

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE SOLDADURA POR RESISTENCIA  
EN ACEROS AUTOMOTRICES AVANZADOS**

**POR**

**LUIS MIGUEL PÉREZ MUÑOZ**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**NOVIEMBRE, 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE SOLDADURA POR RESISTENCIA  
EN ACEROS AUTOMOTRICES AVANZADOS**

**POR**

**LUIS MIGUEL PÉREZ MUÑOZ**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**NOVIEMBRE, 2016**

## **DEDICATORIA.**

A Dios, por darme la sabiduría, paciencia y tenacidad para realizar este trabajo, porque a pesar de las adversidades supo iluminar mi camino y orientarme a lo mejor para mí.

A mis padres: Luis Pérez Olasaba y Ma. Luz Muñoz Rosales, que gracias a ellos soy lo que soy hasta el día, a su soporte y a su humanidad que me ha hecho el hombre que soy. A mis sobrinos Miguel e Iris, simplemente mi motivación para ser una mejor persona y servir de inspiración para que ellos logren sus objetivos en un futuro.

A mi novia: Lesly Guzmán Durán, gracias a la ayuda y soporte que me has dado, incluso en los más difíciles tu soporte nunca me faltó, motivándome, y ayudándome donde te era posible, incluso hasta un poco más.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, gracias por la experiencia brindada hasta el día de hoy, por dejarme formar parte del posgrado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz, por los conocimientos y por conocer gente con un gran profesionalismo y calidad Humana.

A CONACYT, gracia por el apoyo económico para realizar dicho estudio de posgrado y poder culminarlo.

A TERNIUM, gracias por brindarme este proyecto.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata, gracias por el apoyo recibido en todo momento, por la confianza que me brindo al apoyarme en este proyecto.

Al Dr. Sergio Haro Rodríguez, mil gracias por sus consejos y por el conocimiento que me brindo para realizarlo, gracias por la paciencia que me tuvo, el tratar con alguien tan testarudo como yo no es una tarea fácil y siempre pude contar con usted, muchas gracias.

Al Dr. Omar García Rincón, gracia por los consejos y su conocimiento que me brindo.

A mis amigos: a Javier junto empezamos esto y juntos lo acabamos, gracias por tu excelente calidad humana y por siempre estar dispuesto a ayudarme; a

Diego y Luis, gracias por su amistad, por sus consejos, cada quien a su modo supo darme los consejos que necesitaba; a Omar y Abraham, amigos desde ya hace mucho tiempo y siempre me han hecho saber que puedo contar con ustedes, infinitas gracias por todo.

Gracias a la vida, gracias por hacerme llegar hasta aquí, por permitirme conocer con gente amable, servicial, humana y buena, pero también gente diferente y lugares han dejado experiencias buenas y malas, que pulieron mi personalidad para ser el hombre que soy, infinitas gracias a todos.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “**Evaluación y modelación de soldadura por resistencia en aceros automotrices avanzados**” realizada por el estudiante Luis Miguel Pérez Muñoz, con matrícula 1757858, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

**COMITÉ DE TESIS**



---

**Dra. Martha Patricia Guerrero Mata**

Asesor

---

**Dr. Sergio Haro Rodríguez**

Revisor

---

**Dr. Omar García Rincón**

Revisor



---

**Dr. Simón Martínez Martínez**

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L., Noviembre 2016

# Índice.

Resumen.....	1
CAPÍTULO I .....	3
EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE SOLDADURAS POR RESISTENCIA EN ACEROS AUTOMOTRICES AVANZADOS.....	3
1.1    Introducción. ....	3
1.2.    Antecedentes.....	3
1.3.    Motivación.....	3
1.4.    Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2.    Objetivos particulares. ....	4
1.5.    Justificación. ....	4
1.6.    Hipótesis. ....	5
CAPÍTULO II. ....	6
CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS DE USO AUTOMOTRIZ.....	6
2.1. Metalurgia de los aceros de alta resistencia avanzados (AHSS).....	9
2.1.1. Aceros Doble Fase (DP). ....	9
2.1.2. Aceros con plasticidad inducida por transformación (TRIP).....	10
2.1.3. Aceros de fases complejas (CP).....	11
2.1.4. Aceros Martensíticos (MS).....	11
2.1.5. Aceros Ferríticos-Bainíticos (FB): .....	11
2.1.6. Aceros con plasticidad inducida pro maclado (TWIP). ....	11

