---|
| 0 | 494 | --- | 6.65 | 13.2 |
| 50 | 510 | --- | 7.11 | 14.0 |
| 100 | 527 | 18.01 | 7.57 | 14.9 |
| 150 | 553 | --- | 8.02 | 15.7 |
| 200 | 573 | 19.37 | 8.47 | 16.5 |
| 250 | 590 | --- | 8.89 | 17.4 |
| 300 | 603 | 20.71 | 9.31 | 18.0 |
| 350 | 607 | --- | 9.69 | 18.6 |
| 350 a 650 | (a) | (a) | (a) | (a) |
| 700 | --- | 20.49 | 11.53 | 21.8 |
| 750 | --- | --- | 11.80 | 21.8 |
| 800 | --- | 21.86 | 12.11 | 22.2 |
| 850 | --- | --- | 12.40 | 22.4 |

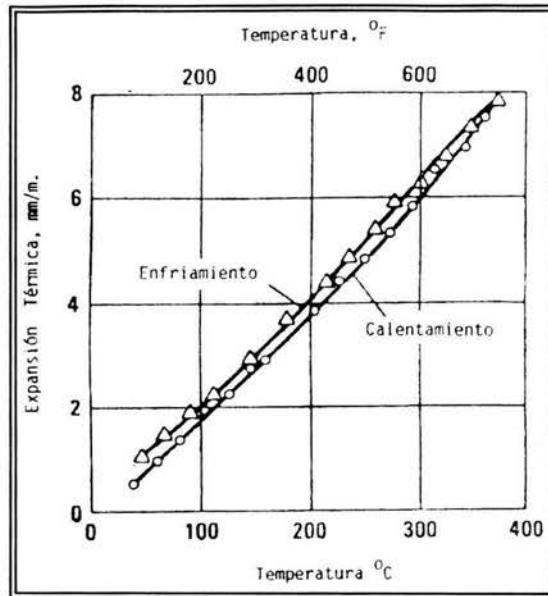


Figura 2.6 Expansión térmica de un acero con 13% de manganeso
 composición del acero: 1.18%C, 13Mn, 0.5Si tratado térmicamente a 1100°C
 por 2 horas y templado en agua. ^[11]

2.4 ESTRUCTURAS PRESENTES EN ACEROS AL MANGANESO

La estructura cristalina fundamental de los aceros Hadfield o alto manganeso es el cúbico de caras centradas, esta estructura se presenta por efecto austenitizante del manganeso, a la concentración del 13%, para presentar la estructura gama del hierro.

La presencia de estructuras como carburos, perlita o martensita dependerán de la velocidad de enfriamiento, masa de la pieza y composición química.

Los aceros al manganeso se consideran como materiales frágiles, pues a mayor cantidad de este elemento de aleación su disminuye la resistencia a la tensión, esto se observa en la tabla 2.5, pero con la adición de elementos de aleación o contenidos de carbono del 1.1 % aproximado, sus propiedades se mejoran significativamente. En la aplicación de soldaduras, tanto en material base como el de aporte tiene los mismos comportamientos por el efecto del calentamiento.

El manejo de la composición química es para evitar la formación de carburos y las transformaciones de la austenita, para evitar o reducir la probabilidad de fractura del acero austenítico, en la solidificación o por el efecto del enfriamiento cuando se calienta [11].

Tabla 2.5
Propiedades mecánicas de
Aceros al Manganeso fundidos. ^[11]

| Composición % | | | | Límite elástico ksi | Resistencia a la tensión ksi | elongación % | Reducción de área % | Resistencia al impacto | | Dureza HB |
|------------------------------------|------|------|---------|------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------|-------|--------------|
| C | Mn | Si | Otro | | | | | J | ft-lb | |
| Aceros al carbono | | | | | | | | | | |
| 0.85 | 11.2 | 0.57 | --- | --- | 64 | 14.5 | --- | --- | --- | --- |
| 0.95 | 13.0 | 0.51 | --- | --- | 61 | 14.0 | --- | --- | --- | --- |
| 1.11 | 12.7 | 0.54 | --- | 52 | 65 | 4.0 | --- | --- | --- | --- |
| 1.27 | 11.7 | 0.56 | --- | --- | 52 | 2.0 | --- | --- | --- | --- |
| 1.28 | 12.5 | 0.94 | --- | --- | 48 | 1.0 | --- | 3.4 | 3.4 | 245 |
| 1.36 | 20.2 | 0.60 | --- | --- | 62 | 1.0 | --- | --- | --- | 283 |
| Aceros al manganeso, 1Mo. | | | | | | | | | | |
| 0.61 | 11.8 | 0.17 | 1.10 Mo | 46 | 103 | 27.5 | 23 | --- | --- | 163 |
| 0.75 | 13.9 | 0.58 | 0.90 Mo | 49 | 107 | 39.5 | 30 | --- | --- | 183 |
| 0.83 | 11.6 | 0.38 | 0.96 Mo | 50 | 101 | 30.0 | 29 | --- | --- | 163 |
| 0.89 | 14.1 | 0.54 | 0.96 Mo | 52 | 100 | 29.5 | 22 | --- | --- | 196 |
| 1.16 | 13.6 | 0.60 | 1.00 Mo | 58 | 81 | 13.0 | 15 | --- | --- | 185 |
| 0.93 | 13.6 | 0.67 | 1.10 Mo | 53 | 74 | 11.0 | 16 | 72 | 53 | 188 |
| 0.99 | 12.6 | 0.60 | 0.96 Mo | --- | 67 | 6.0 | --- | --- | --- | --- |
| 0.98 | 12.6 | 0.60 | 0.87 Mo | --- | 63 | 4.0 | --- | --- | --- | --- |
| 0.95 | 12.6 | 0.60 | 0.87 Mo | 50 | 56 | 4.0 | 4 | --- | --- | --- |
| 1.30 | 13.1 | 0.78 | 0.87 Mo | --- | 63 | 2.0 | --- | 8 | 6 | 230 |
| 1.33 | 19.8 | 0.60 | 0.99 Mo | --- | 73 | 2.5 | --- | --- | --- | 231 |
| Aceros al Manganeso, 2 Mo | | | | | | | | | | |
| 0.52 | 14.3 | 1.47 | 2.40 Mo | 54 | 87 | 15.5 | 13 | --- | --- | 220 |
| 0.70 | 13.6 | 0.63 | 2.00 Mo | 52 | 114 | 41.0 | 29 | --- | --- | 180 |
| 0.75 | 14.1 | 0.99 | 2.00 Mo | 53 | 108 | 34.5 | 27 | --- | --- | 183 |
| 0.91 | 14.1 | 0.60 | 2.00 Mo | 57 | 102 | 27.5 | 21 | --- | --- | 196 |
| 1.24 | 14.1 | 0.64 | 3.00 Mo | 64 | 87 | 7.5 | 10 | --- | --- | 135 |
| 1.40 | 12.5 | 0.62 | 2.10 Mo | 61 | 80 | 3.5 | 5 | --- | --- | 228 |
| 1.34 | 12.0 | 0.43 | 2.20 Mo | 60 | 63 | 3.5 | 7 | --- | --- | 235 |
| Aceros al Manganeso, 3.5 Ni | | | | | | | | | | |
| 0.75 | 13.0 | 0.95 | 3.65 Ni | 43 | 95 | 36.0 | 26 | --- | --- | 150 |
| 0.80 | 13.5 | 0.53 | 3.61 Ni | --- | 77 | 26.0 | --- | --- | --- | --- |
| 0.91 | 03.3 | 0.53 | 3.38 Ni | --- | 74 | 24.0 | --- | --- | --- | --- |
| Aceros 6Mn – 1Mo | | | | | | | | | | |
| 0.90 | 5.8 | 0.37 | 1.46 Mo | 47 | 49 | 2.0 | --- | 9 | 7 | 181 |
| 1.00 | 6.0 | 0.43 | 1.03 Mo | 48 | 53 | 2.0 | 3 | --- | --- | 195 |
| 0.89 | 6.3 | 0.60 | 1.20 Mo | --- | 48 | 1.0 | --- | --- | --- | --- |
| 1.27 | 6.1 | 0.42 | 1.07 Mo | 53 | 58 | 1.0 | 1 | 3 | 2 | 273 |

2.5 PROPIEDADES DE LOS ACEROS AL ALTO MANGANESO

Propiedades Físicas.- Las propiedades físicas de un acero al manganeso, se resumen en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6
Propiedades mecánicas de aceros tipo
austeníticos al manganeso. ^[11]

| Tipo | Composición química, % | | | | | | R.T. ksi | L.E. ksi | Elong. % | R.A. % | Dureza HB |
|---------|------------------------|-------|---------|---------|---------|-----|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo | | | | | |
| C - Mn | 1.0-1.4 | 11-14 | 12.1.0 | --- | --- | --- | 100-145 | 50-57 | 30-65 | 30-45 | 185-210 |
| | 1.11 | 12.7 | 0.54 | --- | --- | --- | 65 | 52 | 4 | --- | --- |
| | | | | | | | 90 | 52 | 25 | 35 | |
| | | | | | | | 66 | 47 | 18 | 25 | |
| | 1.1-1.4 | 11-14 | 0.2-0.6 | --- | --- | --- | 131-158 | 43-67 | 40-63 | 35-50 | 170-200 |
| C-Mn-Cr | 1.1-1.2 | 12-13 | 0.5 | 1.8-2.1 | --- | --- | 96-147 | 58-68 | 27-59 | 26-38 | 205-215 |
| | | | | | | | 82 | 53 | 31 | 29 | |
| | | | | | | | 81 | 56 | 20 | 19 | |
| C-Mn-Ni | 0.6-0.9 | 12-14 | 0.5-0.9 | --- | 3.4-3.6 | --- | 90-132 | 42-49 | 40-88 | | 150-180 |
| | 0.8-0.9 | 13-15 | 0.9-1.3 | --- | 2.8-4.0 | --- | 134-146 | 46-56 | 74-87 | 45 | 180 |
| C-Mn-Mo | 0.7-1.0 | 12-14 | 0.4-0.6 | --- | --- | 1.0 | 106-137 | 50-59 | 37-67 | 30-39 | 179-207 |
| | | | | | | | 80-133 | 42-55 | 27-61 | 26-60 | |
| | 1.15 | 12-14 | 0.5 | --- | --- | 1.0 | 120-144 | 56-74 | 45-53 | 31-37 | 202-207 |
| | 0.72 | 13 | | | | 1.0 | 145-147 | 53-54 | 60-72 | 43-49 | 187 |

El coeficiente de expansión es semejante a los materiales austeníticos, y las propiedades Físicas se ven alteradas por el efecto de la temperatura y el tiempo, posiblemente por la presencia de otras estructuras que imparte da fragilidad al material.

Propiedades magnéticas.- el material es no-magnético por su estructura austenítica, pero debido a la inestabilidad de la austenita cuando sufre una transformación por efecto térmico o mecánico a estructuras como martensita, perlita o carburos, lo hace magnetico.

Propiedades mecánicas.- la resistencia a la tensión se ve favorecida por el endurecimiento por trabajo, propiedad significativa de los aceros al alto Manganeso, el límite elástico también se modifica en función a la deformación, esto se observa en la tabla 2.7. Estas dos propiedades se ven influidas a tres parámetros que son, composición química, tratamiento térmico y tamaño de cristal austenítico. ^[11]

Tabla 2.7
Propiedades mecánicas en un acero austenítico
con 13% manganeso, que fue calentado a 425°C
por 48 horas. ^[11]

| Componentes % | | | | | Tamaño de grano | Templado | | calentamiento | |
|---------------|------|------|------|------|--------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| C | Mn | Si | Ni | Mo | | Resistencia A la tensión Psi | Elong. % | Resistencia A la tensión Psi | Elong. % |
| 1.31 | 12.9 | 0.33 | --- | --- | G.B. | 111,250 | 35.5 | 96,250 | 1.0 |
| | | | | | G.F | 134,500 | 42.5 | 96,250 | 1.0 |
| 1.20 | 13.0 | 0.50 | --- | --- | G.B. | 110,000 | 49.0 | 98,750 | 3.5 |
| | | | | | G.F | 129,000 | 48.0 | 99,500 | 2.0 |
| 1.03 | 12.9 | 0.52 | --- | --- | G.B. | 108,750 | 39.5 | 93,750 | 11.0 |
| | | | | | G.F. | 131,750 | 46.0 | 109,500 | 12.5 |
| 1.17 | 12.7 | 0.53 | 3.56 | --- | G.B. | 112,500 | 48.0 | 88,000 | 3.5 |
| | | | | | G.F | 115,250 | 48.0 | 99,000 | 4.5 |
| 1.15 | 12.8 | 0.51 | --- | 0.98 | G.B. | 130,000 | 48.5 | 107,000 | 19.0 |
| | | | | | G.F | 138,000 | 49.0 | 108,250 | 23.0 |

En los aceros al manganeso entre mayor sea la sección, disminuyen la ductilidad y su resistencia a la tensión, excepto cuando por un control se evita la presencia de un cristal vasto de austenita en la solidificación.

Propiedades de impacto, los aceros al alto manganeso son resistentes al alto impacto, pero esta resistencia depende de la calidad del tratamiento térmico y del tamaño de la pieza. En general a bajas temperaturas las propiedades al impacto son muy buenas, como se observa en la tabla 2.8.

Tabla 2.8
Prueba de impacto para soldaduras de acero al
Alto manganeso. ^[8]

| Temperatura de Prueba °C | Valores Ft-lb |
|-----------------------------|------------------|
| 25 | 118 |
| -17 | 96 |
| -60 | 80 |
| -100 | 55 |

2.6 PROPIEDADES MECÁNICAS

Los aceros austeníticos al manganeso, se definieron como materiales que son muy resistentes al desgaste, resistentes a los impactos, y tienen alto grado de tenacidad. Entre otras propiedades, Estas características mecánicas están asociadas con la composición química y con el arreglo atómico presentado.

Para obtener las características antes mencionadas, es necesario llevar al acero a una temperatura de austenitización y aplicarle el tratamiento térmico de temple para retener la estructura de la austenita, que es la causa principal de las propiedades que presenta.

Como el objetivo de este trabajo es el de modelar las diferentes superficies de respuesta mecánico del material en cuestión, es necesario describir los diferentes parámetros en los que se basa la caracterización del material. ^[V, XII]

2.6.1 Prueba o Ensayo de Tensión.

Si una carga es estática o bien cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección o superficie de una pieza o probeta, el comportamiento mecánico de ésta, puede ser calculado mediante un ensayo de tensión obteniéndose la gráfica esfuerzo-deformación. Esta gráfica muestra una curva, la cual como ya se mencionó, se obtiene por la acción de una carga estática sobre una probeta, es decir, mediante la aplicación suficientemente lenta de la carga, para que todas las partes de las probetas estén en equilibrio en todo instante.

Se dice que la probeta responde *elásticamente* si retorna a su *longitud* o *forma* originales cuando se retira la carga que actúa sobre ella. Se puede ver que la curva es en realidad *una línea recta* al inicio de la gráfica, así que el esfuerzo es *proporcional* a la deformación unitaria. Mantiene un comportamiento lineal hasta que el esfuerzo llega al límite elástico. [1,10,12]

Un ligero aumento en el esfuerzo mas allá del límite elástico dará como resultado un colapso del material y causara que *se deforme permanentemente*. El esfuerzo que causa la cedencia se llama *esfuerzo de cedencia* o *punto de cedencia* y la deformación permanente que se presenta se llama *deformación plástica*. Esto se puede observar en la Figura 2.7.

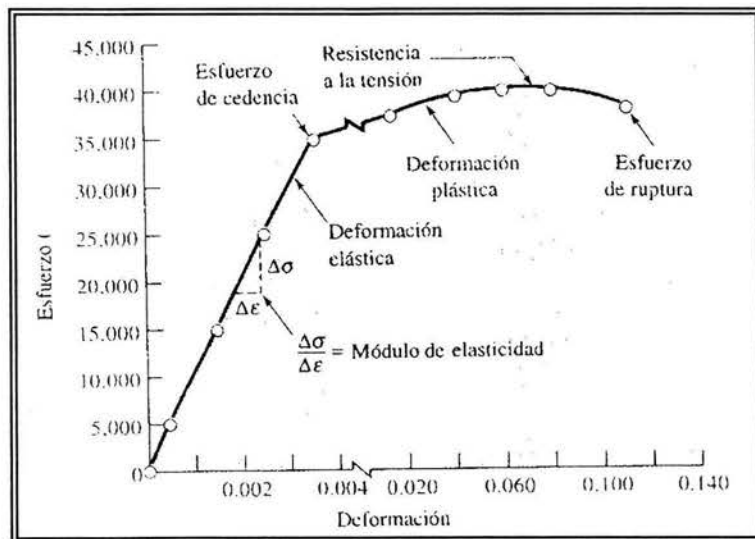


Figura 2.7

Curva Esfuerzo – Deformación [1]

Usando los datos experimentales, se determina el *esfuerzo de ingeniería* o *nominal* dividiendo la carga aplicada P entre el área original A_0 de la sección transversal de la probeta, así tenemos:

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

donde:

σ_n = esfuerzo de ingeniería o nominal, $\left[\frac{N}{mm^2} \right]; \left[\frac{N}{m^2} \right] = [Pa]$; generalmente [Mpa]

P = Carga aplicada, [Kgf]; [N]

A_0 = área de sección transversal inicial, [mm^2]

La *deformación unitaria de ingeniería* o *nominal* se encuentra por lectura directa o dividiendo el cambio en la longitud calibrada, ΔL , entre la longitud calibrada L_0 de la probeta. Entonces,

$$\varepsilon_n = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\Delta l}{l_i} \quad (2.2)$$

donde:

ε_n = deformación unitaria de ingeniería o nominal, [mm/mm]

l_f = longitud final [mm]

l_i = longitud inicial [mm]

Δl = incremento de longitud [mm]

La prueba de tensión es fundamental ya que a partir de ella se pueden encontrar valores y propiedades que son utilizados en el diseño de elementos, tanto de máquinas como de estructuras; etc.

Las propiedades importantes antes mencionadas son las que siguen:

2.6.1.1 *Resistencia a la Tensión.*

Después de iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo, y después disminuye hasta que finalmente se produce la fractura. La *resistencia a la tensión*, es la tensión en el punto máximo del diagrama *esfuerzo-deformación nominal o ingenieril*, Figura 2.7. Esto corresponde a la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción; si esta tensión es aplicada y mantenida, se producirá la rotura. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la sección estrecha de la probeta. Sin embargo, cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina *estricción o cuello*, y toda la deformación subsiguiente está confinada en la estricción y la fractura de la probeta ocurre en este punto. ^[1,12,15]

2.6.1.2 *Módulo de Young*

El *módulo de Young* o también conocido como *módulo de elasticidad*, E , es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica, su expresión matemática es:

$$E = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} \quad (2.5)$$

donde

E = Módulo de Young [Pa]

El esfuerzo y la deformación de la ecuación ya se definieron anteriormente.

Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace entre átomos. Una pendiente muy acentuada o abrupta en la gráfica esfuerzo-deformación Figura 2.7, en la zona de equilibrio indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente, por lo que, el material tiene un módulo de elasticidad alto.

2.6.1.3 Carga Máxima

Como su nombre lo dice es la carga máxima que puede soportar un material, a partir de este punto el material sufre un encuellamiento o constricción, hasta llegar a la fractura; En los materiales frágiles al aplicar una carga mayor que la carga máxima, éstos inmediatamente sufrirán fractura. En materiales dúctiles, esta carga determina el inicio del encuellamiento, hasta llegar a la ruptura. ^[15]

2.6.1.4 Límite de Elasticidad

Es el esfuerzo al cual la deformación plástica se hace importante. En los metales, es por lo general el esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen. El esfuerzo de cedencia es, por lo tanto, el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico de un material. ^[1]

2.6.2 Prueba de Dureza

Otra propiedad mecánica que puede ser sumamente importante considerar es la dureza, la cual es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada, por ejemplo, una pequeña abolladura o ralladura. Los primeros ensayos de dureza se basaban en el comportamiento de los minerales junto con una escala construida según la capacidad de un material para rayar a otro mas blando. Un método cualitativo de ordenar de forma arbitraria la dureza es ampliamente conocido y se denomina escala de Mohs, la cual va desde 1 en el extremo blando para el talco hasta 10 para el diamante. A lo largo de los años se han ido desarrollando técnicas cuantitativas de dureza que se basan en un pequeño penetrador que es forzado sobre una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga. En estos ensayos se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, lo cual se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza. Las durezas medidas tienen solamente un significado

relativo y no absoluto, y es necesario tener precaución al comparar durezas obtenidas por técnicas distintas.

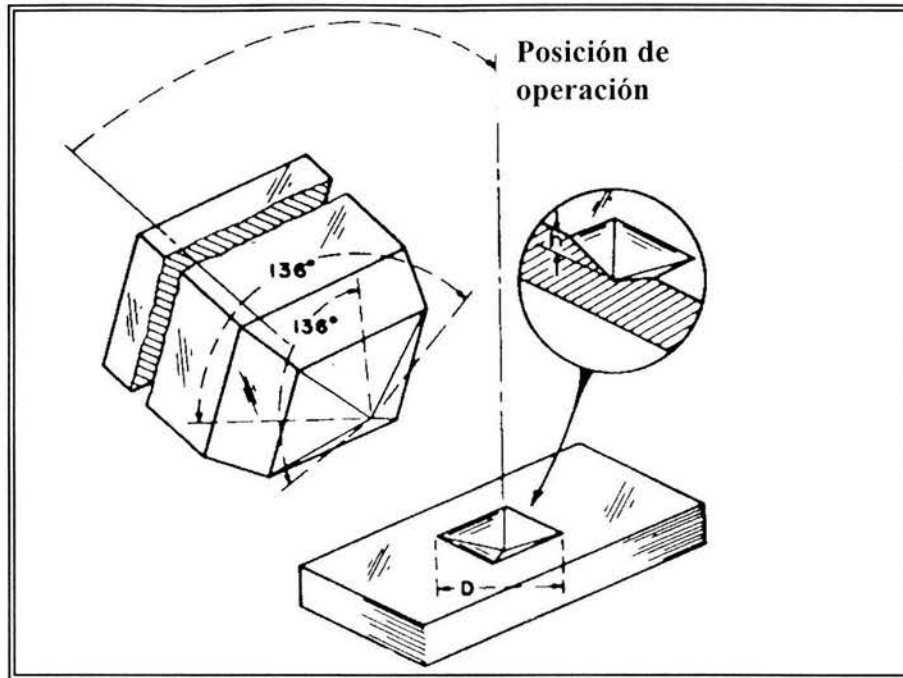


Figura 2.8
Identador Vickers ^[14]

En el presente trabajo la dureza se medirá de acuerdo a la dureza Vickers (HV, Vickers Hardness); una ventaja sobresaliente de la prueba de pirámide de diamante Vickers es que se usa una escala continua para probar todos los materiales sin atender la diferencia en sus durezas. Debido a la impresión geométrica que es hecha, independientemente de la carga aplicada, el valor de HV es razonablemente constante sobre el rango de la carga normalmente aplicada, esto da la idea de la homogeneidad del material. La habilidad de usar una amplia variedad de cargas y mantenerlas, obteniendo el mismo número de dureza hace que sea una prueba exitosa sobre materiales de diferentes espesores. En las pruebas Vickers estándar, han sido empleadas las cargas desde 1 a 120 Kgf. Las cargas arriba de 30 Kgf son frecuentemente usadas, y la carga más común es la de 10Kgf. La figura 2.8 muestra un indentador Vickers típico. ^[14]

Al desarrollar la prueba, la carga debe ser aplicada lentamente, sin impacto y manteniendo la carga en contacto durante 10 a 15 segundos. Después de remover la carga, ambas diagonales son medidas, y el valor promedio es usado para calcular la HV mediante la siguiente ecuación:

$$HV = \frac{2L \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.8544L}{d^2} \quad (2.6)$$

donde d = diagonal media, [mm]

L = Carga, [kgf]

α = Angulo entre caras (136°)

HV = Dureza Vickers [HV]

La dureza Vickers es determinada refiriéndose a las tablas de dureza correspondientes HV, para cada carga y medida de la diagonal. Estas tablas son encontradas en ASTM E92.

Los valores de la dureza Vickers son expresados primeramente la medida de dureza, seguida de la carga y finalmente el tiempo de aplicación; un ejemplo para una dureza de 200 HV que se le aplico una carga de 30 Kgf durante 15 segundos se define como: *200HV 30/15*.

2.6.3 Microscopia

La metalografía es estudio de la estructura cristalina de los metales y las aleaciones, y de las relaciones entre estas estructuras y las propiedades físicas de los metales.

Las herramientas más importantes de los metalógrafos son el microscopio y los rayos X. El examen microscópico de especímenes permite la determinación del tamaño, la estructura y la orientación de los cristales del metal; esto es su caracterización de la composición, estructura, y propiedades de los materiales. Mediante este tipo de exámenes, los metalógrafos pueden identificar un metal o una aleación, descubrir posibles impurezas y comprobar la eficacia de los tratamientos térmicos para su endurecimiento o templado. Los especímenes empleados para el examen metalográfico suelen pulirse con gran cuidado y después tratarse con ácidos diluidos; esto pone de relieve la estructura del grano, al atacar las delimitaciones entre los cristales o uno

de los componentes de una aleación. Cuando los metales han de ser examinados al microscopio electrónico, puede hacerse una réplica o molde delgado, transparente a los electrones, de la superficie atacada por el ácido, ya que el metal en bruto no transmite los rayos catódicos. Como alternativa, puede prepararse un espécimen muy fino; la microestructura observada es una proyección de la existente en el mismo. ^[VI]

2.6.3.1 Microscopia Óptica

El tipo de microscopio más utilizado es el microscopio óptico, que se sirve de la luz visible para crear una imagen aumentada del objeto. El microscopio óptico más simple es la lente convexa doble con una distancia focal corta. Estas lentes pueden aumentar un objeto hasta 15 veces. Por lo general, se utilizan microscopios compuestos, que disponen de varias lentes con las que se consiguen aumentos mayores. Algunos microscopios ópticos pueden aumentar un objeto por encima de las 2,000 veces.

La foto micrografía, que consiste en fotografiar objetos a través de un microscopio, utiliza una cámara montada por encima del ocular del microscopio. ^[VI]

2.6.3.2 Microscopia de barrido (SEM)

Hay dos tipos básicos de microscopios electrónicos: el microscopio electrónico de transmisión (Transmission Electron Microscope, TEM) y el microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope, SEM).

Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El SEM explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el TEM, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones

del haz pueden dispersarse al alcanzar la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones dispersados y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 100.000 veces o más. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que los TEM o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto. ^[VI]

3.- MODELO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Dentro de la amplia gama para representar resultados de experimentos, el diseño factorial se caracteriza por realizar todas las combinaciones posibles de los diferentes niveles de los factores o variables, así mismo, las réplicas de cada una de las dos o más variables, que suponen afectan la variable de respuesta Y . Dicho de otra manera, si el factor A tiene a niveles y el factor B tiene b niveles, debemos de analizar todas las ab combinaciones de los tratamientos experimentales, donde en general tenemos n réplicas.

Como este es un diseño factorial donde se suponen dos factores, el orden en que se hacen las abn observaciones se seleccionan al azar, por lo que es un diseño completamente aleatorizado, y la ordenación es:

Tabla 3.1 Arreglo general de un diseño Factorial de dos factores.

| | | FACTOR A | | | |
|----------|-----|--|--|-----|--|
| | | 1 | 2 | ... | b |
| Factor B | 1 | $Y_{111}, Y_{112},$ $\dots Y_{11n}$ | $Y_{121}, Y_{122},$ $\dots Y_{12n}$ | | $Y_{1b1}, Y_{1b2},$ $\dots Y_{1bn}$ |
| | 2 | $Y_{211}, Y_{212},$ $\dots Y_{21n}$ | | | $Y_{2b1}, Y_{2b2},$ $\dots Y_{2bn}$ |
| | ... | | | | |
| | a | $Y_{a11}, Y_{a12},$ $\dots Y_{a1n}$ | $Y_{a21}, Y_{a22},$ $\dots Y_{a2n}$ | | $Y_{ab1}, Y_{ab2},$ $\dots Y_{abn}$ |

Las observaciones de un experimento factorial pueden escribirse mediante el **modelo de los efectos fijos** el cual es:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Donde

y_{ijk} — lectura del efecto correspondiente.

μ — efecto medio general.

τ_i — efecto del nivel i -ésimo del factor A de los renglones.

β_j — efecto del nivel j -ésimo del factor B de las columnas.

$(\tau\beta)_{ij}$ — efecto de la interacción entre τ_i y β_j .

ε — error aleatorio que se supone normal e independientemente distribuido con media cero y varianza σ^2 .

La suposición inicial es que los efectos de los factores, así como su interacción, son desviaciones con respecto a la media general, es decir, que sus efectos son fijos, por lo tanto:

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \qquad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0 \qquad \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B (\tau\beta)_{ij} = 0$$

En un diseño factorial de dos factores, el interés se encuentra en probar la hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de los tratamientos o efectos principales, en caso de ser verdadera se aceptara, en caso contrario se tendrá una hipótesis alternativa; tanto en los renglones como en las columnas y su interacción, es decir,

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

Renglones

$$H_1 : \text{al menos una } \tau_i \neq 0$$

| | |
|-------------|---|
| Columnas | $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$ $H_1 : \text{al menos una } \beta_1 \neq 0$ |
| Interaccion | $H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para toda } ij.$ $H_1 : \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ |

Donde:

H_0 — Hipótesis nula.

H_1 — Hipótesis alternativa.

Para poder probar dichas hipótesis, se debe de realizar un análisis de varianza bifactorial.

De la tabla 3.1, sea $y_{i..}$ el total de las observaciones del i -ésimo nivel del factor A , $y_{.j}$ el total de las observaciones del j -ésimo tratamiento, e $y_{...}$ el gran total o total de las observaciones. Se definen $\bar{y}_{i..}$, $\bar{y}_{.j}$, \bar{y}_{ij} y $\bar{y}_{...}$ como los promedios correspondientes de los factores A , B , así como su interacción AB y el general, respectivamente.

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{K=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad \text{Ecuación (3.1a)}$$

$$y_{.j} = \sum_{i=1}^a \sum_{K=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j} = \frac{y_{.j}}{bn} \quad \text{Ecuación (3.1b)}$$

$$y_{ij} = \sum_{K=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij} = \frac{y_{ij}}{n} \quad \text{Ecuación (3.1c)}$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad \text{Ecuación (3.1d)}$$

donde :

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

La suma total de cuadrados corregida se expresa mediante:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \left[(\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}) + (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.}) \right]^2 \\ &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \\ &\quad + n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \end{aligned}$$

Ecuación (3.2)

Esto se debe a que los seis productos del lado derecho de la igualdad son cero. Nótese que en esta expresión la suma total de cuadrados se ha descompuesto en una suma de cuadrados debida al factor A (SC_A), en una suma de cuadrados debida al factor B (SC_B), en una suma de cuadrados debida a la interacción entre A y B (SC_{AB}), y en una suma de cuadrados debida al error.

La Ecuación 3.2 puede expresarse como:

$$SC_T = SC_A + SC_B + SC_{AB} + SC_E$$

El numero de grados de libertad esta asociado con la suma de cuadrados y se definen en la tabla 3.2 :

Tabla 3.2 Grados de libertad.

| Efecto | Grados de libertad |
|--------------------|---------------------------|
| <i>A</i> | <i>a-1</i> |
| <i>B</i> | <i>b-1</i> |
| Interaccion | <i>(a-1)(b-1)</i> |
| Error | <i>ab(n-1)</i> |
| Total | <i>abn-1</i> |

Cada suma de cuadrados dividida por sus grados de libertad se denomina **cuadrado medio** (CM) y son una estimación de la varianza, si las hipótesis nulas son ciertas. Los valores esperados de los cuadrados medios son:

$$E(CM_A) = E\left(\frac{SC_A}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

$$E(CM_B) = E\left(\frac{SC_B}{b-1}\right) = \sigma^2 + \frac{an \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1} \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

$$E(CM_{AB}) = E\left(\frac{SC_{AB}}{(a-1)(b-1)}\right) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij}^2}{a-1} \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

$$E(CM_E) = E\left(\frac{SC_E}{ab(n-1)}\right) = \sigma^2 \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

Las razones de las ecuaciones (3.3) a (3.6) que son, CM_A/CM_E , CM_B/CM_E y CM_{AB}/CM_E tienen una distribución F con $(a-1)$, $(b-1)$ y $(a-1)(b-1)$ grados de libertad en el numerador y $(ab)(n-1)$ grados de libertad en el denominador. Las regiones críticas corresponden al extremo superior de la distribución.

Las sumas de los cuadrados se calculan de la siguiente forma:

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad \text{Ecuación (3.7)}$$

$$SC_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i\cdot\cdot}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad \text{Ecuación (3.8)}$$

$$SC_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{\cdot j \cdot}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad \text{Ecuación (3.9)}$$

$$SC_{Tratamientos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\cdot}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad \text{Ecuación (3.10)}$$

$$SC_{AB} = SC_{Tratamientos} - SC_A - SC_B \quad \text{Ecuación (3.11)}$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad \text{Ecuación (3.12)}$$

$$SC_E = SC_T - SC_{Tratamientos} \quad \text{Ecuación (3.13)}$$

Contrastes lineales entre medias de tratamientos

Se define una comparación lineal o contraste lineal de los totales de tratamiento como:

$$L = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b l_{ij} y_{ij\cdot} \quad \text{donde} \quad \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b l_{ij} = 0$$

la suma de cuadrados debida a la comparación lineal L tiene un grado de libertad y esta dada por:

$$SC_L = \frac{L^2}{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b l_{ij}^2} \quad \text{Ecuación (3.14)}$$

La razón SC_L/CM_E sigue una distribución F con un grado de libertad y los grados de libertad del error, lo cual permite probar si el contraste L es significativo.

Si la suma de cuadrados de dos contrastes L_1 y L_2 son independientes, es necesario que los contrastes sean ortogonales, es decir dados:

$$L_1 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b l_{ij} y_{ij}, \quad L_2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b m_{ij} y_{ij}.$$

son ortogonales sí:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b l_{ij} m_{ij} = 0 \quad \text{Ecuación (3.15)}$$

si para un factor F se tienen $(h-1)$ grados de libertad se pueden calcular $(h-1)$ contrastes mutuamente ortogonales y entonces la suma de cuadrados de es factor es:

$$SC_F = SC_{L_1} + SC_{L_2} + \dots + SC_{L_{(h-1)}} \quad \text{Ecuación (3.16)}$$

La ventaja principal de contar con contrastes ortogonales es que se particiona la suma de cuadrados debido a los factores y a la interacción en varias sumas con un grado de libertad cada una y por lo tanto se extrae toda la información que hay en la suma de cuadrados correspondiente, lo cual permite concluir cuales contrastes son estadísticamente significativos y reducir la ecuación que modela la superficie de respuesta, como se indica mas adelante.

3.1 Superficie de Respuesta

Es de gran utilidad ajustar una **superficie de respuesta** a los niveles de los factores cuantitativos obtenidos a partir de la experimentación, con el fin de obtener una ecuación que relacione la respuesta de los factores, así como su interacción. Esta ecuación puede usarse para realizar

interpolaciones, es decir, predecir las respuestas en los niveles intermedios entre los factores en todo el rango experimental.

En situaciones en las que los niveles de los factores son equidistantes se usa el procedimiento de **polinomios ortogonales**, el cual consiste en obtener la ecuación que modele la superficie o curva de respuesta de los factores del diseño. En el caso de un diseño factorial 3 x 3, se tiene un efecto lineal y cuadrático, para cada factor y las interacciones entre los efectos. Cada efecto tiene un grado de libertad y se prueba comparando su suma de cuadrados con la media del error.

La ecuación de un modelo polinomial ortogonal completo para un diseño factorial 3 x 3 es de la forma:

$$y = \alpha_0 P_0 + \alpha_1 P_1(y_1) + \alpha_{11} P_2(y_1) + \alpha_2 P_1(y_2) + \alpha_{22} P_2(y_2) + \alpha_{12} P_1(y_1) P_1(y_2) + \alpha_{122} P_1(y_1) P_2(y_2) + \alpha_{122} P_2(y_1) P_1(y_2) + \alpha_{1122} P_2(y_1) P_2(y_2) \quad \text{Ecuación (3.17)}$$

En donde α_l representa el coeficiente lineal del factor A , α_{l22} es el coeficiente de la interacción del efecto lineal del factor A por el efecto cuadrático del factor B y así sucesivamente. Estos coeficientes se evalúan de acuerdo a,

$$\alpha = \frac{L}{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b l_{ij}^2} \quad \text{Ecuación (3.18)}$$

Donde:

α — grado de significancia.

L — Contraste lineal.

Los polinomios se evalúan de acuerdo a,

$$\text{Media} \quad P_0 = 1 \quad \text{Ecuación (3.19)}$$

$$\text{Lineal} \quad P_1 = \lambda_1 \left[\frac{y - \bar{y}}{d} \right] \quad \text{Ecuación (3.20)}$$

$$\text{Cuadrática} \quad P_2 = \lambda_2 \left[\left(\frac{y - \bar{y}}{d} \right)^2 - \left(\frac{a^2 - 1}{12} \right) \right] \quad \text{Ecuación (3.21)}$$

$$\text{Cúbica} \quad P_3 = \lambda_3 \left[\left(\frac{y - \bar{y}}{d} \right)^3 - \left(\frac{y - \bar{y}}{d} \right) \left(\frac{3a^2 - 1}{20} \right) \right] \quad \text{Ecuación (3.22)}$$

donde

a — numero de niveles del factor.

\bar{y} — media de los niveles del factor.

y — valor del factor.

d — espaciamiento entre los niveles del factor.

λ — constantes que aseguran valores enteros en los coeficientes.

La Ecuación 3.17 se denomina superficie de respuesta y predice la respuesta en niveles intermedios de los factores A y B , y permite determinar la región óptima de la respuesta.

Esta ecuación se reducirá si los contrastes obtenidos no son significativos, puesto que, solo se tomaran en cuenta aquellos contrastes que si lo sean, en los efectos lineal y cuadrático para un modelo de 3×3 , para el factor A , sus efectos son, efecto lineal, efecto cuadrático, A_L y A_Q respectivamente, para el factor B , su efecto lineal y cuadrático, B_L y B_Q y por ultimo sus interacciones $A_L \times B_L$, $A_L \times B_Q$, $A_Q \times B_L$ y $A_Q \times B_Q$.

4.- MATERIALES Y METODOS

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental se planeó de acuerdo a un diseño factorial 3 X 3, donde un factor a estudiar es el tiempo y el otro factor la temperatura; Factores determinantes en el tratamiento térmico de temple, para cada factor se definieron 3 niveles y las probetas se asignaron en forma completamente al azar, a cada combinación tiempo – temperatura (tratamiento), se asignaron 3 probetas, teniendo 27 probetas en total.

Los niveles de temperatura fueron 350, 600 y 850°C y los niveles de tiempo fueron 3, 6 y 9 horas.

En la Tabla 4.1 se muestra la distribución de las probetas a los tratamientos como se observa el espaciamiento entre las variables de tiempo y temperatura es equidistante, lo que permite desarrollar los polinomios ortogonales y, de esta manera modelar la superficie de respuesta del material.

Tabla 4.1 designación de probetas.

| | | Temperatura (°C) | | |
|-------------------|--------------------------|--|--|--|
| | | 350 (T₁) | 600(T₂) | 850(T₃) |
| Tiempo (h) | 3 (t₁) | P ₁₁₁ ,P ₁₁₂ , P ₁₁₃ | P ₁₂₁ ,P ₁₂₂ , P ₁₂₃ | P ₁₃₁ ,P ₁₃₂ , P ₁₃₃ |
| | 6 (t₂) | P ₂₁₁ ,P ₂₁₂ , P ₂₁₃ | P ₂₂₁ ,P ₂₂₂ , P ₂₂₃ | P ₂₃₁ ,P ₂₃₂ , P ₂₃₃ |
| | 9 (t₃) | P ₃₁₁ ,P ₃₁₂ , P ₃₁₃ | P ₃₂₁ ,P ₃₂₂ , P ₃₂₃ | P ₃₃₁ ,P ₃₃₂ , P ₃₃₃ |

La planeación del desarrollo experimental es primordial antes de realizar cualquier experimento, pues es aquí donde se selecciona la cantidad de unidades experimentales, así como los factores, para desarrollar un experimento que responda adecuadamente a nuestras interrogantes o que permita obtener modelos de la realidad.

4.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Las probetas de material mencionado se obtuvieron de una pieza mecánica, que era sometida a desgaste, en una quebradora de piedra. Las probetas fueron maquinadas a las dimensiones de, 19 mm alto x 10 mm de ancho x 200 mm largo, en el Centro de Asimilación Tecnológica (CAT), de la FES-C.

En la figura 4.1 se muestra el proceso de homogenización del material, este tratamiento fue aplicado para obtener una estructura homogénea, debido a que el material ya había sido utilizado y sometido a esfuerzos, por lo cual, presentaba una estructura muy irregular, las probetas fueron empaquetadas con carbono para evitar su descarburación.

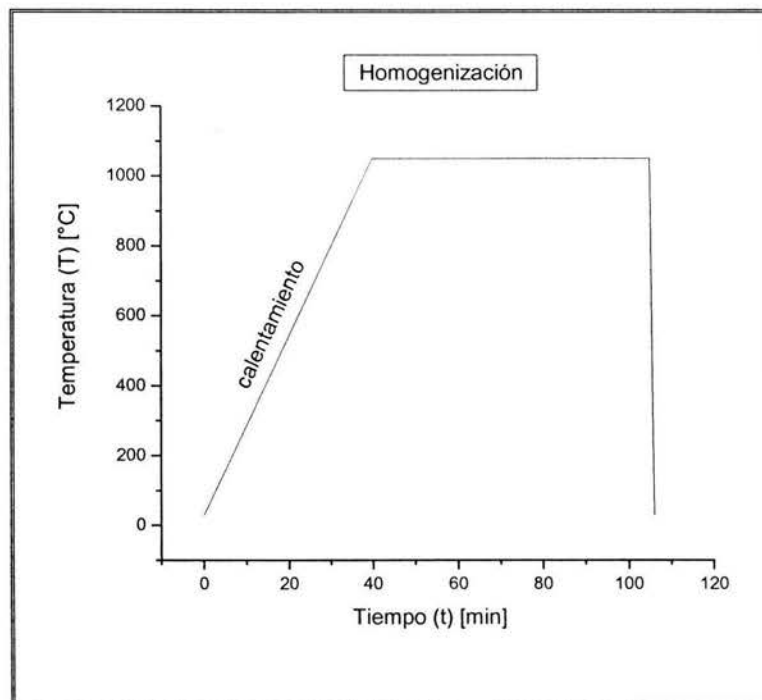


Figura 4.1 Tratamiento de homogenización

El tratamiento térmico se llevo a cabo en una mufla. Todas las probetas fueron sometidas a un tratamiento de homogenización, arriba de la línea de temperatura A_{cm} , como se muestra en la figura 4.2, con el fin de obtener una estructura austenítica (fase γ) y después de una hora de calentar, se les dio un tratamiento térmico de temple en agua agitada a temperatura de 19°C .

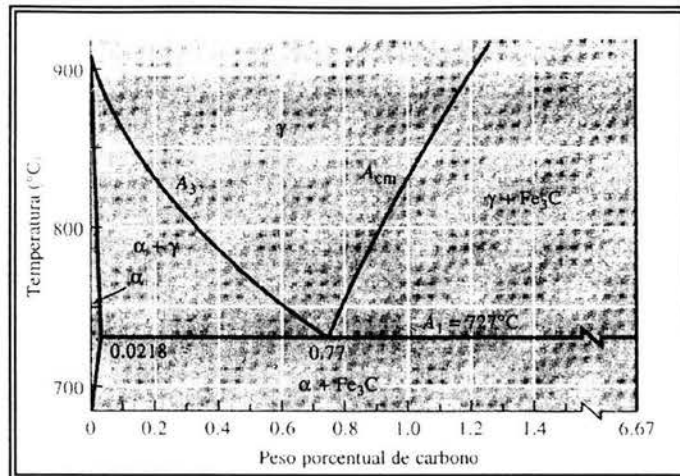


Figura 4.2 Parte parcial de diagrama $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$, donde se muestra la fase austenítica γ .^[4]

Después de la homogenización se separaron las probetas, después de calentarse a la temperatura definida durante el tiempo correspondiente se realizó el choque térmico en agua mantenida a temperatura ambiente, las probetas durante el calentamiento fueron empaquetadas con carbono para evitar su descarbonación, se asignaron 3 probetas a cada tratamiento.

4.3 ENSAYO DE TENSIÓN

Una vez tratadas las probetas térmicamente, fueron sometidas al ensayo de tensión en una máquina *Instron, serie MX*, con capacidad de *100 Ton*, ubicada en la Facultad de Ingeniería, de la UNAM. Todos los ensayos de tensión se realizaron completamente al azar.

Con el ensayo de tensión se obtuvieron las gráficas de esfuerzo [*Kgf*] contra deformación [*mm*], de tipo ingenieril, a partir de las cuales se calcula el Modulo de Young, Limite Elástico y Carga Máxima.

Una vez rotas las probetas se usaron para determinar las propiedades de dureza y realizar la microscopía.

4.4 ENSAYO DE DUREZA

Esta prueba es muy importante a considerar en los materiales, pues con esta obtenemos la propiedad de la resistencia del material a la deformación plástica al ser penetrado.

Este ensayo se realizó en un Durómetro Amsler Otto Wolper modelo D-6700, ubicado en el Centro de Asimilación Tecnológica CAT, FES-C, el cual trabaja con las escalas de durezas Rockwell, Brinell y Vickers y esta calibrado según la Norma ASTM E-18 DIML-39.

Las escala elegida fue la de Vickers, pues esta escala se usa en materiales “duros”, y utiliza un penetrador de diamante. La carga seleccionada para esta prueba fue de 10 kilogramos para todas las probetas.

Como ésta es una prueba de microdureza las superficies de las probetas deben de estar pulidas con el fin de conseguir una superficie plana, y de esta manera poder medir las distancias longitudinales que deja la huella del indentador por medio de una escala micrométrica y apoyado con un microscopio.

Se realizaron 12 indentaciones en cada probeta, las medidas obtenidas se convirtieron en dureza Vickers (*HV*) mediante la tabla correspondiente de la carga utilizada, en este caso 10 Kg.

4.5 MICROSCOPIA ÓPTICA

Esta prueba nos revela una estructura somera del material. Se llevo a cabo en el Centro de Asimilación Tecnológica CAT, FES-C, para lo cual se utilizó un Microscopio Vesamet, Union

6510, acoplándole una cámara fotográfica tipo reflex, Canon SX100, mediante la cual se obtuvieron fotografías de las probetas seleccionadas.

Las probetas seleccionadas se reportan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 designación de probetas para microscopia.

| | | Temperatura (°C) | | |
|------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 350 (T ₁) | 600(T ₂) | 850(T ₃) |
| Tiempo (h) | 3 (t ₁) | P ₁₁₂ | P ₁₂₃ | P ₁₃₂ |
| | 6 (t ₂) | P ₂₁₂ | P ₂₂₁ | P ₂₃₃ |
| | 9 (t ₃) | P ₃₁₁ | P ₃₂₂ | P ₃₃₂ |

Para obtener un buen resultado de esta prueba, las probetas se desbastaron para obtener una superficie plana, después se usó lija cada vez más fina, para finalmente pulir la probeta con paño usando alúmina de grano fino (0.3 μ) con agua, y de esta manera obtener un acabado tipo espejo. Posteriormente la probeta se atacó por el lado pulido con *Nital* (al 10%) durante 5 minutos, con el objetivo de revelar la microestructura del material.

Finalmente se colocaron al microscopio para obtener las fotografías de la microestructura presente en cada probeta.

4.6 MICROSCOPIA DE BARRIDO (SEM)

Esta prueba nos revela la microestructura más entrañable de los materiales, pues se alcanzan magnificaciones de hasta 15,000 aumentos. Esta prueba fue realizada en el Centro de Diseño y Manufactura (CDM) de Ciudad Universitaria con un microscopio tipo SEM (Scanning Electronic Microscope, por sus siglas en ingles) marca Phillips tipo XL20. También se realizó la prueba en el microscopio SEM marca JEOL JSM-25SII, ubicado en la FES-C campo 1. Las micrografías obtenidas revelan la estructura presente para cada tratamiento.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 ENSAYO DE TENSIÓN

A partir de las gráficas esfuerzo deformación, que se muestran en el anexo 1, se determinaron los diferentes valores de *resistencia a la tensión*, *módulo de Young*, *carga máxima* y *límite de elasticidad*, a partir de los cuales se modelará la superficie de respuesta correspondiente.

5.1.1 Módulo de Young

Con el valor obtenido del Módulo de Young para cada una de las probetas, se realizó un análisis de varianza, ANOVA, correspondiente al diseño factorial 3 X 3, completamente al azar, de efectos fijos, detectando efectos significativos en la temperatura, así como en las interacciones de los factores de tiempo y temperatura, no así para el tiempo, ($P < 0.05$), como se muestra en la figura 5.1.

En las tablas 5.1 y 5.2 se resumen los valores promedios del Módulo de Young así como sus desviaciones estándar para cada temperatura y cada tiempo.