2.2. Metalurgia de los aceros de baja y alta resistencia convencionales (HSS).....	12
2.2.1. Aceros de bajo contenido de carbono. ....	12
2.2.2. Aceros endurecidos por envejecimiento (BH). ....	13
2.2.3. Aceros al carbono-manganeso (CM).....	13
2.2.3. Aceros dulces (Mild Steel).....	14
2.2.4. Aceros libres de intersticiales (IF). ....	14
2.3. Aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA). ....	14
2.3.1. Elementos microaleantes niobio, vanadio, titanio, zirconio y boro. ....	15
2.3. Laminación en frío de aceros. ....	21
2.4. Procesos termomecánicos. ....	22
CAPÍTULO III. ....	26
PRINCIPIO DEL PROCESO DE SOLDADURA CONTINUA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA....	26
3.1. Soldadura continua por resistencia. ....	26
3.2. Fundamentos de soldadura de resistencia continúa. ....	27
3.3. Aplicaciones. ....	28
3.3.1. Soldadura continua a traslape. ....	28
3.3.2. Soldaduras continuas Mash. ....	28
3.3.3. Soldadura continua a tope.....	29
3.4. Parámetros de soldadura. ....	29
3.4.1. Corriente de soldadura. ....	29
3.4.2. Velocidad de soldadura.....	29
3.4.3. Fuerza de los electrodos. ....	31



3.4. Soldabilidad de aceros de bajo y medio contenido de carbono.....	32
3.4.1. Aceros de bajo carbono. ....	32
3.4.2. Aceros suaves.....	32
3.4.2. Gráfica “lobe” de soldadura por resistencia continua.....	33
3.5. Formación de la soldadura.....	34
3.6. Solidificación en el proceso de soldadura continúa por resistencia.....	37
3.6.1. Microestructura del punto de soldadura.....	38
3.6.2. Velocidad de enfriamiento en el proceso soldadura de resistencia continua. ....	40
3.7. Efecto de la composición química del acero.....	43
3.7.1. Carbono.....	43
3.7.2. Manganeso.....	43
3.7.3. Azufre. ....	43
3.7.4. Silicio. ....	43
3.7.5. Fósforo. ....	44
3.7.6. Titanio. ....	44
3.7.7. Nitrógeno. ....	44
3.7.8. Oxígeno. ....	44
3.7.9. Hidrógeno.....	44
3.7.10. Boro.....	44
3.8. Relevancia del carbono equivalente.....	45
3.8.1. Diagrama de Graville.....	46

3.9. Pruebas de Soldadura. ....	47
3.9.1. Ensayo de pelado. ....	48
3.9.2. Ensayo de tensión de cizalla. ....	48
3.9.3. Pruebas no destructivas de hermeticidad ....	48
Capítulo IV. ....	49
DISEÑO FACTORIAL $2^k$ ....	49
4.1. Definiciones y diseños $2^2$ ....	50
4.1.1. Efectos en el diseño $2^2$ ....	51
4.1.2. Valor “P” ....	54
4.1.3. Diagrama de Pareto. ....	55
4.2 Modelo de Superficie de Respuesta para un diseño $2^k$ . ....	56
Capítulo V. ....	59
DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....	59
5.1. Parámetros de soldadura. ....	60
5.2. Caracterización de los aceros. ....	62
5.2.1. Análisis químico cuantitativo mediante espectrometría de chispa. ....	62
5.2.2 Microscopia óptica. ....	63
5.2.3. Ensayos de microdureza vickers. ....	63
5.3. Ensayos de calidad de soldadura. ....	63
5.3.1. Medición de la Zona centro de fusión, zona afectada térmicamente y profundidad. ....	63
5.3.2. Ensayo de tensión. ....	64