Modulo de Young

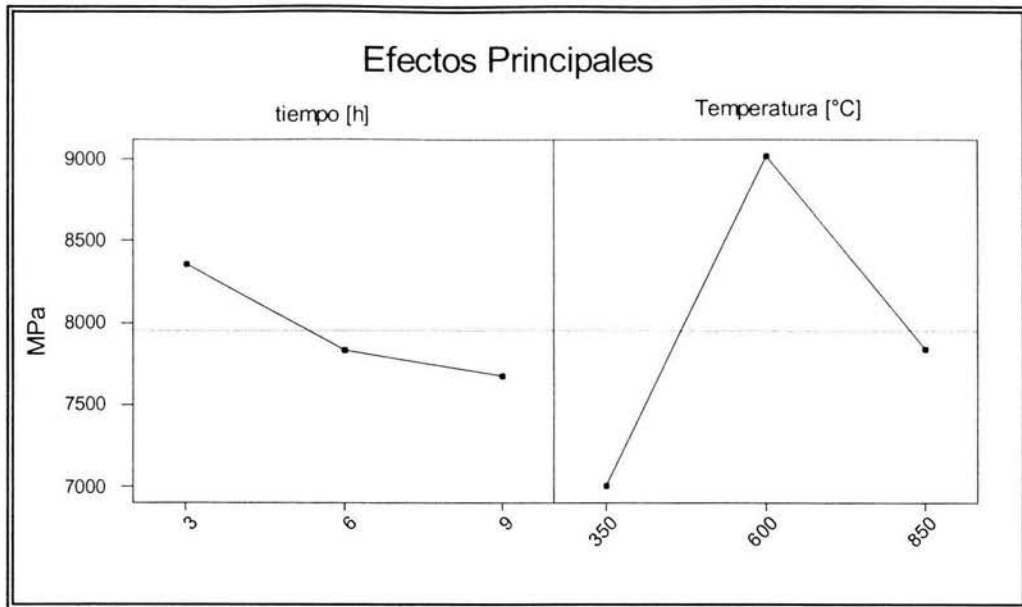


Figura 5.1 Gráfica de efectos principales (tiempo y temperatura)

De la figura 5.1 se observa que para obtener el valor mas alto del módulo de Young se tiene que hacer un tratamiento de 3 horas a 600°C, de las figuras 5.2 y 5.3 para elegir el tratamiento parecido al anterior de los ensayados con el cual se obtiene mas de un valor muy cercano al máximo de Módulo de Young, para esto se toma en cuenta los puntos más altos, en este caso los puntos más altos están a 600°C y 3 horas, y 850°C a 3 horas, mientras los valores mínimos están a 350°C a 3 y 9 horas también a 850°C por 9 horas.

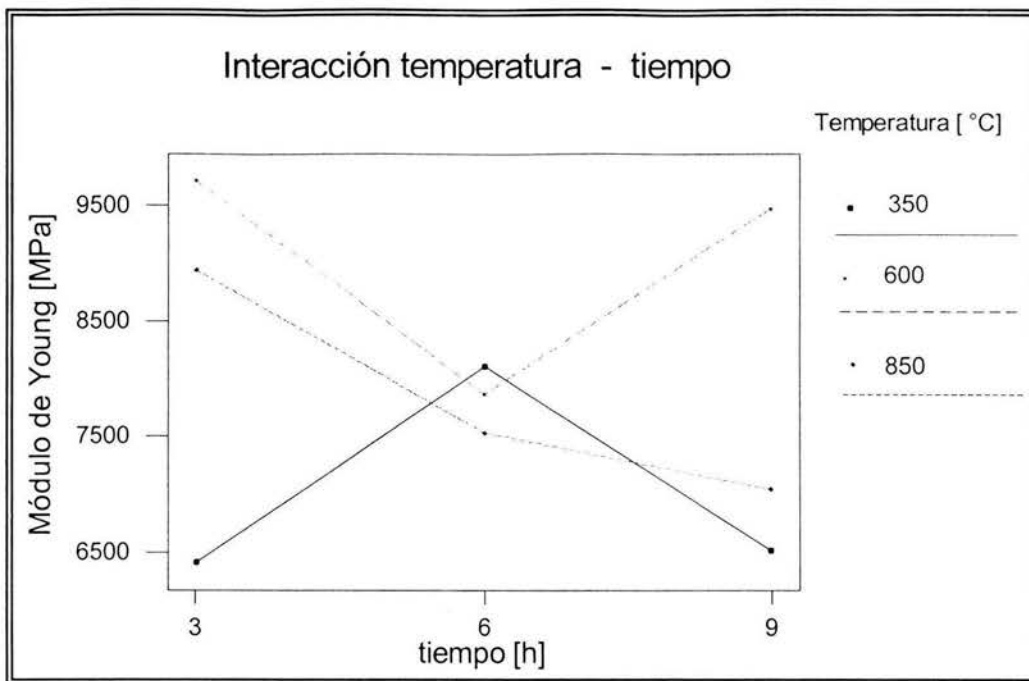


Figura 5.2 Gráfica de interacción del efecto de tiempo a las diferentes temperaturas.

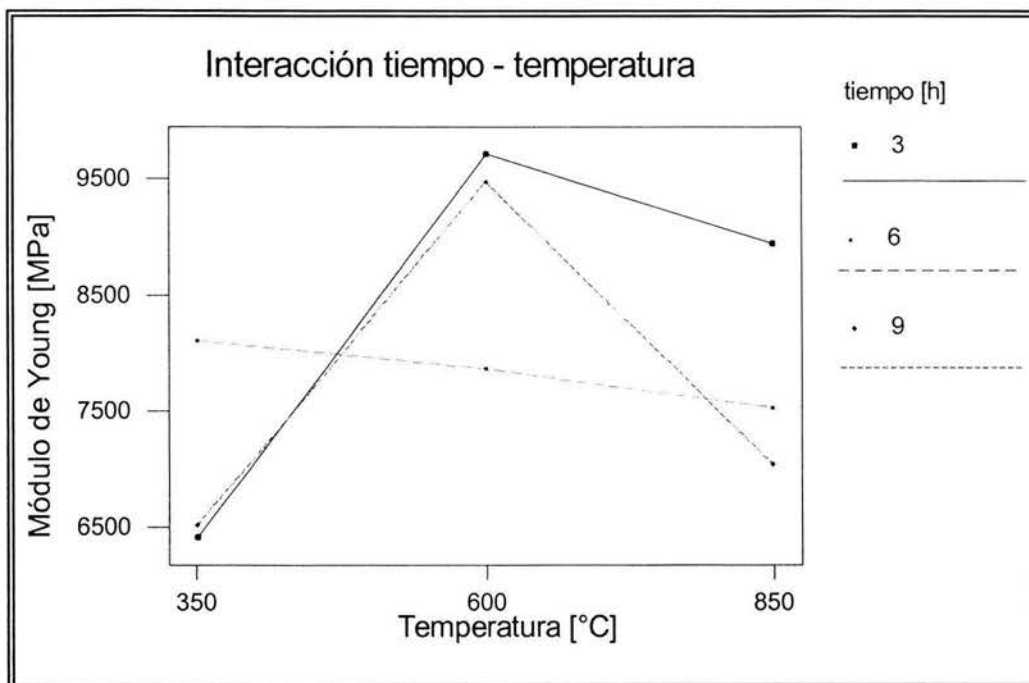


Figura 5.3 Gráfica de interacción del efecto de temperatura a los diferentes tiempos.

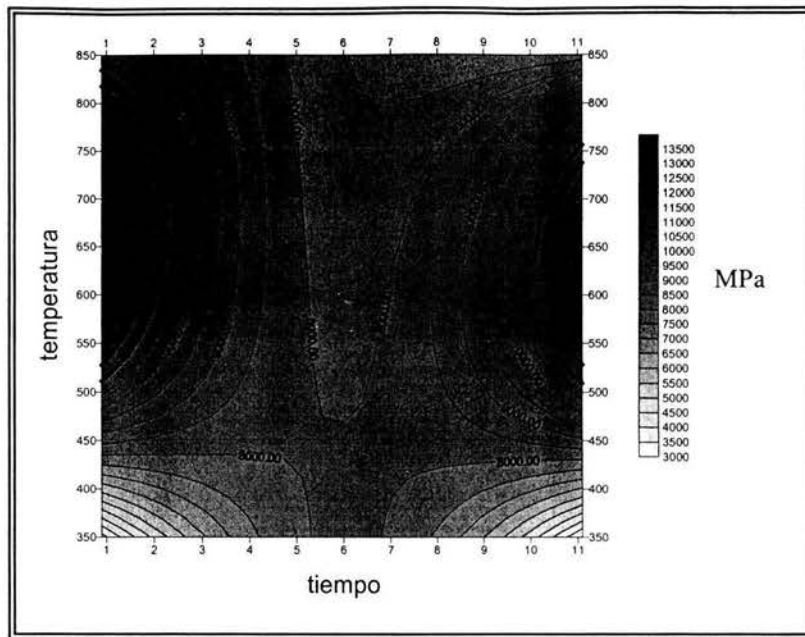


Figura 5.4 Respuesta del Módulo de Young en isolíneas.

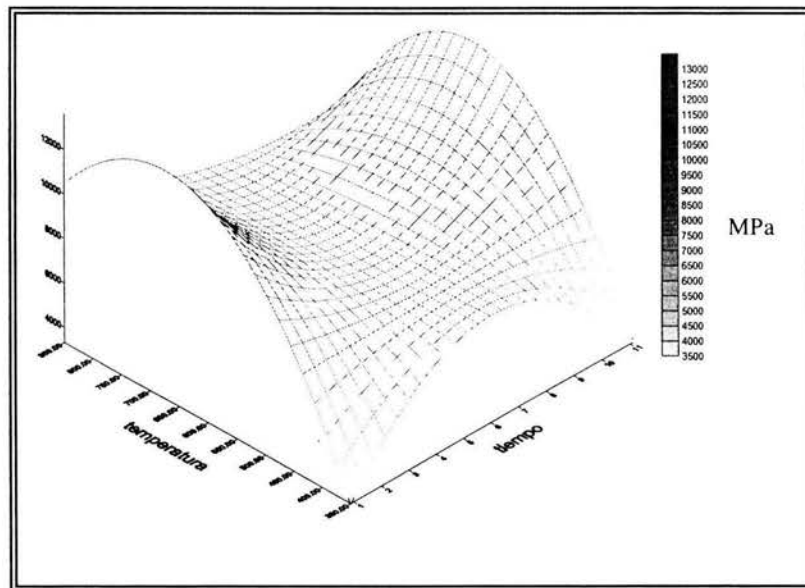


Figura 5.5 Superficie de respuesta del Módulo de Young, con los efectos de tiempo y temperatura.

De las figuras 5.4 y 5.5, se observan las curvas de nivel de la superficie de respuesta del Módulo de Young, en estas podemos seleccionar el valor deseado de la variable de respuesta mencionada, o también a partir del tiempo y temperatura dados se puede predecir el efecto que se causara sobre el material.

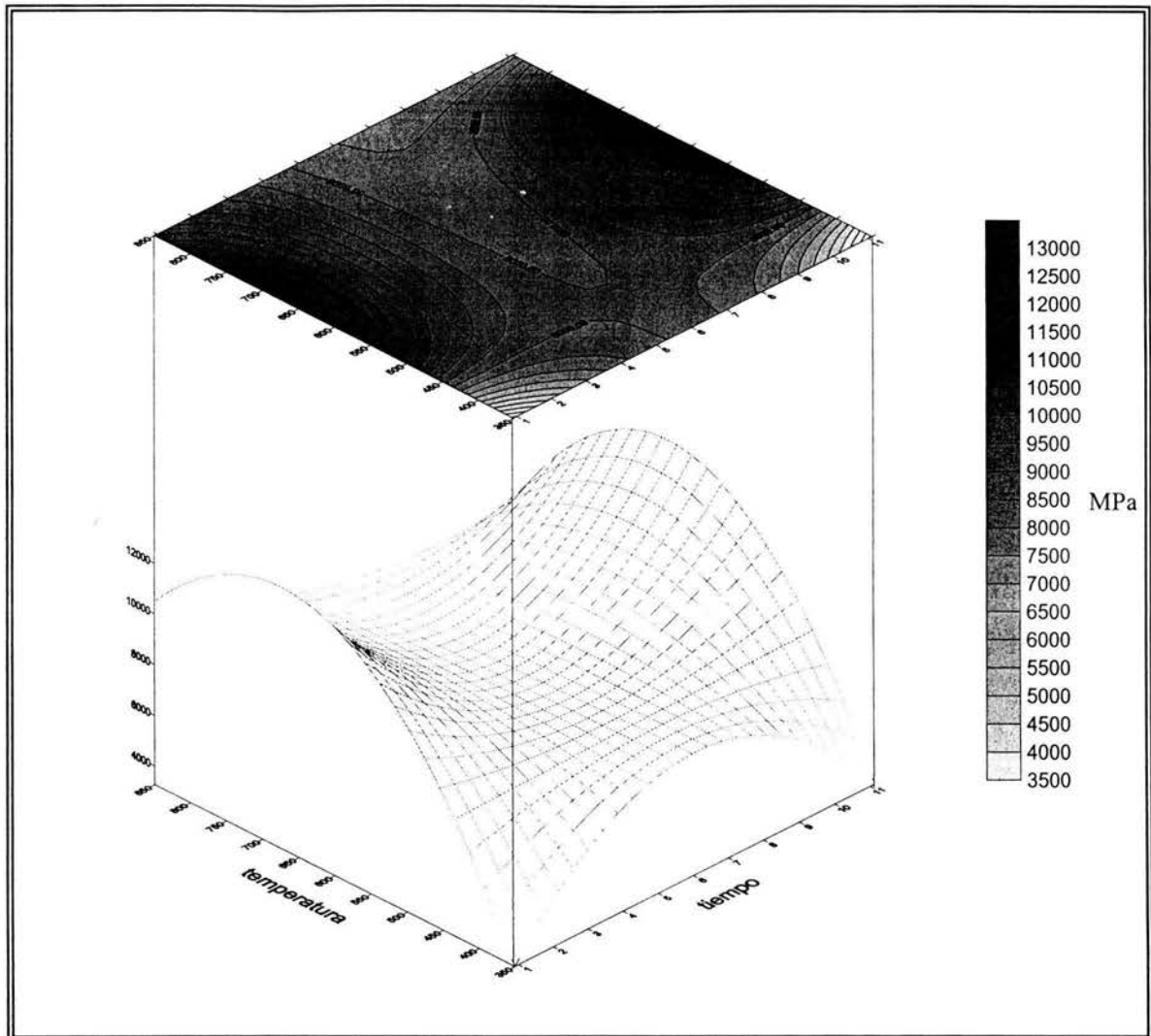


Figura 5.6 Grafica en caja del Módulo de Young, donde se observa la superficie de respuesta con sus respectivas isolíneas.

A partir de los resultados encontrados, podemos concluir:

- De las figuras 5.1 y 5.2 para elegir el tratamiento de los ensayos con el cual se obtiene un valor máximo de Módulo de Young, se toma en cuenta los puntos más altos, en este caso el punto más alto está a 600°C y 3 horas, por lo tanto, si se tuviese que elegir un tratamiento, entre los ensayos, para obtener valor máximo del Módulo de Young, se elegiría este punto, o dependiendo del Módulo de Young necesitado se elige el tratamiento, una elección de mayor precisión, se utilizarían las gráficas de las Figuras 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6
- No se detecta diferencia significativa en la respuesta del Módulo de Young para las probetas tratadas a 350 y 850°C.
- No se detecta diferencia significativa en la respuesta del Módulo de Young para las probetas tratadas a 600 y 850°C.

No se detectó en el ANOVA diferencia significativa en el factor tiempo.

No se observa un cambio significativo en el comportamiento del Módulo de Young en los diferentes niveles de temperatura para los diferentes niveles de tiempo.

Para obtener la región donde es máximo el *módulo de Young*, es necesario modelar éste a partir de los datos experimentales en todo el intervalo experimental tiempo-temperatura y no sólo conocerlo en los valores puntuales tiempo-temperatura ensayados.

Para obtener el *Modelo* es necesario subdividir las sumas de los cuadrados de los factores tiempo y temperatura, así como la interacción, en comparaciones ortogonales con un grado de libertad. Al realizar el análisis resultó significativo el término cuadrático del factor temperatura, el tiempo no tiene significancia y sus comparaciones ortogonales resultan no tener significancia, sin embargo, al hacer la interacción entre los factores de tiempo y temperatura, se observa que el tiempo sí tiene significancia en las interacciones, dentro de los que resultaron significantes están, el término cuadrático del factor tiempo con el efecto lineal de temperatura y el factor cuadrático de tiempo con el factor cuadrático de temperatura cuadrática, se visualiza en las figuras 5.2 y 5.3 en donde se tienen las interacciones de los factores en sus diferentes niveles.

Tomando en cuenta los términos que resultaron significativos, se obtiene el **polinomio del Módulo de Young** y representa la superficie de respuesta del material dentro de los intervalos de los factores que van desde, para el tiempo desde 3 a 9 horas, para temperatura entre 350 a 850°C, este polinomio es:

$$\begin{aligned} \text{Mód. Young} = & -48105.41972 - 0.1496428320T^2 + 193.6108504T + 5.432756133Tt^2 - \\ & 65.19307360Tt - 1597.833360t^2 + 19174.00032t - \\ & 0.004137312000T^2t^2 + 0.04964774400T^2t \end{aligned} \quad \text{Ec. (5.1)}$$

Donde:

Mód. Young — Módulo de Young [Mpa]

T — temperatura [°C]

t — tiempo [h]

Al graficar esta ecuación, se obtiene la superficie de respuesta del comportamiento del Módulo de Young en el intervalo experimental, figuras 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6. Con estas gráficas que resultan de la Ecuación 5.1, se puede elegir el tratamiento que optimice el valor del Módulo de Young y determinar las zonas óptimas y las zonas más desfavorables para esta propiedad mecánica. Modelar la *superficie de respuesta*, para un experimento es una herramienta poderosa pues describe el comportamiento en todo el intervalo experimental.

En la Figura 5.4, se observan las isolíneas representativas del Módulo de Young, en las cuales, los valores mas altos se encuentran a los costados, resaltados con líneas más oscuras, mientras que las isolíneas que representan los valores menores, se encuentran en las esquinas de la parte inferior de la Figura; Si se eligiera un Módulo de Young alto, se seleccionaría en los tiempos laterales (3 y 9 horas), a temperatura media (600°C), que donde se reportan los valores más altos, mientras que los valores más bajos se encuentran en los tiempos extremos (3 y 9 horas) a la temperatura más baja, (350°C).

En la prueba de microscopía óptica de las probetas correspondientes a las regiones de mayor valor de Módulo de Young, es decir las tratadas a 600°C a un tiempo de 3 y 9 horas, así como la de 850°C a 3 horas, presentan gran cantidad de carburos tanto intercristalinos, así como transcristalinos, la mayoría de estos presentan crecimiento dendrítico, así como también el crecimiento en forma de agujas, lo que se interpreta que estos carburos son los que dan resistencia a la tensión del material, es por este motivo que en estos niveles el Módulo de Young es más alto, es decir, aumenta la región elástica del material, mientras que en los niveles mas bajos del Módulo de Young, se pueden interpretar de acuerdo al tratamiento previo del material, el cual primeramente fue sometido a una homogenización a 1100°C durante una hora, durante este tratamiento, los carburos presentes, fueron disueltos completamente, pues fue llevado a una temperatura de austenitización, que al templar no se formaron carburos, quedando una estructura homogénea con límites de grano bien definidos, estos como ya se fue mencionado no presentan carburos lo que da un menor Módulo de Young, como menor resistencia a la tensión, debido a la ausencia de estos carburos tanto intercristalinos, como transcristalinos, de aquí su menor Módulo de Young, es decir, disminuye la región elástica del material, fotos 5.10 a 5.13; 5.18 a 5.21 y 5.22 a 5.25, expuestas al final de este capítulo.

5.1.2 Carga Máxima o resistencia a la tensión.

A partir del diagrama Esfuerzo – Deformación se obtuvieron los valores de carga máxima para cada una de las probetas tratadas, para posteriormente hacer el ANOVA correspondiente.

De la prueba de análisis de varianza (ANOVA), se detectó únicamente diferencia significativa en la variable de temperatura ($P < 0.05$), como se muestra en las Figuras 5.6 y 5.7.

En la Figura 5.6 y 5.7, muestra los efectos principales de la temperatura y del tiempo. No se detectan diferencias significativas en la resistencia a la tensión para los diferentes niveles de la variable tiempo, pues estos tienen tendencia a la media general, por lo que no presentan diferencias significativas, con lo que respecta a la variable de temperatura, se observa que los puntos que representan las medias de cada tratamiento, están alejadas de la media general, lo que representa diferencia significativa ($P < 0.05$).

En la Tabla 5.3 y 5.4 se resumen los valores promedios de la carga máxima y sus desviaciones estándar para los diferentes niveles de temperatura y tiempo. De las tablas en cuestión se deduce que las probetas tratadas a 600°C tienen el menor valor de carga máxima, mientras que el máximo está en el nivel de 850°C; respecto a la variable de tiempo se tiene que el valor máximo está en el tiempo de 6 horas, y el mínimo en 3 horas.

**Tabla 5.3 Valores de carga máxima
Respecto a la temperatura.**

| Temperatura [AC] | Media [Mpa] | Desviación estándar [Mpa] |
|-------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 350 | 418.6 | 125.5 |
| 600 | 250.5 | 93.8 |
| 850 | 435.0 | 127.5 |

**Tabla 5.4 Valores de carga máxima
Respecto al tiempo.**

| Tiempo [h] | Media [Mpa] | Desviación estándar [Mpa] |
|-------------------|--------------------|----------------------------------|
| 3 | 325.2 | 92.6 |
| 6 | 414.2 | 185.3 |
| 9 | 364.3 | 130.2 |

Con lo que respecta a las medias de los diferentes tratamientos, observamos estas en las Figuras 5.6 y 5.7, en donde, la primera se observan por separado los efectos de los factores de tiempo y temperatura en sus diferentes niveles, la línea que cruza, representa la media general, por lo tanto, los puntos más alejados de esta, representan diferencias significativas ($P < 0.05$); en la segunda, se tienen las interacciones de los factores, en sus diferentes niveles, esta proporciona una idea más general de la elección del Acero Hadfield, respecto a su carga máxima, pues permite a primera vista ver los puntos críticos en donde se obtienen los máximos y mínimos, en donde un punto máximo está a una temperatura de 850°C y aun tiempo de 6 horas, y un punto mínimo es a una

temperatura de 600°C a 6 horas, en este tipo de gráficas no se puede interpolar, no así para la superficie de respuesta que se obtiene al aplicar polinomios ortogonales, como se vera mas adelante.

Carga máxima

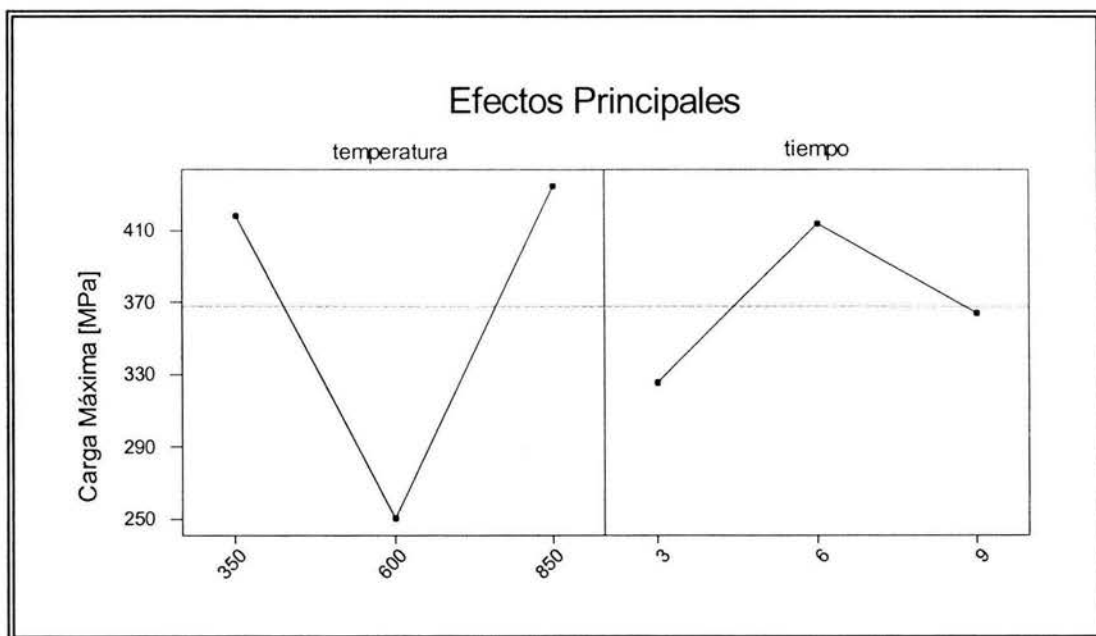


Figura 5.7 Gráfica de efectos principales (temperatura y tiempo)

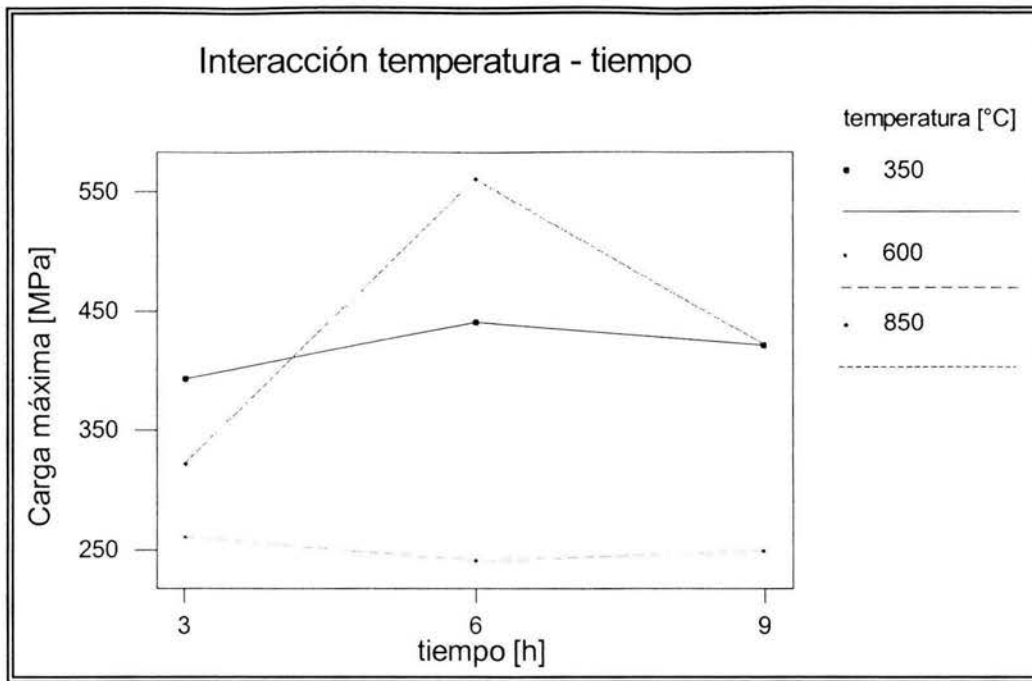


Figura 5.8 Gráfica de interacción del efecto de tiempo a las diferentes temperaturas.

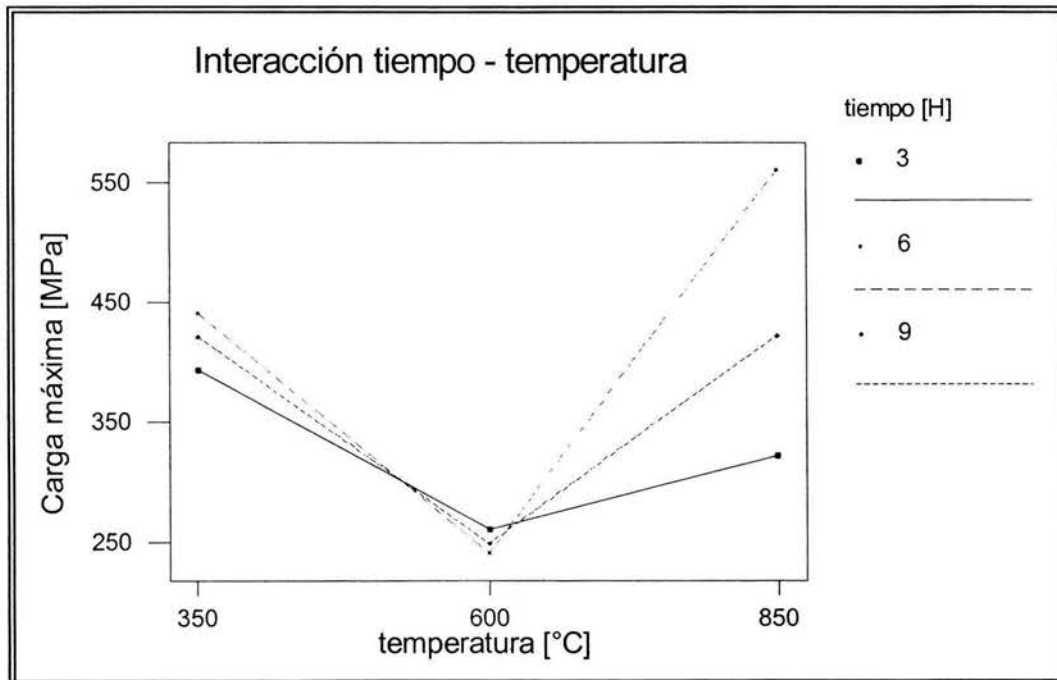


Figura 5.9 Gráfica de interacción del efecto de temperatura a los diferentes tiempos.

Para determinar que valores de la carga máxima obtenidos en los diferentes tratamientos son significativamente diferentes, se analizaron las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 concluyendo lo siguiente:

- No se detectó diferencia significativa en la carga máxima para los tratamientos entre los niveles de temperaturas de 350 y 850°C.
- Se detectó diferencia significativa en los niveles de temperatura entre 350 y 600°C, también en los niveles entre 600 y 800°C.
- Con lo que respecta a los diferentes niveles de la variable tiempo, no se detectó diferencia significativa en la variable de respuesta que es la carga máxima.

Al subdividir las variables de tiempo y temperatura en lineal y cuadrático, cada una con un grado de libertad respectivamente, se encontró significancia los términos cuadráticos de la temperatura (Tq) y cuadrático del tiempo (tq), con lo que respecta a la interacción, no se encontró ninguna interacción con diferencia significativa.

Tomando en cuenta los resultados de significancia de las variables en sus diferentes niveles, y desarrollando el polinomio ortogonal que describe el comportamiento de la carga máxima, respecto a las variables de tiempo y temperatura dentro del intervalo en que se llevo a cabo, que fue, para el tiempo de 3 a 9 horas y para la temperatura de 350 a 850°C, se llega al **polinomio de la carga máxima**, que es:

$$Carga\ Máxima = 689.508 + 0.00282T^2 - 3.3847T - 17.2935t^2 + 207.522t \quad \text{Ec. (5.2)}$$

Donde:

Carga Máxima — Carga Máxima [Mpa]

T — Temperatura [°C]

t — tiempo [h]

En la Figura 5.8 se pueden visualizar las isolíneas que representan los diferentes valores de carga máxima, en esta se puede observar que los valores máximos se encuentran en el tiempo medio (6h) a la temperatura más alta (850°C), mientras que los valores mínimos están en los tiempos iniciales y finales (3 y 9) horas a la temperatura máxima (850°C).

En la prueba de microscopía, y apoyándose en las Figuras 5.9, 5.10 y 5.11, se observa que los valores más altos de la carga máxima están en el intervalo de 850°C a 6 horas, si se observan las

fotos correspondientes para este nivel del experimento, se observa la poca precipitación de carburos de un solo tipo, este es de tipo lenticular o forma de agujas, en zonas preferenciales.

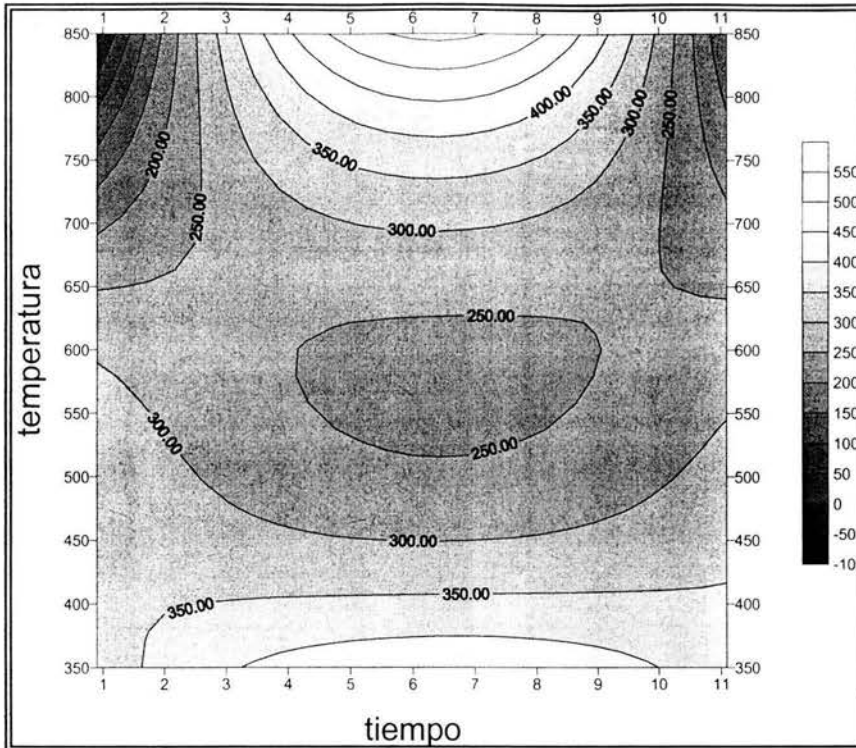


Figura 5.10 Respuesta de la carga máxima en Isolíneas.

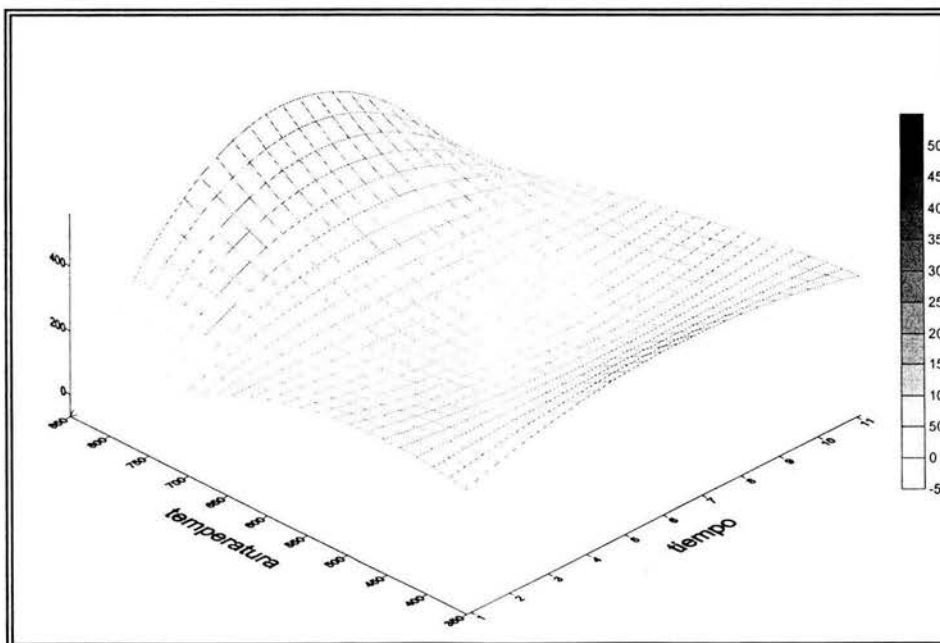


Figura 5.11 Superficie de respuesta de la carga máxima con los efectos de tiempo y temperatura.

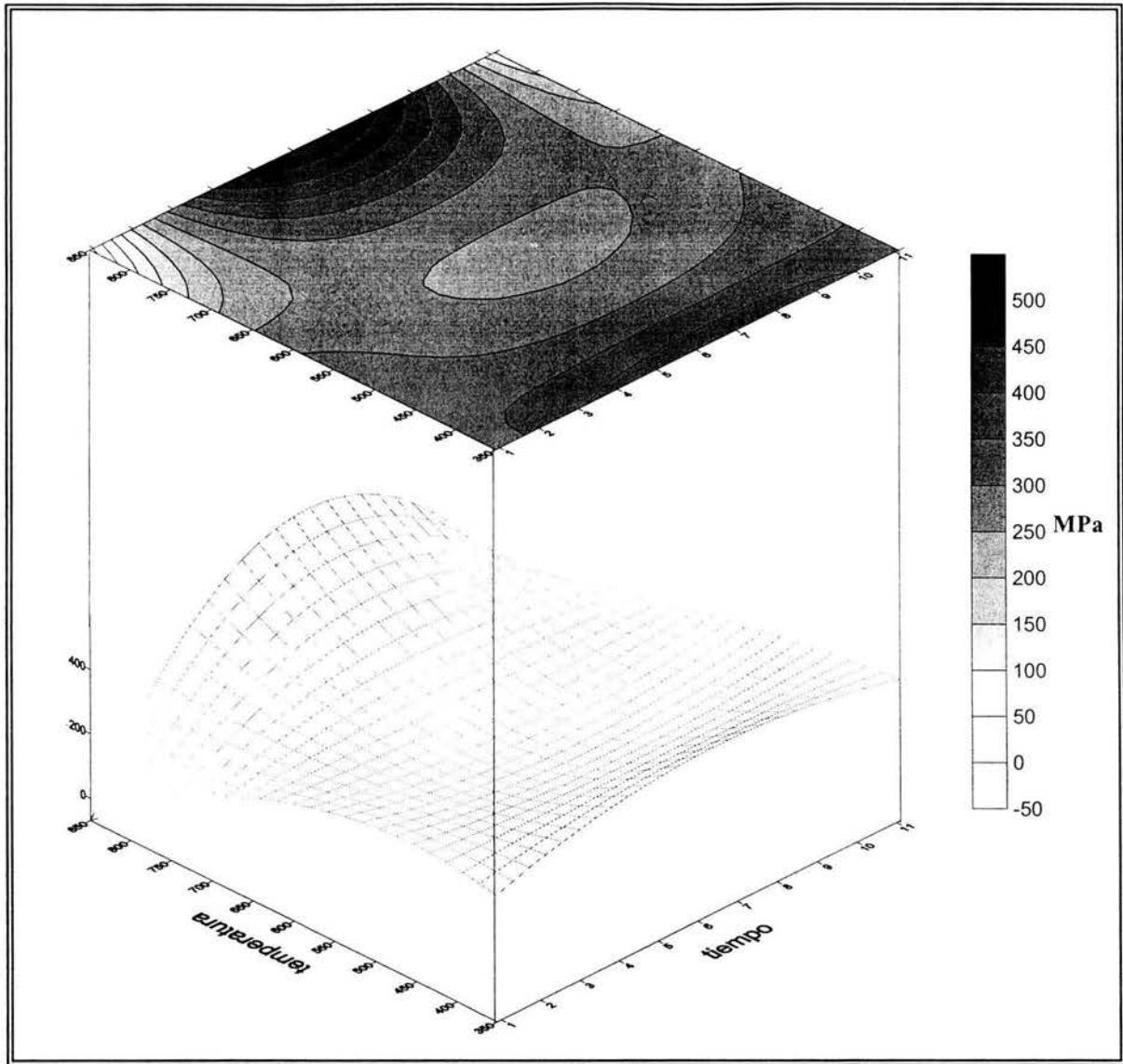


Figura 5.12 Gráfica en caja de la respuesta de carga máxima, respecto de los efectos de tiempo y temperatura.

Para valores intermedios de carga máxima, se observa en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10, están en el intervalo de 350°C a 3, 6 y 9 horas; como después de homogenizar el material a 1100°C durante 1 hora, hubo disolución de la masa del material, y por lo tanto, no hay presencia de carburos, con este tratamiento que se puede mencionar a una temperatura aun no significativa, el material aun

conserva la mayor parte de sus propiedades a este nivel; Aunque también, empieza la formación de carburos, muy pocos, de tipo lenticular en zonas preferenciales, estos se presentan en el nivel de 350°C a 3 horas, mientras que para los niveles de 6 y 9 horas no presentan este tipo de carburos, únicamente los bordes de límite de grano, esto se observa en las fotos 5.1 a 5.9, al final de este capítulo.

Para valores bajos de carga máxima, se observa en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10, están en los niveles de 600°C a tiempos de 3, 6 y 9 horas, y a 850°C a 3 horas, la microestructura para este material se observa en las fotos 5.10 a 5.25 y se aprecia, que existe una gran cantidad de precipitación de carburos tanto lenticulares como masivos, los primeros como ya fue expuesto tienen forma de agujas, mientras que los segundos presentan forma de hojuelas, esto conlleva a determinar que la presencia excesiva de carburos imparte fragilidad al material y es por este motivo que la carga máxima disminuye.

Con lo que respecta al análisis micrográfico, se observa que conforme los carburos se hacen presentes en mayor cantidad, la carga máxima disminuye, mientras que para valores menores de carga máxima, al presentarse menor cantidad de carburos, el valor de carga máxima se incrementa, esto se observa en las fotomicrografías correspondientes que van desde las fotos 5.10 hasta las fotos 5.25, que se anexan al final de este capítulo y están orden del diseño de experimento.

5.1.3 Límite de elasticidad o Esfuerzo de Cedencia.

A partir del diagrama Esfuerzo – Deformación se obtuvieron los valores de límite de elasticidad para cada una de las probetas tratadas, para posteriormente hacer el ANOVA correspondiente.

De la prueba de análisis de varianza (ANOVA), se detectó únicamente diferencia significativa en la variable de temperatura ($P < 0.05$).

En la Figura 5.13, muestra los efectos principales de la temperatura y del tiempo. No se detectan diferencias significativas en límite de elasticidad para los diferentes niveles de la variable tiempo, pues estos tienen tendencia a la media general, por lo que no presentan diferencias significativas, con lo que respecta a la variable de temperatura, se observa que los puntos que representan las medias de cada tratamiento, están alejadas de la media general, lo que representa diferencia significativa ($P < 0.05$).

Límite de elasticidad

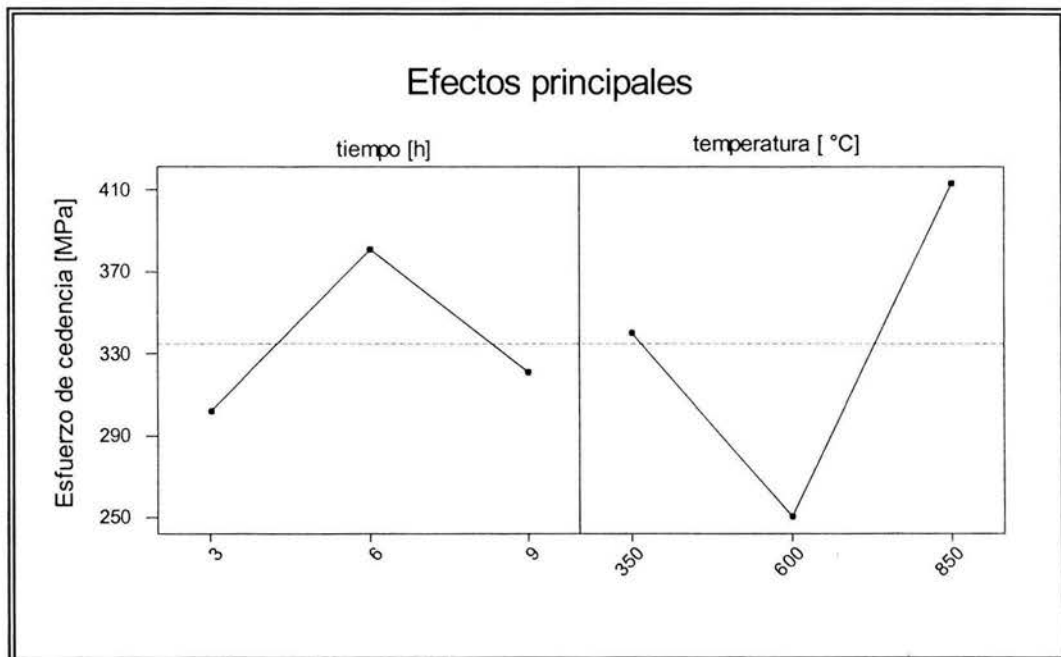


Figura 5.13 Gráfica de efectos principales (temperatura y tiempo)

En la Tabla 5.5 y 5.6 se resumen los valores promedios de límite de elasticidad y sus desviaciones estándar para los diferentes niveles de temperatura y tiempo. De las tablas en cuestión se deduce que las probetas tratadas a 350°C tienen el menor valor de límite de elasticidad, mientras que el máximo está en el nivel de 850°C; respecto a la variable de tiempo se tiene que el valor máximo esta en el tiempo de 6 horas, y el mínimo en 3 horas.

**Tabla 5.5 Valores de límite de elasticidad
Respecto a la temperatura.**

| Temperatura [AC] | Media [Mpa] | Desviación estándar [Mpa] |
|-------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 350 | 340.4 | 79.8 |
| 600 | 250.5 | 93.8 |
| 850 | 413.2 | 126.8 |

**Tabla 5.6 Valores de límite de elasticidad
Respecto al tiempo.**

| Tiempo [h] | Media [Mpa] | Desviación estándar [Mpa] |
|-------------------|--------------------|----------------------------------|
| 3 | 302.0 | 78.7 |
| 6 | 381.1 | 167.8 |
| 9 | 321.1 | 89.6 |

Con lo que respecta a las medias de los diferentes tratamientos, observamos estas en las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15, en donde, la primera se observan por separado los efectos de los factores de tiempo y temperatura en sus diferentes niveles, la línea que cruza, representa la media general, por lo tanto, los puntos mas alejados de esta, representan diferencias significativas ($P < 0.05$); en la segunda, se tienen las interacciones de los factores, en sus diferentes niveles, esta proporciona una idea mas general de la elección del Acero Hadfield, respecto a su carga máxima, pues permite a primera vista ver los puntos críticos en donde se obtienen los máximos y mínimos, en donde un punto máximo esta a una temperatura de 850°C y aun tiempo de 6 horas, y un punto mínimo es a una temperatura de 600°C a 6 horas, en este tipo de gráficas no se puede interpolar, no así para la superficie de respuesta que se obtiene al aplicar polinomios ortogonales, como se vera mas adelante.

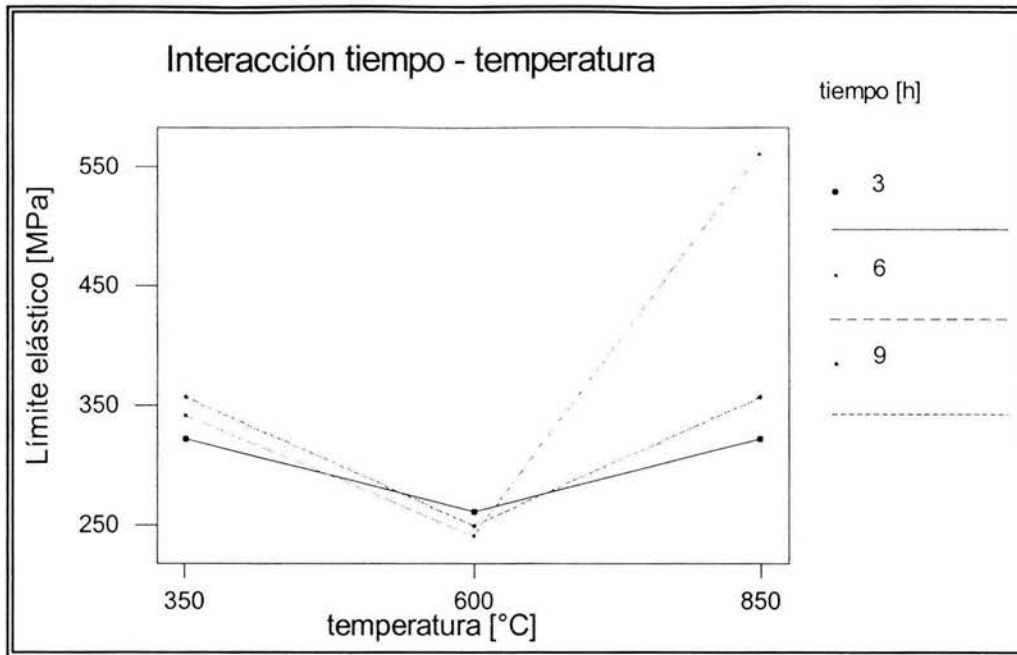


Figura 5.14 Gráfica de interacción del efecto de temperatura a los diferentes tiempos.

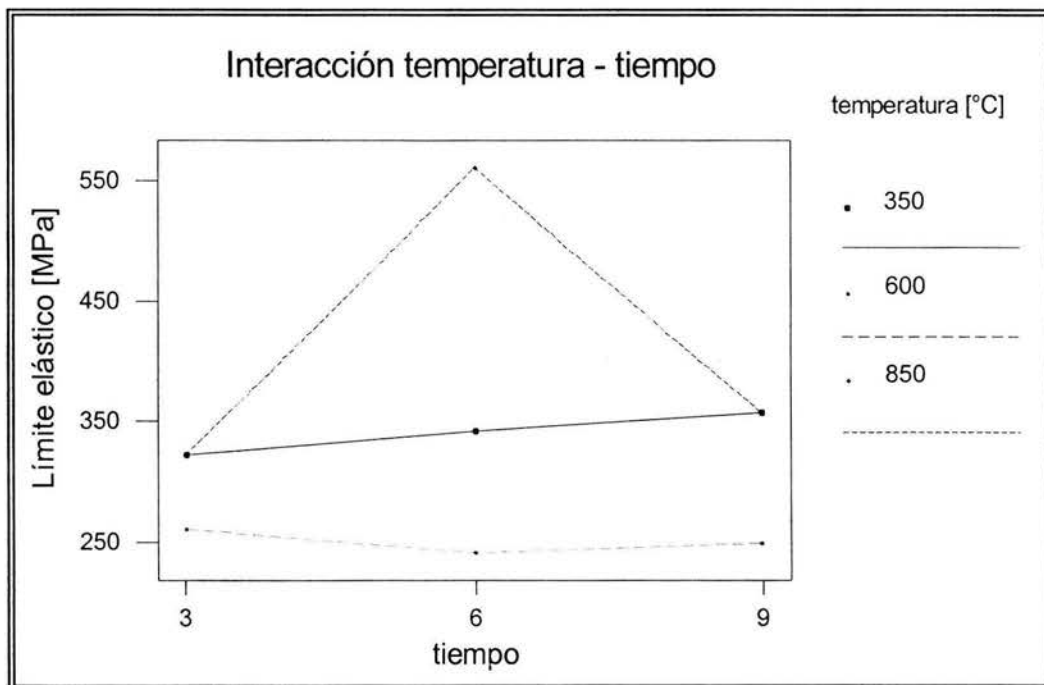


Figura 5.15 Gráfica de interacción del efecto de tiempo a las diferentes temperaturas.

En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15, representan los puntos críticos para los puntos en los cuales fue llevado a cabo el experimento, por lo que las respuestas son solo puntuales, en donde se muestra

los puntos máximos y mínimos, y se observa que solo hay un punto máximo que esta en el punto de 850°C a 6 horas, mientras que los puntos mínimos están en la temperatura a 600°C en todos los tiempos en que fue llevado el experimento las cuales son, 3, 6 y 9 horas.

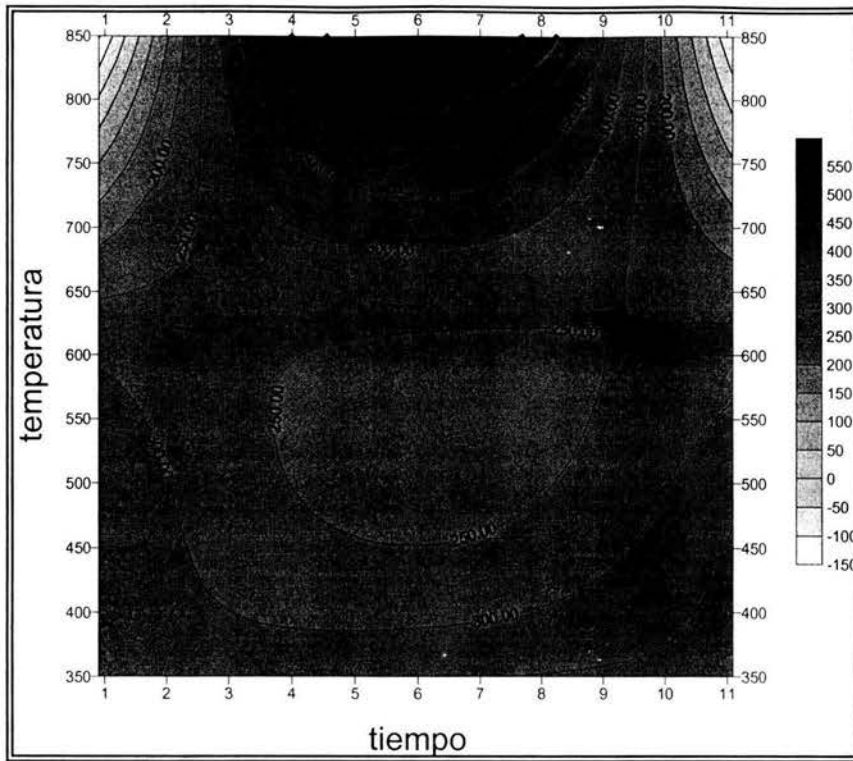


Figura 5.16 Respuesta de límite de elasticidad en Isolíneas.

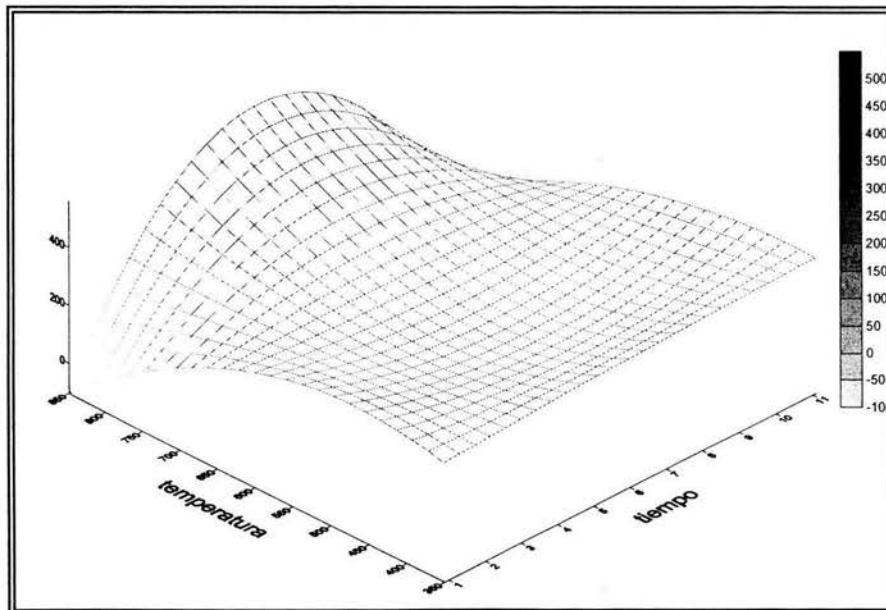


Figura 5.17 Superficie de respuesta del límite de elasticidad con los efectos de tiempo y temperatura.

Para determinar que valores del límite de elasticidad obtenidos en los diferentes tratamientos son significativamente diferentes, basándose en las figuras 5.13, 5.14 y 5.15, y en el análisis de varianza en las tablas correspondientes al anexo de tablas de varianza, se concluye lo siguiente:

- No se detectó diferencia significativa en el límite de elasticidad para los tratamientos entre los niveles de temperaturas de 350 con 850°C y 350 con 600°C.
- Se detectó diferencia significativa en los niveles de temperatura entre 600°C y 850°C.
- Con lo que respecta a los diferentes niveles de la variable tiempo, no se detectó diferencia significativa en la variable de respuesta que el límite de elasticidad.
- Se afirma con 95% de confianza que el valor de límite de elasticidad disminuye de 579.4 a 59.9 MPa al pasar del nivel de tratamiento de 850°C a 6 horas al nivel de 600°C a 6 horas.
- Se afirma con 95% de confianza que el valor de límite de elasticidad disminuye de 571 a 51.4 MPa al pasar del nivel de tratamiento de 850°C a 6 horas al nivel de 600°C a 9 horas, esto se observa en la Figura 5.18.

Al subdividir las variables de tiempo y temperatura en lineal y cuadrático, cada una con un grado de libertad respectivamente, se encontró significancia los términos tanto lineal como cuadrático de la temperatura (Tl , Tq) y cuadrático del tiempo (tq), con lo que respecta a la interacción, se detectó diferencia significativa en las interacciones de temperatura lineal contra tiempo cuadrático ($Tl \times tq$) y también resultó significativa la interacción de temperatura cuadrática contra tiempo cuadrático ($Tq \times tq$), las demás interacciones resultaron no ser significativas.

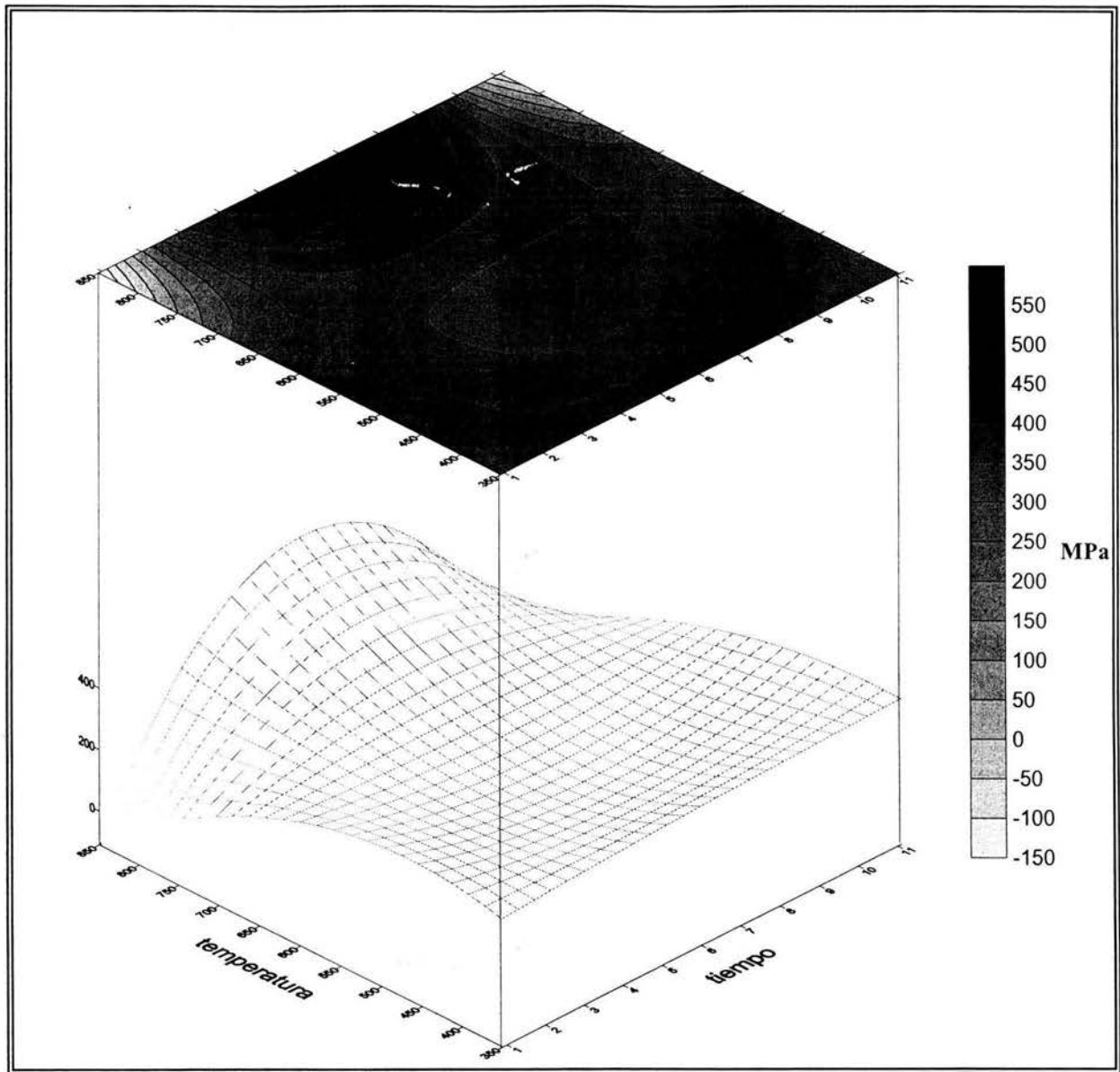


Figura 5.15 Gráfica en caja de la respuesta de límite de elasticidad respecto de los efectos de tiempo y temperatura.

Tomando en cuenta los resultados de significancia de las variables en sus diferentes niveles, y desarrollando el polinomio ortogonal que describe el comportamiento del límite de elasticidad, respecto a las variables de tiempo y temperatura dentro del intervalo en que se llevo a cabo, que

fue, para el tiempo de 3 a 9 horas y para la temperatura de 350 a 850°C, se llega al *polinomio de límite elástico*, que es:

$$\begin{aligned} \text{Límite Elástico} = & -603.09454 + 4.318T - 0.00469T^2 - 49.7914t^2 + 597.497t + \\ & 0.2199Tt^2 - 2.639Tt - 0.0002238t^2T^2 + 0.0026858tT^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. (5.3)}$$

Límite Elástico — Límite elástico [Mpa]

T — Temperatura [°C]

t — tiempo [h]

En la prueba de microscopia, y apoyándose en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18, se observa que los valores más altos del límite elástico están en el intervalo de 850°C a 6 horas, si se observan las fotos correspondientes para este nivel del experimento, se observa la poca precipitación de carburos de un solo tipo, este es de tipo lenticular o forma de agujas, en zonas preferenciales.

En la Figura 5.16 se pueden visualizar las isolíneas que representan los diferentes valores de límite elástico, en esta se puede observar que los valores máximos se encuentran en el tiempo medio (6h) a la temperatura más alta (850°C), mientras que los valores mínimos están en los tiempo iniciales y finales (3 y 9) horas a la temperatura máxima (850°C).

Para valores intermedios de límite elástico, se observa en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18, están en el intervalo de 350°C a 3, 6 y 9 horas; como después de homogenizar el material a 1100°C durante 1 hora, hubo disolución de la masa del material, y por lo tanto, no hay presencia de carburos, con este tratamiento que se puede mencionar a una temperatura aun no significativa, el material aun conserva la mayor parte de sus propiedades a este nivel; Aunque también, empieza la formación de carburos, muy pocos, de tipo lenticular en zonas preferenciales, estos se presentan en el nivel de 350°C a 3 horas, mientras que para los niveles de 6 y 9 horas no presentan este tipo de carburos, únicamente los bordes de límite de grano, esto se observa en las fotos 5.1 a 5.9, anexadas al final de este capítulo.

Para valores bajos de carga máxima, se observa en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10, están en los niveles de 600°C a tiempos de 3, 6 y 9 horas, y a 850°C a 3 horas, la microestructura para este material se observa en las fotos 5.10 a 5.21, ubicadas al final de este capítulo, se aprecia que existe una gran cantidad de precipitación de carburos tanto lenticulares como masivos, los primeros como ya fue expuesto tienen forma de agujas, mientras que los segundos presentan forma de hojuelas, esto conlleva a determinar que la presencia excesiva de carburos imparte fragilidad al material y es por este motivo que la carga máxima disminuye.

Con lo que respecta al análisis micrográfico, se observa que conforme los carburos se hacen presentes en mayor cantidad, la carga máxima disminuye, mientras que para valores menores de carga máxima, al presentarse menor cantidad de carburos, el valor de carga máxima se incrementa, esto se observa en las fotomicrografías correspondientes.

5.1.4 Prueba de Dureza

Como ya fue descrito, esta prueba se realizó, tomando como escala de dureza, la escala Vickers, a partir de los resultados de las mediciones obtenidos, y de la prueba de análisis de varianza (ANOVA) ($P < 0.05$). No se detectó efecto significativo de la variable tiempo, y en la variable temperatura, sí resultó con significancia y también la interacción de estas variables.

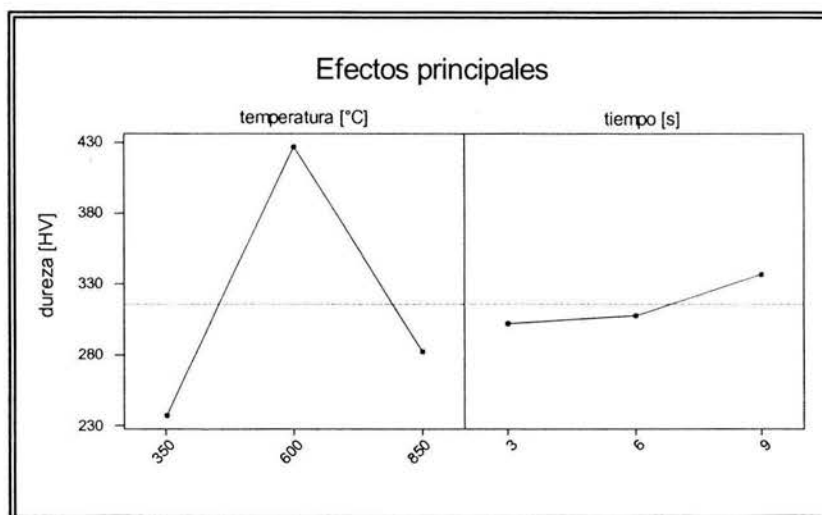


Figura 5.19 Gráfica de efectos principales (temperatura y tiempo)

En la Figura 5.19, muestra los efectos principales de la temperatura y del tiempo. No se detectan diferencias significativas en límite de elasticidad para los diferentes niveles de la variable tiempo,

pues estos tienen tendencia a la media general, por lo que no presentan diferencias significativas, con lo que respecta a la variable de temperatura, se observa que los puntos que representan las medias de cada tratamiento, están alejadas de la media general, lo que representa diferencia significativa ($P < 0.05$).

En la Tabla 5.7 y 5.8 se resumen los valores promedios de dureza y sus desviaciones estándar para los diferentes niveles de temperatura y tiempo. De las tablas en cuestión se deduce que las probetas tratadas a 350°C tienen el menor valor de dureza promedio, mientras que el máximo está en el nivel de 600°C; respecto a la variable de tiempo se tiene que el valor máximo promedio está en el tiempo de 9 horas, y el mínimo en 3 horas.

**Tabla 5.7 Valores de Dureza
Respecto a la temperatura.**

| <i>Temperatura [AC]</i> | <i>Media [HV]</i> | <i>Desviación estándar [HV]</i> |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 350 | 237.47 | 29.98 |
| 600 | 426.53 | 37.13 |
| 850 | 282.26 | 59.17 |

De la Tabla 5.7, resultaron ser significativas las diferencias entre las temperaturas 350 y 600°C, así como también las temperaturas entre 600 y 850°C, mientras que entre las temperaturas de 350 y 850°C resultaron no tener diferencia significativa entre ellas.

**Tabla 5.8 Valores de dureza
Respecto al tiempo.**

| <i>Tiempo [h]</i> | <i>Media [HV]</i> | <i>Desviación estándar [HV]</i> |
|-------------------|-------------------|---------------------------------|
| 3 | 302.41 | 74.24 |
| 6 | 307.42 | 97.39 |
| 9 | 336.43 | 109.47 |

De la tabla 5.8, respecto a la variable tiempo, resultó no haber diferencia significativa entre los diferentes niveles de esta variable.

Las interacciones entre las variables tiempo y temperatura, estas se presentan en la siguiente Tabla (Tabla 5.9), con el valor promedio de estas y su desviación estándar.

Tabla 5.9 Valores de Dureza Interacciones

| Tratamiento | Media [HV] | Desviación estándar [HV] |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| T ₁ t ₁ | 367.74 | 15.84 |
| T ₁ t ₂ | 234.31 | 23.93 |
| T ₁ t ₃ | 210.36 | 16.71 |
| T ₂ t ₁ | 396.08 | 34.17 |
| T ₂ t ₂ | 433.40 | 21.83 |
| T ₂ t ₃ | 450.10 | 39.70 |
| T ₃ t ₁ | 243.40 | 20.95 |
| T ₃ t ₂ | 254.54 | 29.48 |
| T ₃ t ₃ | 348.83 | 51.28 |

Para determinar que valores de dureza obtenidos en los diferentes tratamientos son significativamente diferentes, se realizó la prueba de Tukey, las estimaciones de las diferencias en la dureza entre los tratamientos se indican en la tabla siguiente, con intervalos de confianza al 95%, los valores mostrados en la Tabla 5.10 son los valores de comparación significativa.

Tabla 5.10 Comparaciones significativa de los tratamientos

| Comparación significativa | Intervalo de Confianza | Comparación significativa | Intervalo de Confianza |
|---|-------------------------------|---|-------------------------------|
| T ₂ t ₁ – T ₁ t ₁ | -215.1 -41.6 | T ₃ t ₁ – T ₂ t ₂ | +103.2 +276.8 |
| T ₂ t ₁ – T ₁ t ₂ | -248.5 -75.0 | T ₃ t ₁ – T ₂ t ₃ | +119.9 +293.5 |
| T ₂ t ₁ – T ₁ t ₃ | -272.5 -99.0 | T ₃ t ₂ – T ₂ t ₁ | +54.8 +228.3 |
| T ₂ t ₂ – T ₁ t ₁ | -252.4 -78.9 | T ₃ t ₂ – T ₂ t ₂ | +92.1 +265.6 |
| T ₂ t ₂ – T ₁ t ₂ | -285.9 -112.3 | T ₃ t ₂ – T ₂ t ₃ | +108.8 +282.3 |
| T ₂ t ₂ – T ₁ t ₃ | -309.8 -136.3 | T ₃ t ₃ – T ₁ t ₂ | -201.3 -27.8 |
| T ₂ t ₃ – T ₁ t ₁ | -269.1 -95.6 | T ₃ t ₃ – T ₁ t ₃ | -225.2 -51.7 |
| T ₂ t ₃ – T ₁ t ₂ | -302.6 -129.0 | T ₃ t ₃ – T ₂ t ₃ | +14.5 +188.0 |
| T ₂ t ₃ – T ₁ t ₃ | -326.5 -153.0 | T ₃ t ₃ – T ₃ t ₁ | -192.2 -18.7 |
| T ₃ t ₁ – T ₂ t ₁ | +65.9 +239.4 | T ₃ t ₃ – T ₃ t ₂ | -181.1 -7.5 |

NOTA: El signo (-) indica que el valor disminuye, mientras un signo (+) indica que el valor crece.

De acuerdo a los factores tiempo y temperatura, se obtuvo lo siguiente:

- No se detectó diferencia significativa en la dureza para los tratamientos en el nivel de temperaturas de 350 con 850°C.

- Se detecto diferencia significativa en los niveles de temperatura entre 600 con 850°C y 350 con 600°C.
- Con lo que respecta a los diferentes niveles de la variable tiempo, no se detectó diferencia significativa en la variable de respuesta que el límite de elasticidad.

Al realizar la interacción de las variables tiempo y temperatura, se detecta diferencia significativa en la carga máxima, esto se muestra en la Figura 5.19, pues los valores de las medias de cada tratamiento están muy cerca de la media general, y en el ANOVA también se tiene este resultado.

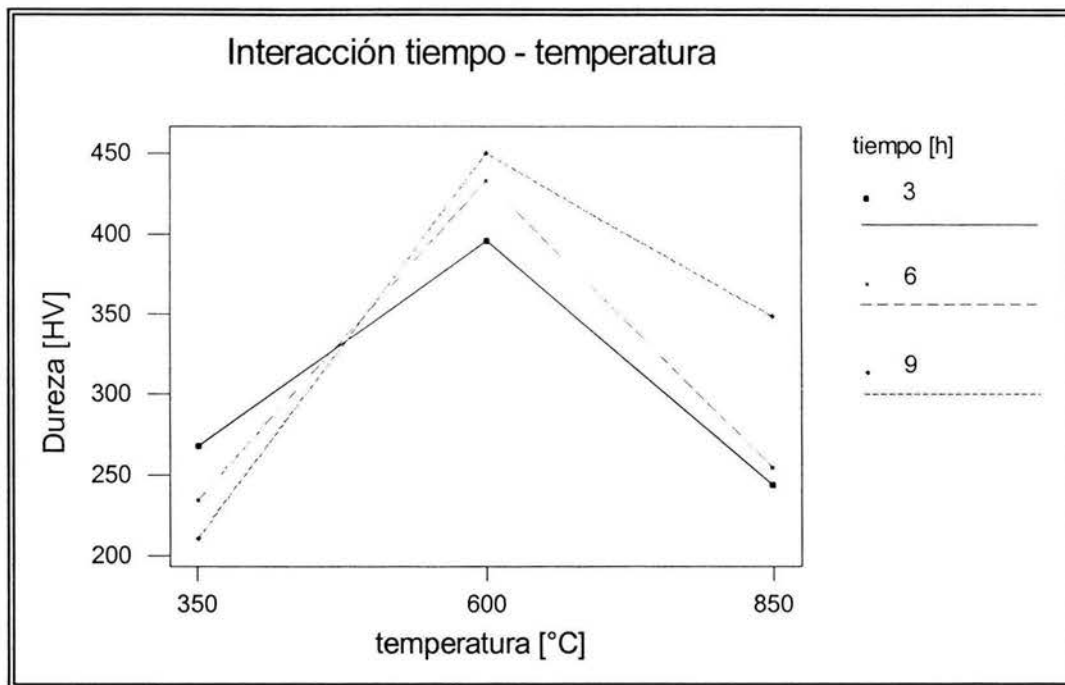


Figura 5.20 Gráfica de interacción del efecto de temperatura a los diferentes tiempos.

En las figuras 5.19, 5.20 y 5.21, se observa que los valores máximos de dureza se obtienen a temperaturas de 600°C en sus tres diferentes tiempos (3, 6 y 9 horas), y los valores mínimos de durezas están a la temperatura de 350°C a tiempos de 6 y 9 horas.

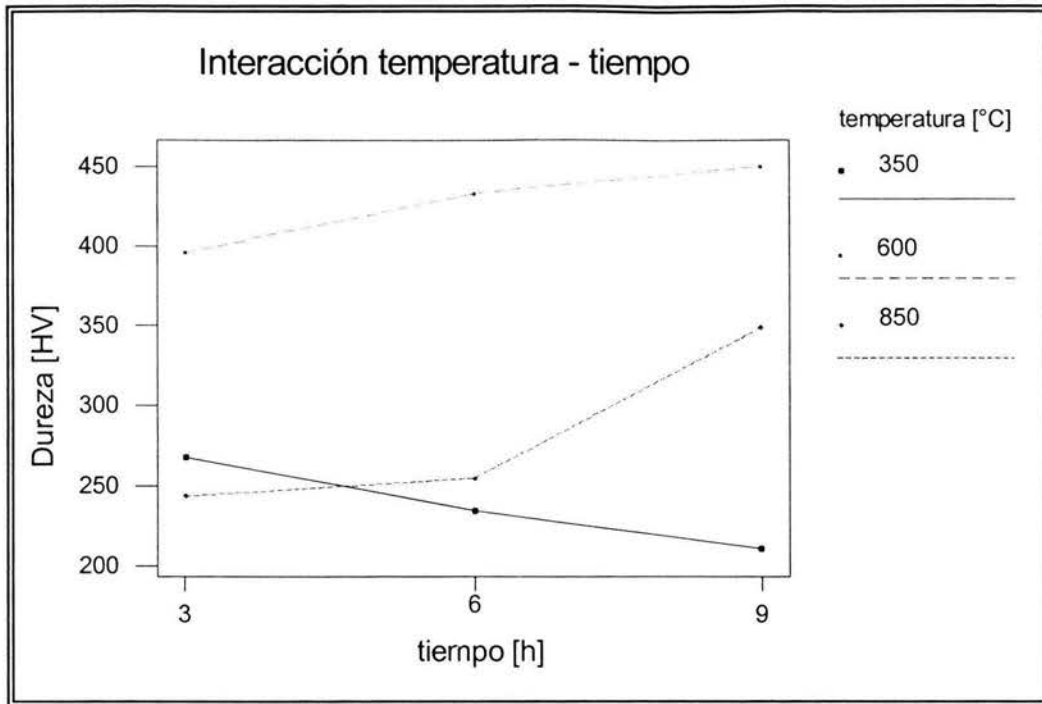


Figura 5.21 Gráfica de interacción del efecto de tiempo a las diferentes temperaturas.

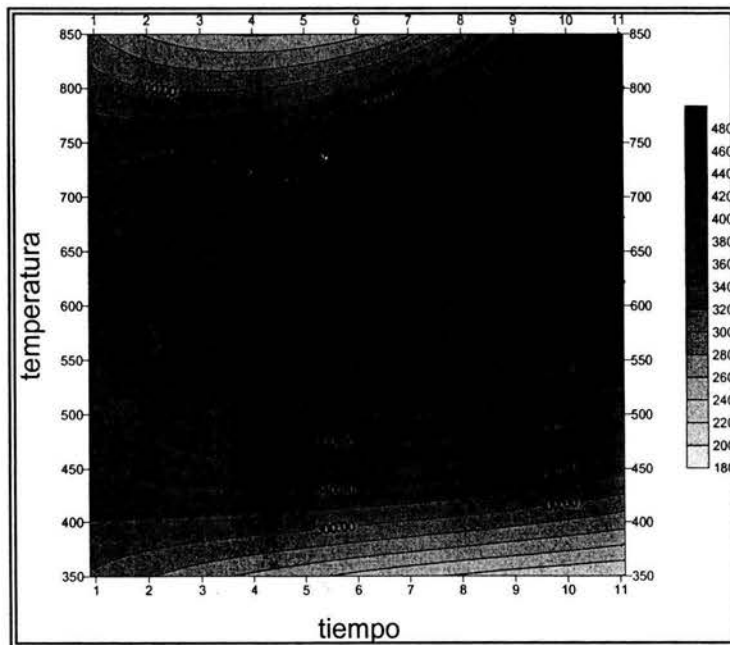
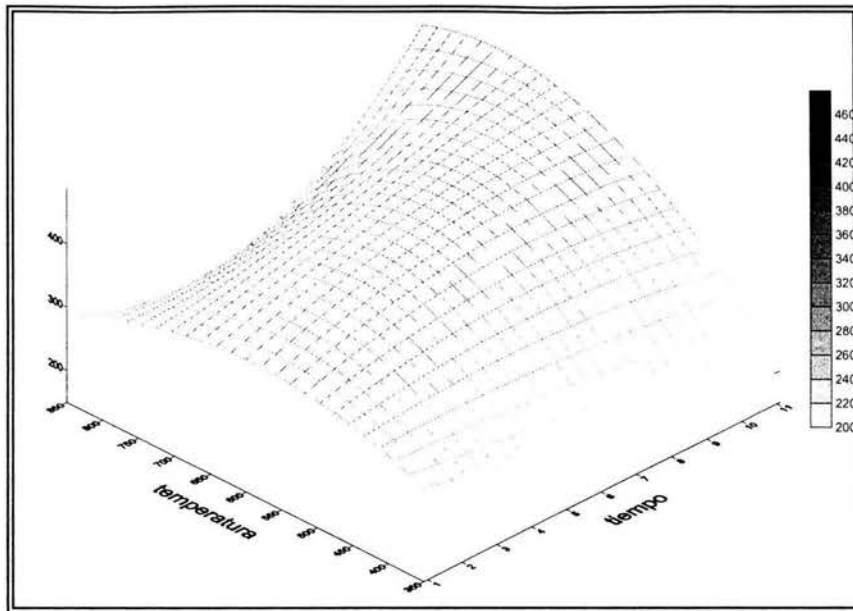


Figura 5.22 Respuesta de la Dureza en isolíneas.



*Figura 5.23 Superficie de respuesta de la Dureza
Con los efectos de tiempo y temperatura.*

De las figuras 5.22 y 5.23, se observan las curvas de nivel, así como también, la superficie de respuesta, esta superficie de respuesta es lo que se obtiene después de experimentar como ya se describió anteriormente y también se obtiene la ecuación de esta que más adelante se escribirá esta ecuación que corresponde a dicha superficie.

En las Figuras 5.22 y 5.23, se pueden visualizar las isolíneas que representan los diferentes valores de dureza, en estas se puede observar que los valores máximos se encuentran en la temperatura media (600°C) al intervalo mas alto de tiempo (9 horas), mientras que los valores mínimos están en la temperatura inicial (350°C) a los diferentes niveles de tiempo (3, 6 y 9 horas).

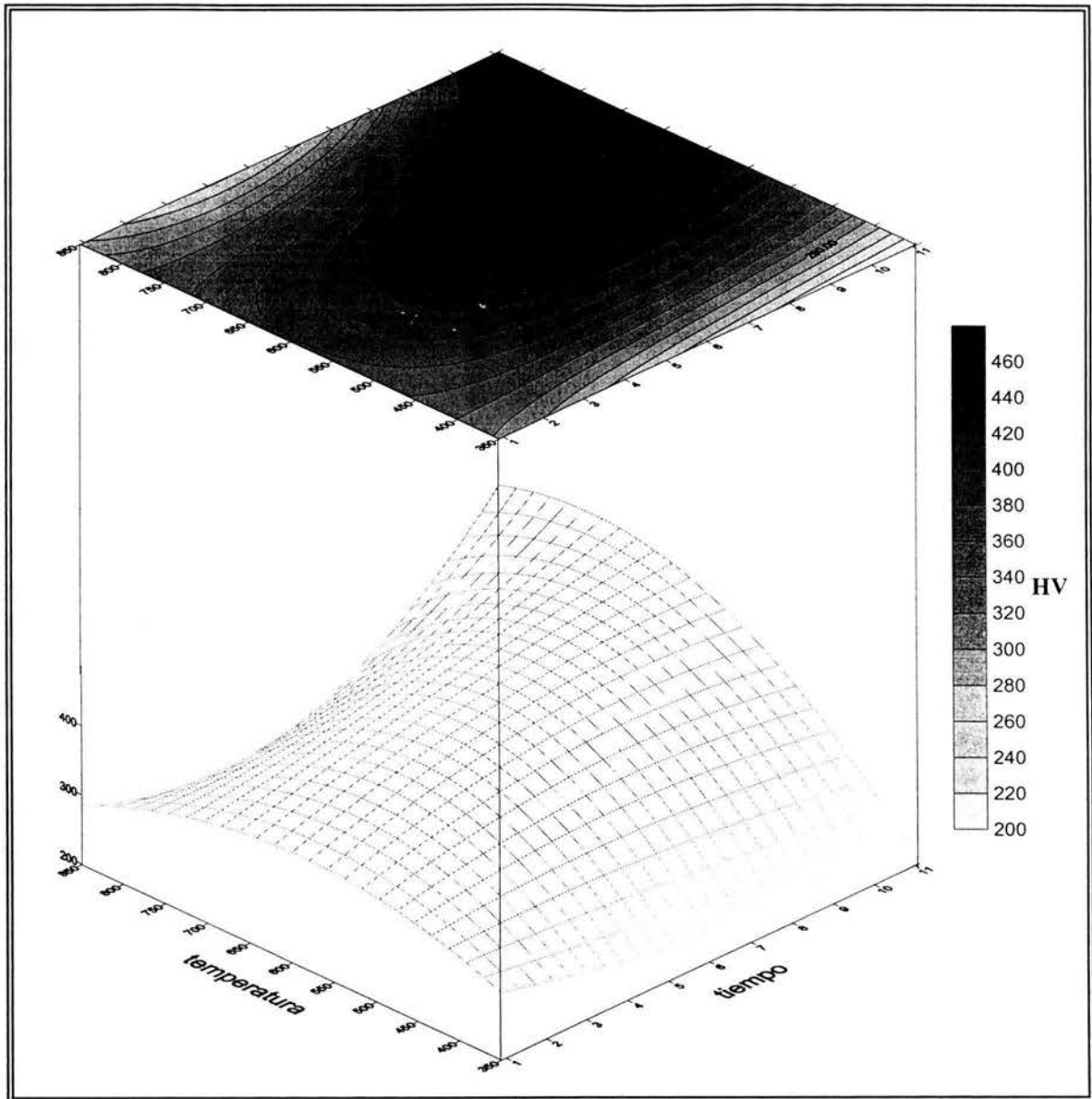


Figura 5.24 Gráfica en caja de la respuesta de dureza respecto a los efectos de tiempo y temperatura.

Al subdividir las variables de tiempo y temperatura en lineal y cuadrático, cada una con un grado de libertad respectivamente, se encontró significancia en el término lineal cuadrático de la temperatura (Tl , Tq) y lineal del tiempo (tl), con lo que respecta a la interacción, se detectó diferencia significativa en la interacción de temperatura lineal contra tiempo lineal ($Tl \times tl$), las demás interacciones resultaron no ser significativas.

Tomando en cuenta los resultados de significancia de las variables en sus diferentes niveles, y desarrollando el polinomio ortogonal que describe el comportamiento de la dureza, respecto a las variables de tiempo y temperatura dentro del intervalo en que se llevo a cabo, que fue, para el tiempo de 3 a 9 horas y para la temperatura de 350 a 850°C, se llega al **polinomio de dureza**, que es:

$$Dureza = -425.77812 + 2.9636T - 0.0026664T^2 - 26.8906t + 0.054268Tt \quad \text{Ec. (5.4)}$$

Donde:

Dureza — Dureza [HV]

T — Temperatura [°C]

t — tiempo [h]

En la prueba de microscopia, y apoyándose en las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24, se observa que los valores más altos de dureza están en el intervalo de 600°C a 3, 6 y 9 horas, si se observan las fotos 5.10 a 5.21 correspondientes para este nivel del experimento, se observa la gran cantidad de precipitación de carburos, tanto lenticulares en forma de agujas, como masivos, estos se encuentran tanto intergranulares como transgranulares.

Para valores intermedios de dureza, se observa en las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24, están en el intervalo de 850°C a 9 horas y 350°C a 3horas; se observa en las fotos correspondientes, la ausencia de carburos, puesto que el material fue homogenizado, el primer tratamiento esta muy cerca de los niveles de homogenización, por lo que hay solubilidad de carburos, mientras que en el segundo nivel, la temperatura no es suficiente para lograr cambios significativos en la estructura.

Para valores bajos de dureza, se observa en las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24, están en el nivel de 350°C a 9 horas, la microestructura para este material se observa en las fotos 5.8 y 5.9, se aprecia, que no existe precipitación de carburos y el material esta totalmente homogenizado, esta temperatura no es significativa en la formación de carburos, sin embargo el tiempo en que permanece a esta temperatura, lo hace blando.

5.3 RESULTADOS DE MICROSCOPIA

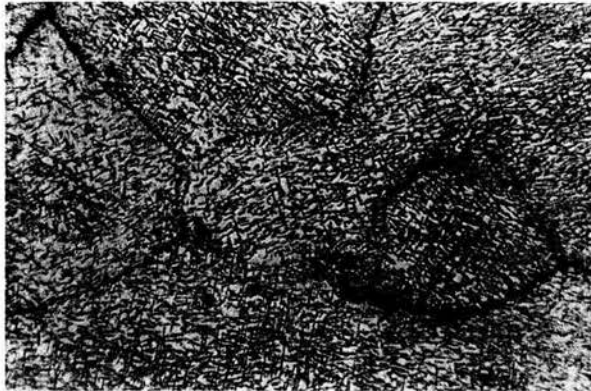


Foto 5.1; 350°C 3h 100X (óptica)



Foto 5.2; 350°C 3h 400X (óptica)



Foto 5.3; 350°C 3h 2000X (SEM)



Foto 5.4; 350°C 3h 4500X (SEM)

En las Fotos 5.1 a 5.4, se observan los bordes de grano bien definidos, la mayor precipitación de carburos en forma de agujas, no uniformemente, principalmente en bordes de cristal, en una matriz de austenita.

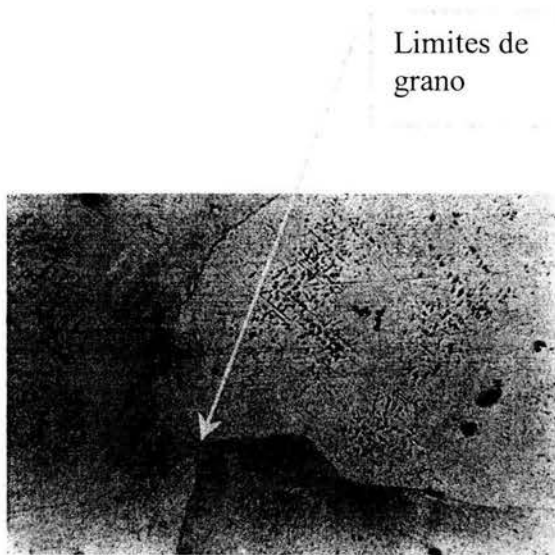


Foto 5.5; 350°C 6h 100X (óptica)

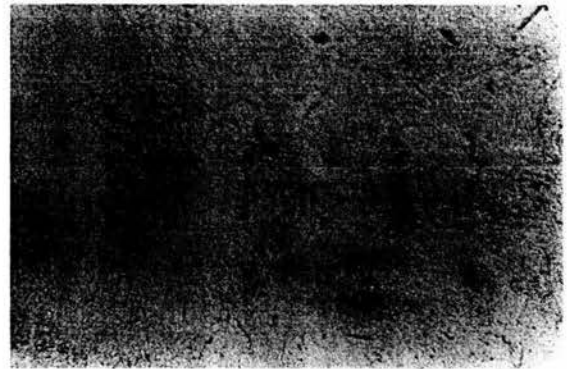


Foto 5.6; 350°C 6h 400X (óptica)

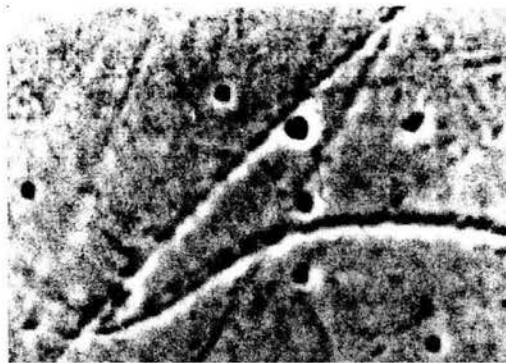


Foto 5.7; 350°C 6h 7000X (SEM)

En las Fotos 5.5 a 5.7, se observa los bordes de grano definidos, muy poca precipitación de carburos, en los limites de grano e intergranulares, estos últimos tienen forma de aguja, lo que da la idea de la presencia de martensita, en una matriz de austenita.

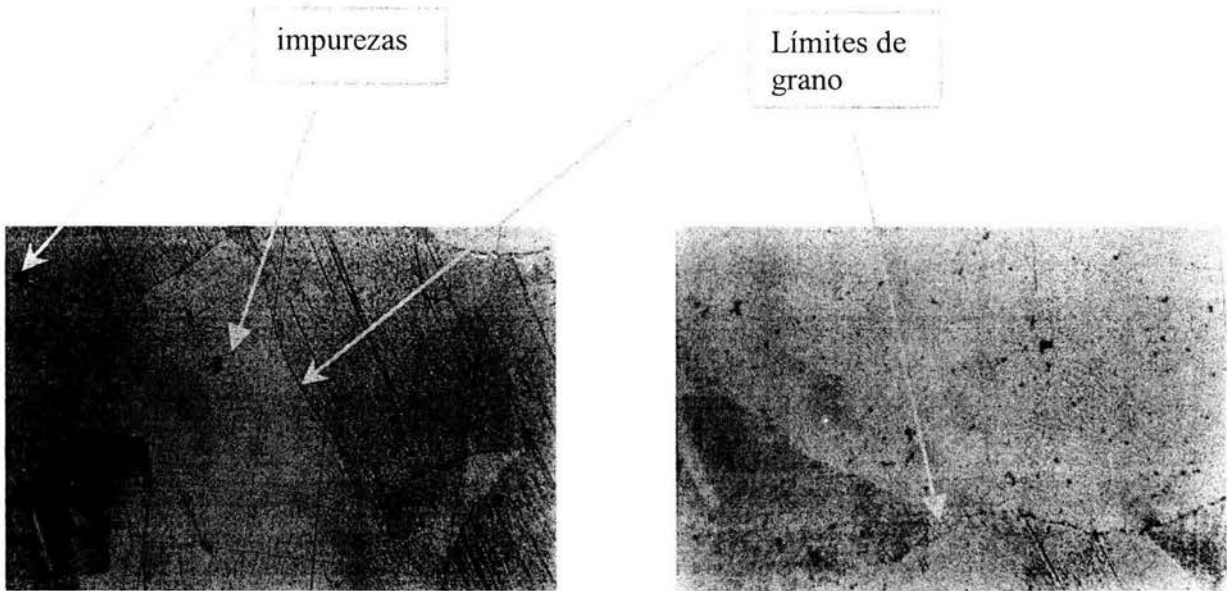


Foto 5.8; 350°C 9h 100X (óptica)

Foto 5.9; 350°C 9h 400X (óptica)

Se observa en las fotos 5.8 y 5.9, un material muy solubilizado, límites de grano bien definidos y muy poca precipitación de carburos, estos son esféricos intercrystalinos a borde de cristal, así como impurezas.

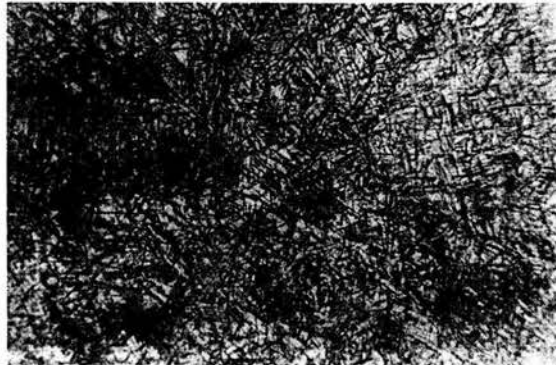


Foto 5.10; 600°C 3h 100X (óptica)

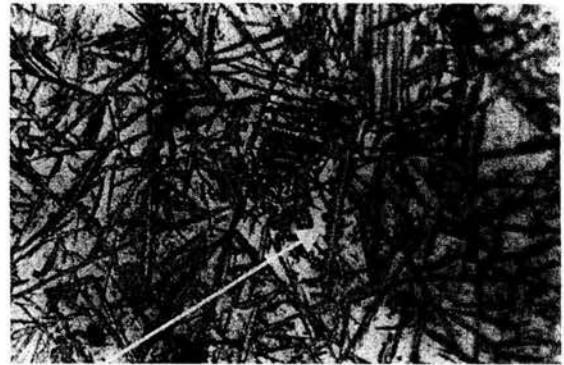


Foto 5.11; 600°C 3h 400X (óptica)

Carburos
dendríticos

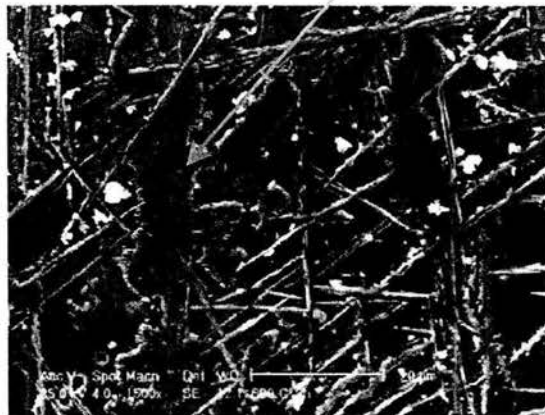


Foto 5.12; 600°C 3h 1500X (SEM)

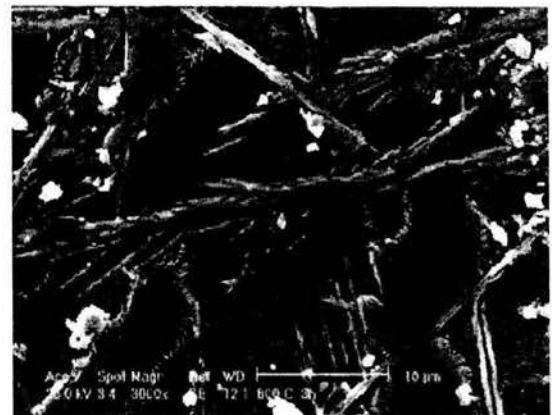


Foto 5.13; 600°C 3h 2000X (SEM)

En las Fotos 5.10 a 5.13, se observa una gran cantidad de precipitación de carburos, tanto intercrystalinos así como transcrystalinos, estos son de dos tipos, de aguja que dan la idea de martensita presente y en forma de dendritas, estos últimos también se les llama de tipo masivo, que a grandes aumentos (Fotos 1.12 y 5.13), tienen la forma de hojuelas, mientras que los carburos en forma de agujas a estos aumentos hay algunos de tipo plumbosos, o en forma de plumas; así como también la presencia de impurezas.

Carburos

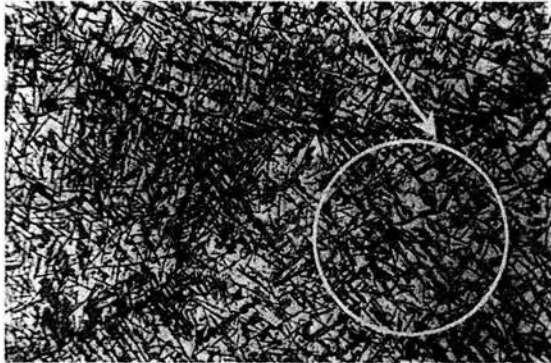


Foto 5.14; 600°C 6h 100X (óptica)

Impurezas



Foto 5.15; 600°C 6h 400X (óptica)

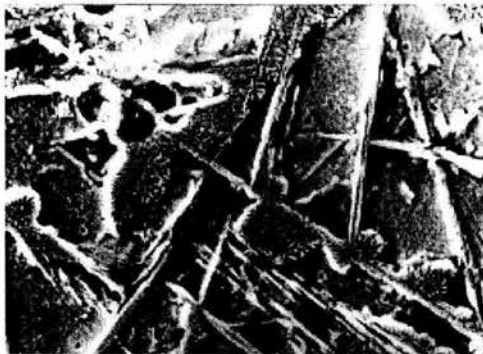


Foto 5.16; 600°C 6h 3000X (SEM)



Foto 5.17; 600°C 6h 7000X (SEM)

En las Fotos 5.14 a 5.16 se observa una gran cantidad de precipitación de carburos, tanto intercristalinos, como transcristalinos, estos son de dos tipos en forma de aguja que dan la idea de martensita presente, y en forma de dendritas también llamados carburos masivos, que a grandes aumentos se observan en forma de hojuelas, estos se desprenden de los carburos en forma de agujas, estos algunos se presentan plumbosos.

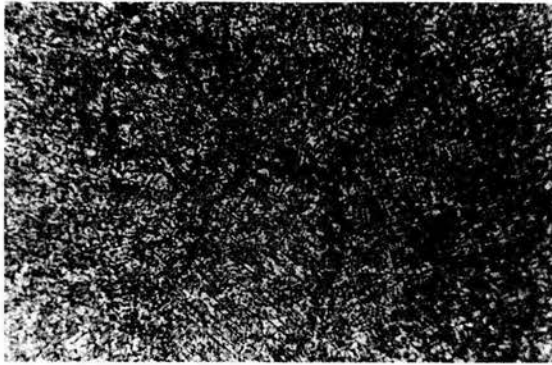


Foto 5.18; 600°C 9h 100X (óptica)

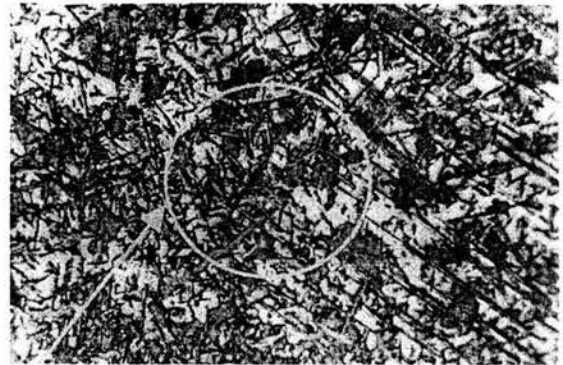


Foto 5.19; 600°C 9h 400X (óptica)

Carburos
plumbosos y
estaqueados



Foto 5.20; 600°C 9h 1500X (SEM)



Foto 5.21; 600°C 9h 5000X (SEM)

Las Fotos 5-14 a 5-16, están presentes dos tipos de carburos presentes, los de aguja y masivos, los primeros presentan un arreglo simétrico intercrystalino, mientras que los carburos masivos se observan en mayor cantidad y agrupados, dando la apariencia de formarse carburos esféricos, los carburos en forma de agujas se reduce la cantidad de plumbosos, esto al parecer facilita el crecimiento de carburos masivos, todos estos están presentes en la matriz de austenita (γ), también se aprecia la presencia de impurezas.

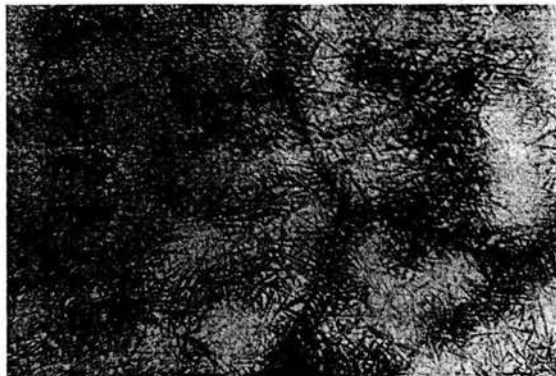


Foto 5.22; 850°C 3h 100X (óptica)

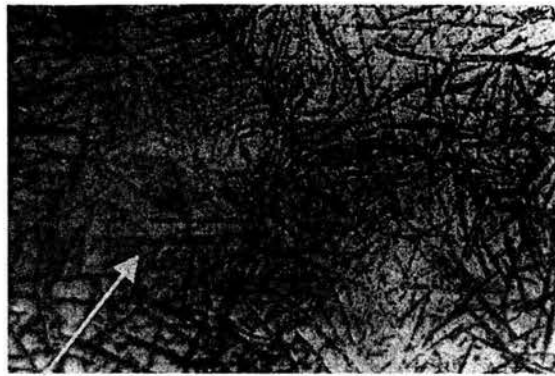


Foto 5.23; 850°C 3h 400X (óptica)

Carburos
estaqueados



Foto 5.24; 850°C 3h 1500X (SEM)



Foto 5.25; 850°C 3h 3000X (SEM)

En las Fotos 5.22 a 5.25 se observa que la mayor cantidad de carburos precipita en los límites de grano y en zonas preferenciales intercristalinas, estos carburos, como se muestra en la Foto 5.24 la mayor cantidad son del tipo de aguja, aunque también hay otro tipo de precipitados, como son los de tipo esférico, estos están en menor cantidad, comparados con los de agujas presentes, en este nivel de temperatura y tiempo, ya no se observan los carburos de tipo masivo, mientras que la matriz sigue siendo austenita (γ), de igual manera se observan algunas impurezas en el material.

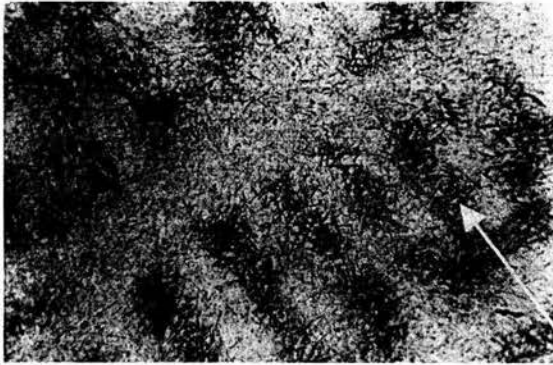


Foto 5.26; 850°C 6h 100X (óptica)

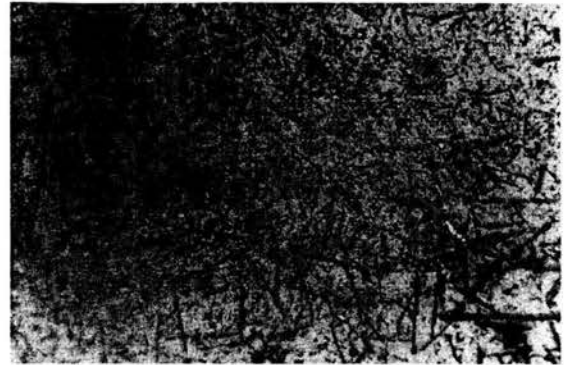


Foto 5.27; 850°C 6h 400X (óptica)

Carburos en
zonas
preferenciales

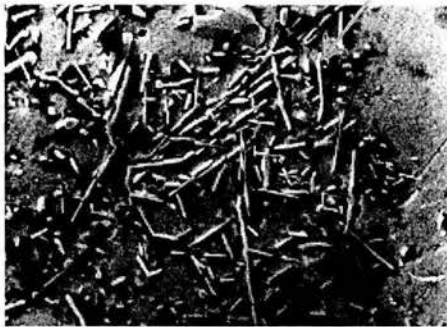


Foto 5.28; 850°C 6h 1000X (SEM)



Foto 5.29; 850°C 6h 3000X (SEM)

Como se puede observar en las Fotos 5.26 a 5.29, la precipitación de carburos en forma de agujas, y en comparación con el nivel de experimentación anterior (850°C a 3h), hay un pequeño aumento de carburos de tipo globulizado intercristalinos, aunque aún predominan los carburos de tipo aguja, que crecen en zonas preferenciales así como en límites de grano, también se observa la presencia de grietas como la de la Foto 5.26.

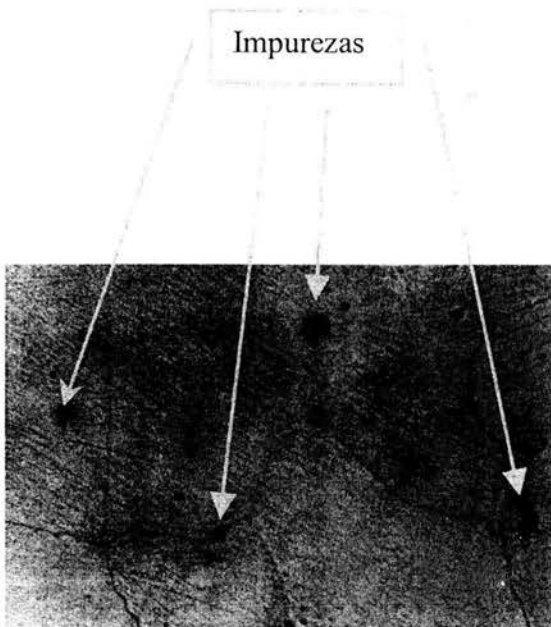


Foto 5.30; 850°C 9h 100X (óptica)

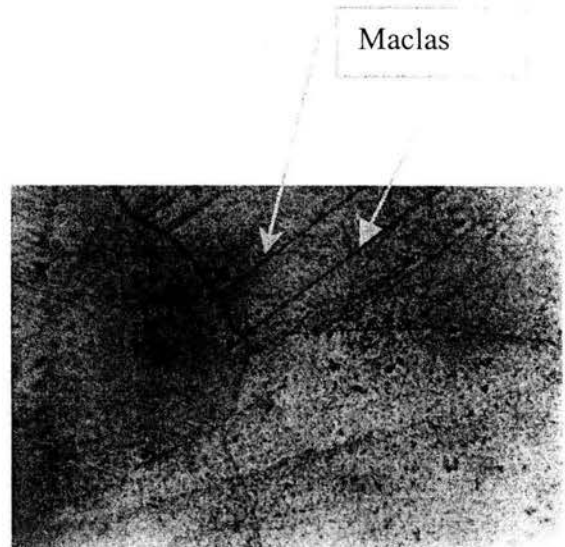


Foto 5.31; 850°C 9h 400X (óptica)

En las Fotos 5.30 y 5.31, se observa casi completamente la disolución de carburos, así como los límites de grano, los pocos carburos presentes, se observan en direcciones de planos preferenciales, que están como si fueran un línea intergranular, también se notan impurezas.

6 CONCLUSIONES

El principal componente de aleación de un acero Hadfield, es el manganeso, el cual puede variar su porcentaje en la aleación desde un 8% hasta un 22% en peso, siendo 13% el más utilizado.

Los resultados obtenidos mediante la experimentación y el tratamiento de datos, indican que en el acero Hadfield la variación de los parámetros tiempo-temperatura provocan una marcada modificación de sus propiedades mecánicas.

Las estructuras resultantes son el efecto del tratamiento térmico aplicado, donde se da la formación de los carburos en los diferentes puntos de energía. Unos son en los bordes de cristal, y posteriormente en los planos de cristalización o preferenciales de la matriz de austenita.

La presencia de carburos, tanto en forma de agujas y masivos, es abundante en el nivel de temperatura de 600°C, en los diferentes niveles de tiempo (3, 6 y 9 horas), mientras que en los niveles extremos de temperatura, se presenta en forma casi disuelta el material, excepto para la temperatura de 350°C a 3 horas, donde presenta precipitación de carburos en forma de agujas en zonas preferenciales.

La presencia de carburos tanto intergranulares como transgranulares, tiene una marcada influencia en la variable de respuesta de la dureza, pues a mayor cantidad de carburos, se eleva la dureza del material en un amplio rango.

También la presencia de carburos, al mismo tiempo que aumenta la dureza, disminuye el límite elástico, esto es, que el material se endurece, al mismo tiempo que se torna frágil, por lo tanto se requiere menos fuerza para llegar a su límite elástico, el límite de elasticidad en estos puntos es bajo, mientras que en donde el material esta mas disuelto, su límite de elasticidad es mayor.

Las probetas a 600°C presentan un valor muy bajo de carga máxima, debido a la gran cantidad de caburos presentes, el material se endurece, pero a la vez se hace más frágil..

Con la superficie de respuesta para cada propiedad del material, se puede predecir las respuestas de este, para las diferentes combinaciones de temperatura-tiempo, dentro de los intervalos preestablecidos del experimento, en el tratamiento térmico de temple, y no solo seleccionar la mejor respuesta entre las combinaciones de tiempo y temperatura ensayados.

Para obtener un valor específico, deseado o requerido de alguna propiedad en particular, el uso de su superficie de respuesta es de gran utilidad, pues mediante ésta, se puede determinar la combinación de tiempo temperatura para alcanzar el valor deseado. También hay casos donde el mismo valor se alcanza con diferentes combinaciones, no con una única combinación, en estos casos se elige el tratamiento de mayor conveniencia.

Por otro lado, si se requiere la región óptima o crítica de alguna propiedad en particular, se consulta la superficie de respuesta correspondiente, y se eligen los valores de los factores tiempo-temperatura para obtener la región deseada.

Sin embargo, cuando se requiera de valores de dos o más propiedades, se tendrá que evaluar las respuestas de cada una de las variables en cuestión y así poder elegir un buen tratamiento térmico de temple, a fin de tener una respuesta balanceada en las propiedades del material, esto mediante la aplicación de criterio ingenieril.

Los modelos de respuesta que caracterizan a un material en un rango experimental, son instrumentos valiosos para la selección del material en cuestión, pues se predice la respuesta en todo el intervalo experimental, a partir de ensayos puntuales lo que hace sumamente económico la determinación de la respuesta, al no tener que realizar experimentos en múltiples combinaciones de tiempo – temperatura, sino en puntos determinados y a partir de estos resultados se hace la predicción o interpolación de la respuesta del material.

ANEXOS

ANEXO 1

TABLAS DE ANALISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Tabla A.1 Módulo de Young

| Factores | gl | SC | CM | F | Significancia |
|--------------------|----|------------|------------|------------|---------------|
| Temperatura | 2 | 6891365856 | 3445682928 | 5.72225911 | * |
| Tl | 1 | 1160028713 | 116002871 | 1.92646422 | n.s. |
| Tq | 1 | 5731337143 | 573133714 | 9.51805401 | * |
| Tiempo | 2 | 854325926 | 427162963 | 0.70939120 | n.s. |
| tl | 1 | 778053740 | 778053740 | 1.29211689 | n.s. |
| tq | 1 | 76272186.9 | 76272186.9 | 0.12666551 | n.s. |
| Tiempo×Temperatura | 4 | 5664995433 | 141624885 | 2.35197001 | * |
| tl×Tl | 1 | 1127099574 | 112709957 | 1.87177867 | n.s. |
| tl×Tq | 1 | 162422735. | 162422735. | 0.26973607 | n.s. |
| tq×Tl | 1 | 1664748581 | 166474858 | 2.76465448 | * |
| tq×Tq | 1 | 2710724542 | 271072454 | 4.50171085 | * |
| Error | 18 | 1083900000 | 602154299 | | |
| Total | 26 | 2424900000 | | | |

Tabla A.2 Carga Máxima

| Factores | gl | SC | CM | F | Significancia |
|--------------------|----|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Temperatura | 2 | 19515890 | 9757945 | 7.1405307 | * |
| Tl | 1 | 126349.79 | 126349.79 | 0.0924585 | n.s. |
| Tq | 1 | 19389540 | 19389540 | 14.188603 | * |
| Tiempo | 2 | 3681656 | 1840828 | 1.347055 | n.s. |
| tl | 1 | 698168.06 | 698168.06 | 0.5108955 | n.s. |
| tq | 1 | 2983487.8 | 2983487.8 | 2.1832144 | * |
| Tiempo×Temperatura | 4 | 5669771 | 1417442.8 | 1.0372362 | n.s. |
| tl×Tl | 1 | 405168.75 | 405168.75 | 0.2964886 | n.s. |
| tl×Tq | 1 | 594184.03 | 594184.03 | 0.4348036 | n.s. |
| tq×Tl | 1 | 2497007.8 | 2497007.8 | 1.827225 | n.s. |
| tq×Tq | 1 | 2173410.4 | 2173410.4 | 1.5904275 | n.s. |
| Error | 18 | 24598033 | 1366557.4 | | |
| Total | 26 | 53465350 | | | |

Tabla A.3 Límite de Elasticidad

| Factores | gl | SC | CM | F | Significancia |
|--------------------|----|------------|------------|------------|---------------|
| Tiempo | 2 | 30714 | 15357 | 1.86634349 | n.s. |
| tl | 1 | 1636.23223 | 1636.23223 | 0.19885208 | n.s. |
| tq | 1 | 29077.8901 | 29077.8901 | 3.53384976 | * |
| Temperatura | 2 | 119579 | 59789.5 | 7.26624626 | * |
| Tl | 1 | 23862.8206 | 23862.8206 | 2.90005989 | * |
| Tq | 1 | 95715.8757 | 95715.8757 | 11.6323957 | * |
| Tiempo×Temperatura | 4 | 71214 | 17803.5 | 2.16366779 | * |
| tl×Tl | 1 | 0 | 0 | 0 | n.s. |
| tl×Tq | 1 | 2139.49719 | 2139.49719 | 0.26001411 | n.s. |
| tq×Tl | 1 | 47940.1196 | 47940.1196 | 5.82618545 | * |
| tq×Tq | 1 | 21134.3405 | 21134.3405 | 2.56846641 | * |
| Error | 18 | 148111 | 8228.38889 | | |
| Total | 26 | 369618 | | | |

Tabla A.4 Durezas

| Factores | gl | SC | CM | F | Significancia |
|--------------------|----|------------|------------|------------|---------------|
| Tiempo | 2 | 6073.41911 | 3036.70956 | 3.30836291 | n.s. |
| tl | 1 | 5209.08574 | 5209.08574 | 5.67507223 | * |
| tq | 1 | 864.333365 | 864.333365 | 0.94165359 | n.s. |
| Temperatura | 2 | 175690.357 | 87845.1787 | 95.7034994 | * |
| Tl | 1 | 9028.32031 | 9028.32031 | 9.83596209 | * |
| Tq | 1 | 166662.037 | 166662.037 | 181.571037 | * |
| Tiempo×Temperatura | 4 | 23628.9509 | 5907.23772 | 6.43567842 | * |
| tl×Tl | 1 | 19879.2367 | 19879.2367 | 21.6575633 | * |
| tl×Tq | 1 | 899.16686 | 899.16686 | 0.97960316 | n.s. |
| tq×Tl | 1 | 1356.69444 | 1356.69444 | 1.47805956 | n.s. |
| tq×Tq | 1 | 1493.85288 | 1493.85288 | 1.6274877 | n.s. |
| Error | 18 | 16522 | 917.888889 | | |
| Total | 26 | 221914.727 | | | |

ANEXO 2

GRAFICAS ESFUERZO - DEFORMACIÓN

Tratamiento térmico a 350°C por 3 horas

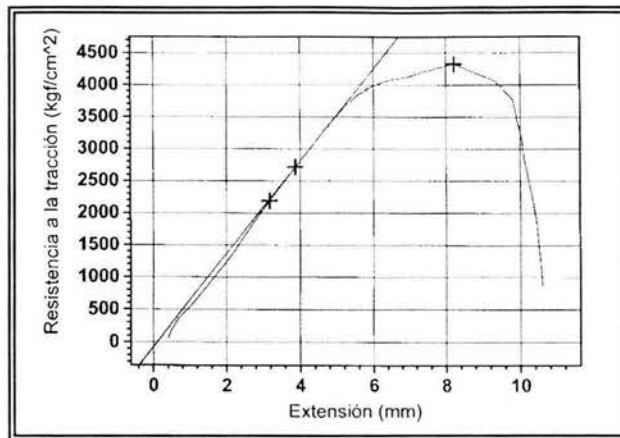


Figura 1 Probeta 111 (P₁₁₁)

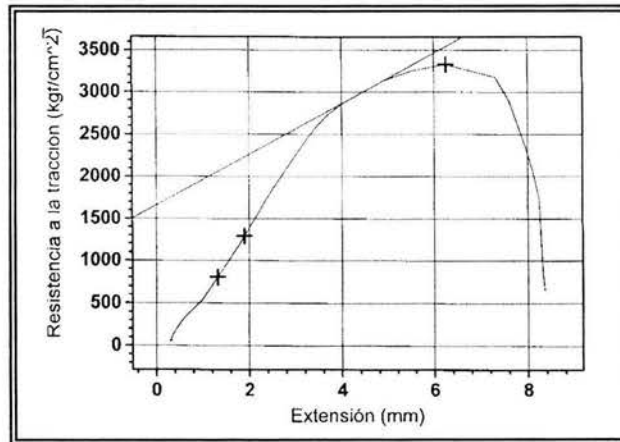


Figura 2 Probeta 112 (P₁₁₂)

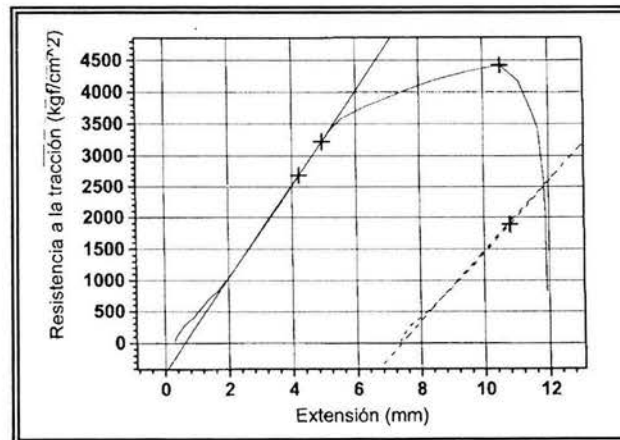


Figura 3 Probeta 113 (P₁₁₃)

Tratamiento térmico a 350°C por 6 horas

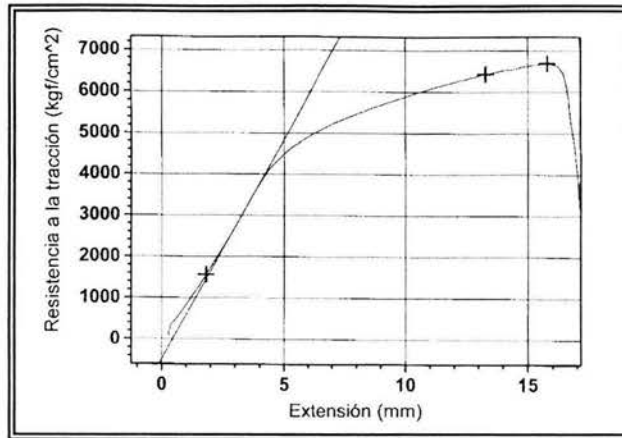


Figura 4 Probeta 211 (P_{211})

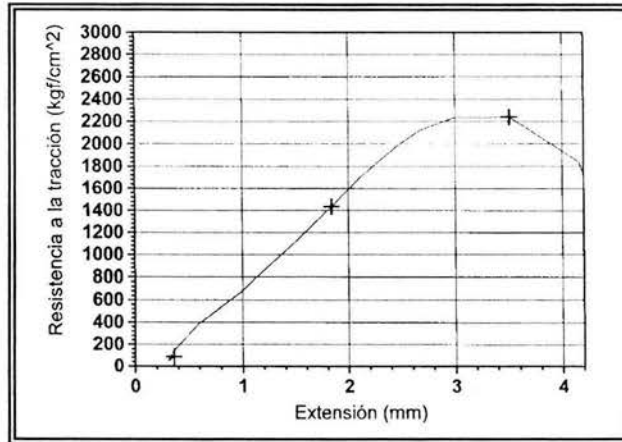


Figura 5 Probeta 212 (P_{212})

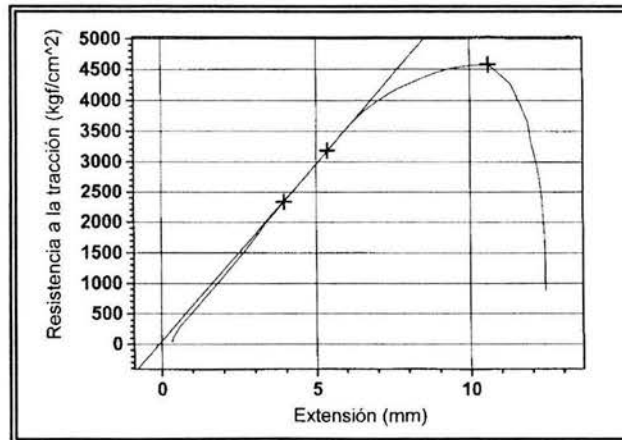


Figura 6 Probeta 213 (P_{213})

Tratamiento térmico a 350°C por 9 horas

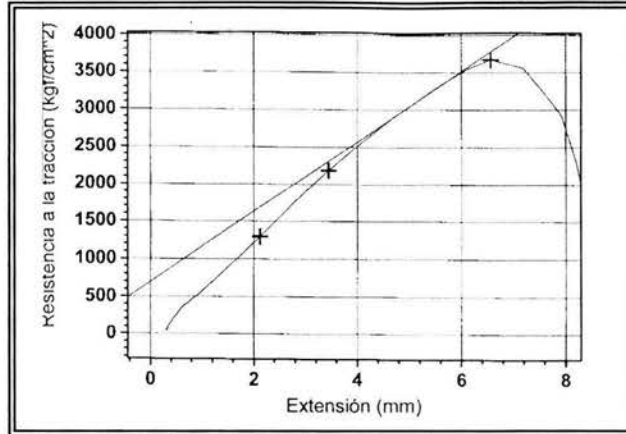


Figura 7 Probeta 311 (P₃₁₁)

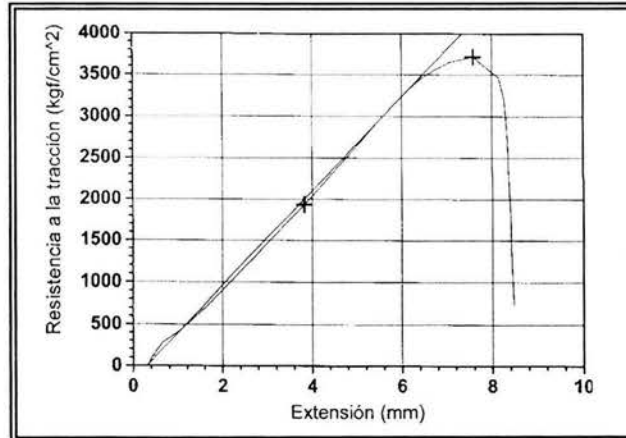


Figura 8 Probeta 312 (P₃₁₂)

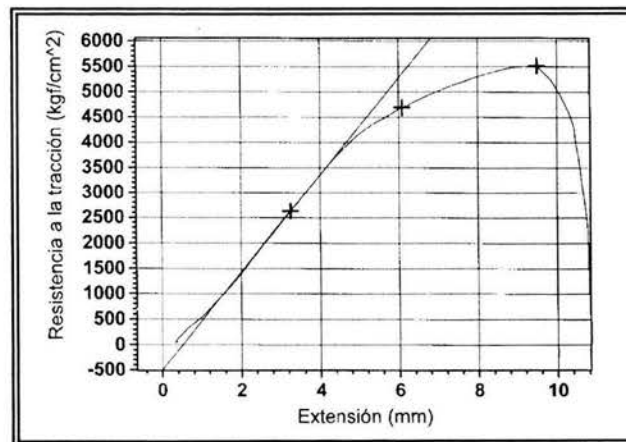


Figura 9 Probeta 313 (P₃₁₃)

Tratamiento térmico a 600°C por 3 horas

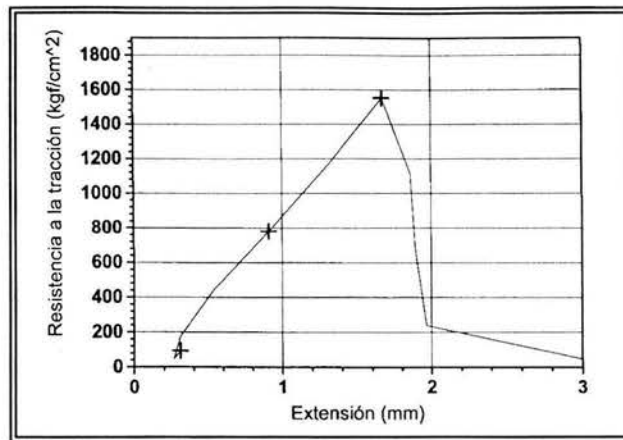


Figura 10 Probeta 121 (P_{121})

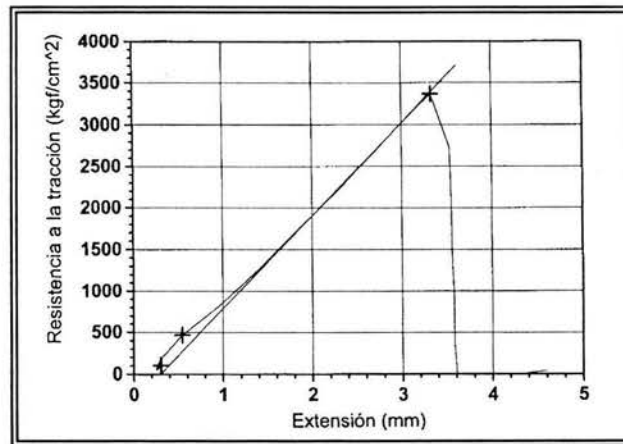


Figura 11 Probeta 122 (P_{122})

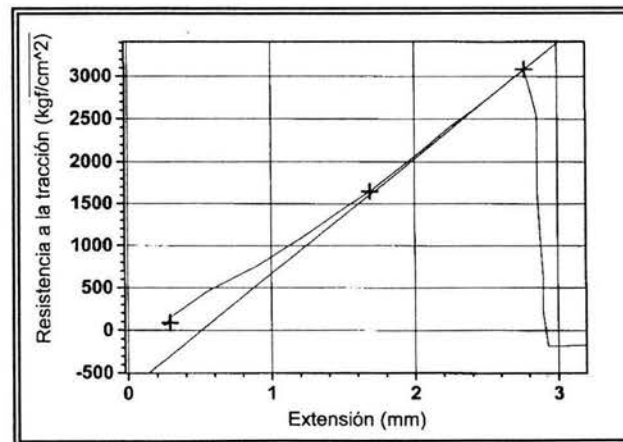


Figura 12 Probeta 123 (P_{123})

Tratamiento térmico a 600°C por 6 horas

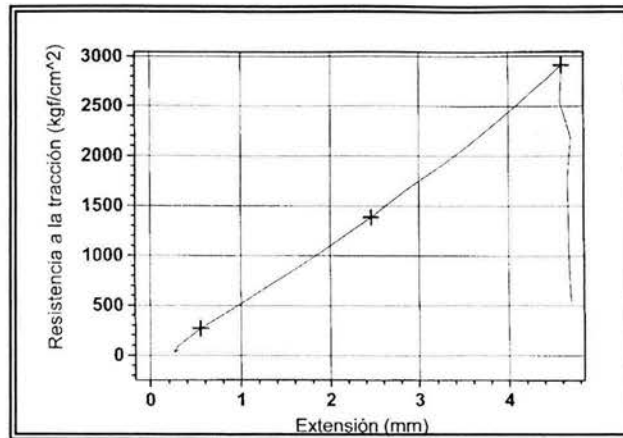


Figura 13 Probeta 221 (P₂₂₁)

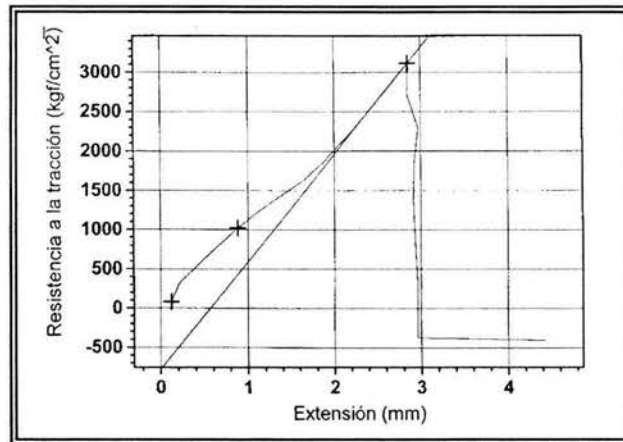


Figura 14 Probeta 222 (P₂₂₂)

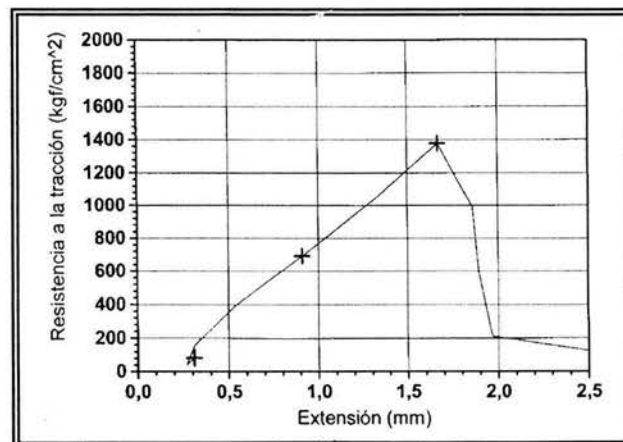


Figura 15 Probeta 223 (P₂₂₃)

Tratamiento térmico a 600°C por 9 horas

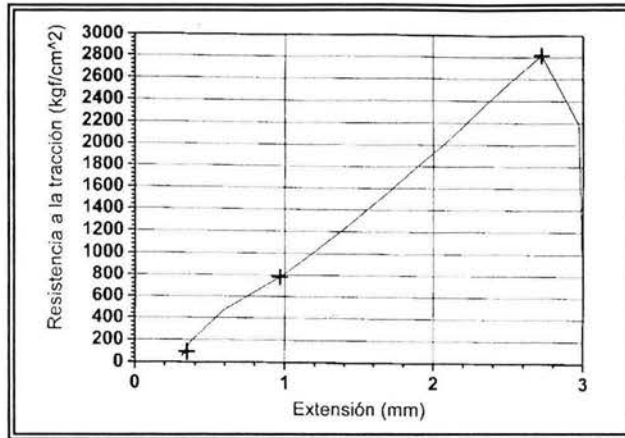


Figura 16 Probeta 321 (P_{321})

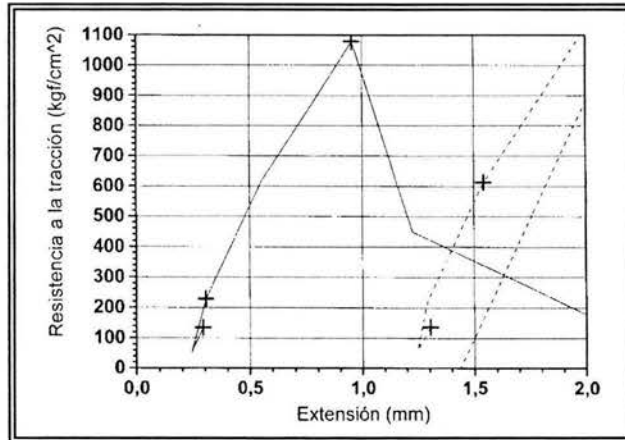


Figura 17 Probeta 322 (P_{322})

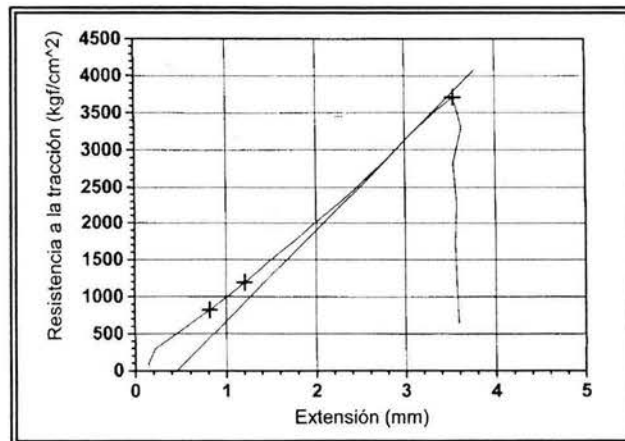


Figura 18 Probeta 323 (P_{323})

Tratamiento térmico a 850°C por 3 horas

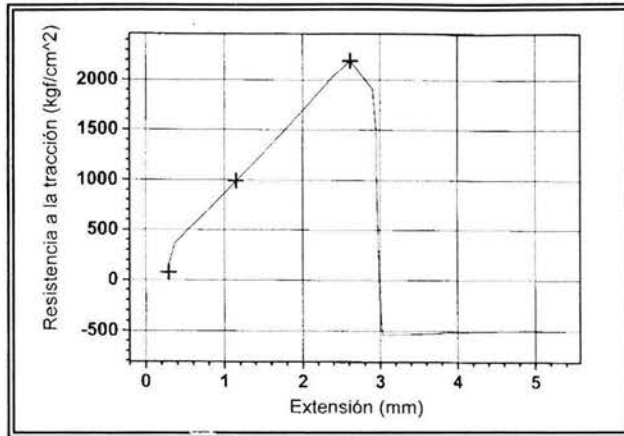


Figura 19 Probeta 131 (P_{131})

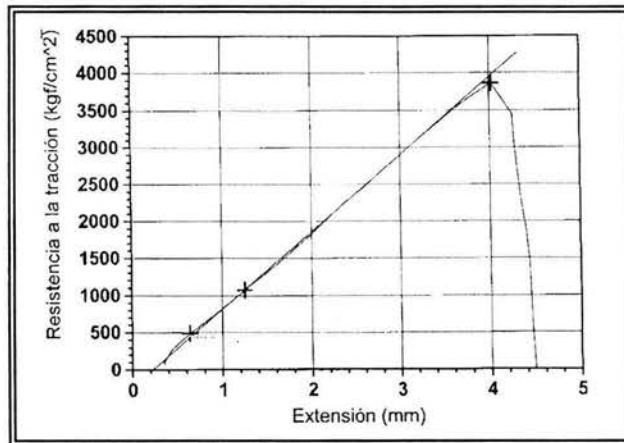


Figura 20 Probeta 132 (P_{132})

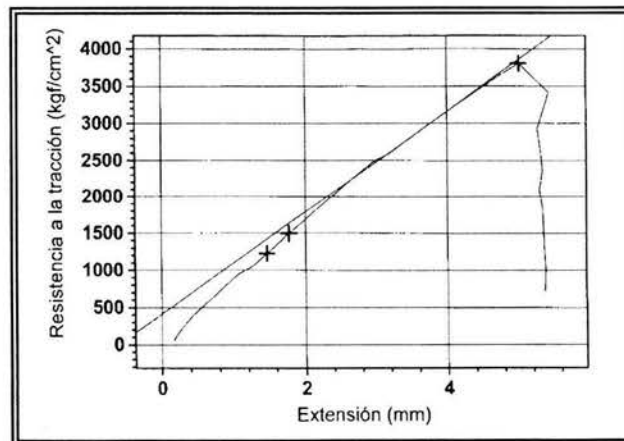


Figura 21 Probeta 133 (P_{133})

Tratamiento térmico a 850°C por 6 horas

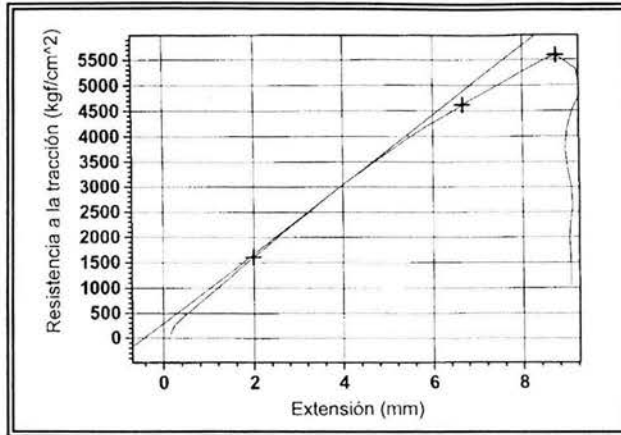


Figura 22 Probeta 231 (P₂₃₁)

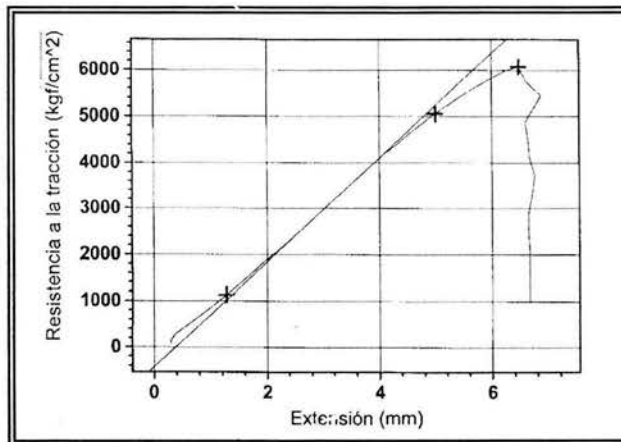


Figura 23 Probeta 232 (P₂₃₂)

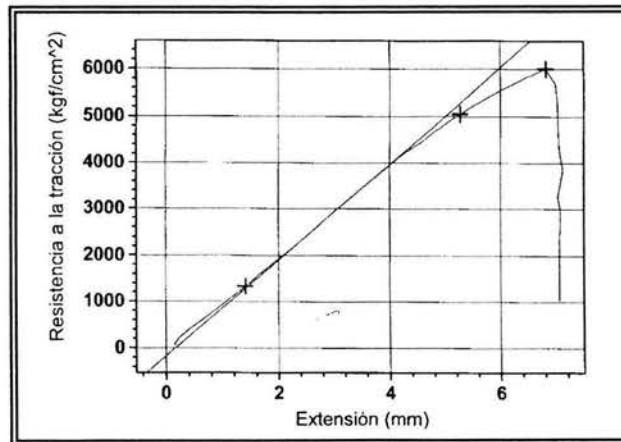


Figura 24 Probeta 233 (P₂₃₃)

Tratamiento térmico a 850°C por 9 horas

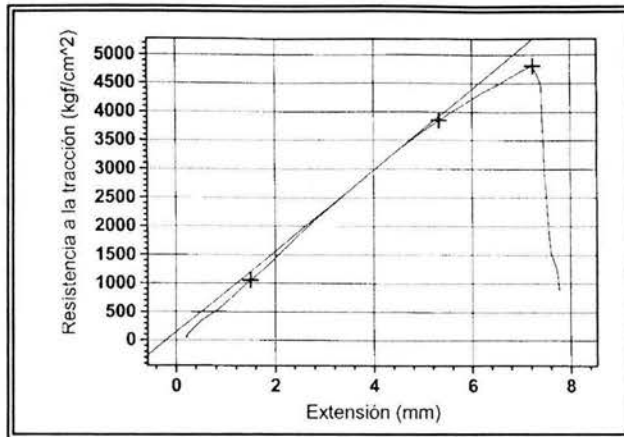


Figura 25 Probeta 331 (P_{331})

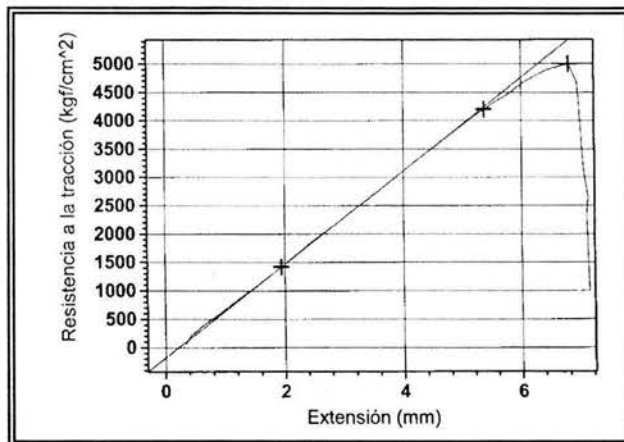


Figura 26 Probeta 332 (P_{332})

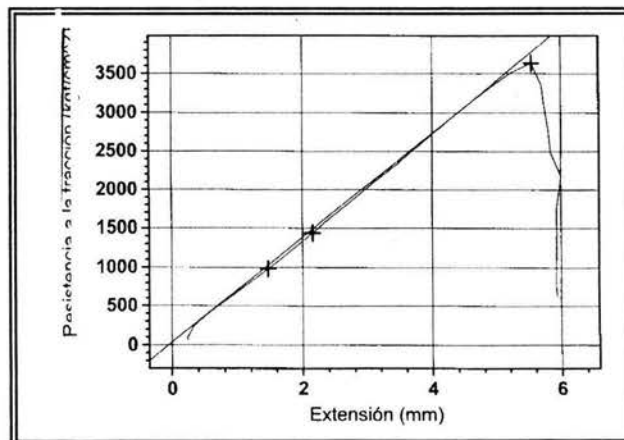


Figura 27 Probeta 333 (P_{333})

BIBLIOGRAFÍA

1. Askeland R. Donald. *Ciencia e Ingeniería en los Materiales*. International Thomson. 3ra edición México 1999.
2. Avner HS, *Introducción a la metalurgia física*, 2ª Edición, McGraw Hill, 1995, p. 56-104.
3. Brick Mr, Pense WA y Gordon Br, *Structure and properties of Engineering Materials*, 3a. Edición, McGraw Hill, 1977, p. 46- 68.
4. Donald R. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, tercera edición, International Thomson Editores, 1998, p. 64-112.
5. Donald. R. Askeland. *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Internacional Thomson. México 2003.
6. Douglas C. Montgomery, *Diseño y analisis de experimentos*, segunda edición, Limusa Wiley, 2004.
7. Douglas C. Montgomery. *Diseño y Análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamerica. México D.F. 1991.
8. Eugene A. Avallone, Theodore Beumister III, *Manual del Ingeniero Mecánico*, novena edición, McGraw-Hill, 1995.
9. Kuehl Robert O. *Diseño de Experimentos*. International Thomson. México 2001.
10. Latjin Y. y Arzamásov B. *Tratamiento químico térmico de los metales*. Mir. Moscú 1977.

11. ***Metal Handbook***, vol. 9, p.p. 568 – 588, 9a Edición, American Society for Metals, 1983.
12. Richard A. Flinn, Paul H. Trojan, ***Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones***, McGraw-Hill, 1989.
13. Robert O. Kuehl. ***Diseño de Experimentos*** 2da. Edición. Thomson Learnig. México D.F. 2001.
14. Vandert Voort, ***Metallography principles and practice***, McGraw-Hill Book Company, 1984.
15. William D Callister, Jr., ***Introduccion a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales***, Editorial Reverté,S.A., 1997.

Articulos

- I. Antón N., Delgado J. L., Velasco F. Torralba J.M., ***“Influence of alloying element additions on tribological behavior of sintered steels with high content in manganese-nickel”***, *Journal of Materials Procesing Technology.*, 2003.
- II. Bayraktar Emin, Khalid A. Fazal, Levaillant Ch., ***“Deformation and fracture behavior of high manganese austenitic steel”***, *Journal of Materials Procesing Technology, Elsevier.*, 21 October 2003, No. 147, pp. 145 - 154.
- III. Borik F., Scholz W. G., ***“Effects of time and Temperature on Ductility and Toughness of Modified Austenitic Manganese Steel”***, *Climax Molybdenum Co.*, 1985.
- IV. Borik, F., W Scholz, ***Climax Molybdenum Co.*** A division of AMAX American Metal Climax, Inc. 1971.

- V. Doepken H., H. Chapin et. al., *Austenitic Manganese Steel*, Vol. 4, 5a. Edición, American Welding Society, 1986.
- VI. *Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2000*. © 1993-1999 Microsoft Corporation.
- VII. Junyou Liu, Zhongliang, Yansheng, “*Study on Alloying Process and its Influence on Microstructure and Properties of High Manganese Steels*”, Elsevier Science Ltd., 1997, Volumen 25, No. 8, 1997, pp. 658 – 670.
- VIII. Karaman I., Sehitoglu H. Gall Ken, Chumilyakov I., “*On the Deformation Mechanisms in single crystal Hadfield Manganese Steels*”, Elsevier Science Ltd., 1997, Volumen 38, No. 6, 1998, pp. 1009 – 1015.
- IX. Kopac Janez, “*Hardening phenomena on Mn-austenite steel in the cutting process*”, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier., 2001, No. 109, pp. 96-104.
- X. Levaillant Ch., Bayraktar Emin, Khalid A. Fazal, “*Deformation and fracture behavior of high manganese austenitic steel*”, *Journal of Materials Procesing Technology*, Elsevier., 21 October 2003, No. 147, pp. 145 - 154.
- XI. Li M.C., Chang H., Kao P. W., Gan D., “*The effect of Mn and Al contents on the solvus of K phase in austenitic Fe-Mn-Al-C Alloys*”, *Materials Chemistry and Physics*, Elsevier., 15 January 1999, No. 59, pp. 96 - 99.
- XII. Maratray, f., T. Norman, *Climax Molybdenum Company*, A division of AMAX American Metal Climax, Inc. 1981
- XIII. Owen W.S. Grujicic M., “*Strain aging of austenitic hadfield manganese steel*”, *Pergamon, Elsevier Science*, Vol. 47, 1999, No. 1, pp. 111-126.

- XIV. Smith R. W., DeMonte A., Mackay W.B.F., "***Development of high-manganese steels for heavy duty cast-to-shape applications***", *Journal of Materials Processing Technology, Elsevier*, 2004,143 - 144, pp. 475 - 480.
- XV. T. E. Norman, D. V. Doane, A. Solomon, *Austenitic Manganese Steel* A.F.S., Transactions, 1975.
- XVI. Tianfu Jing, Fucheng Zhang, "***The work-hardening behavior of medium manganese steel under impact abrasive wear condition***", *Materials Letters, Elsevier.*, June 1997, 1997, No. 31, pp. 275-279.
- XVII. Sakamoto Harou, Toyama Kazuo, Hirakawa Kenji, "***Fracture toughness of medium-high carbon steel rail road wheel***", *Materials Science & Engineering, Elsevier*, 2000, No. A285, pp. 288-292.
- XVIII. Zhang Z.L., Thaulow C. Odegard J., "***A complete Gurson model approach for ductile fracture*** ", *Engineering Fracture Mechanics, Pergamon*, 2000, No. 67, pp. 155 - 168.