5.3.2. Ensayos de microdureza. ....	64
5.3.3. Microscopia óptica. ....	65
5.4. Diseño factorial $2^2$ . ....	65
Capítulo VI. ....	66
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. ....	66
6.1. Caracterización de los aceros. ....	66
6.1.1. Análisis químico de los aceros. ....	66
6.1.2. Microscopia óptica. ....	66
6.1.3. Propiedades mecánicas de los aceros. ....	68
6.2. Ensayos de calidad de la soldadura. ....	68
6.2.1. Macrografías de la unión 22MnB5-22MnB5. ....	70
6.2.2. Micrografías de 22MnB5-22MnB5. ....	71
6.2.3. Medición de la zona transversal del cordón de soldadura 22MnB5- 22MnB5. ....	78
6.2.4. Microdureza de la soldadura 22MnB5-22MnB5. ....	80
6.2.5. Esfuerzo máximo 22MnB5-22MnB5. ....	82
6.2.6. Análisis de resultados soldadura disímil 22MnB5-1006. ....	86
6.2.7. Macrografías de la unión 22MnB5-1006. ....	86
6.2.8. Micrografías 22MnB5-1006. ....	87
6.2.9. Medición de la zona transversal del cordón de soldadura 22MnB5- 1006. ....	91
6.2.10. Microdureza 22MnB5-1006. ....	93

6.2.11. Esfuerzo máximo 22MnB5-1006.....	96
6.4. Modelo estadístico 22MnB5-22MnB5.....	98
6.4.1. Calidad de la zona transversal del cordón 22MnB5-22MnB5.....	99
6.4.2. Calidad de la Soldadura.....	105
6.5. Modelo estadístico 22MnB5-1006.....	109
6.5.1. Calidad de la zona transversal del cordón de soldadura.....	110
6.5.2. Calidad de la soldadura 22MnB5-1006.....	116
6.6. Predicción.....	121
Capítulo VII.....	123
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
7.1. Recomendaciones.....	124
Apéndice A.....	126
Diagramas TTT y CCT.....	126
A1. Diagrama TTT 22MnB5.....	126
A2. Diagrama CCT 22MnB5.....	126
A3. Diagrama TTT 1006.....	127
A4. Diagrama CCT 1006.....	127
Apéndice B.....	128
Macrografías.....	128
Apéndice C.....	129
Micrografías.....	129
C1.1 Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 1.....	130

C1.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 2. ....	131
C1.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 3. ....	132
C1.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 4. ....	133
C2.1. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 1. ....	134
C2.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 2. ....	135
C2.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 3. ....	136
C2.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 4. ....	137
C3.1. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 1. ....	138
C3.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 2. ....	139
C3.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 3. ....	140
C3.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 4. ....	141
C4.1. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 1. ....	142
C4.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 2. ....	143
C4.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 3. ....	144
C4.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 4. ....	145
C5.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 1. ....	146
C5.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 2. ....	147
C5.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 3. ....	148
C5.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 4. ....	149
C6.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 1. ....	150
C6.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 2. ....	151
C6.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 3. ....	152

C6.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 4. ....	153
C7.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 1. ....	154
C7.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 2. ....	155
C7.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 3. ....	156
C7.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 4. ....	157
C8.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 1. ....	158
C8.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 2. ....	159
C8.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 3. ....	160
C8.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 4. ....	161
Apéndice D .....	162
Modelo estadístico.....	162
D1.1. Modelo estadístico para el diámetro de la zona de fusión 22MnB5. ....	162
D1.2. Modelo estadístico para profundidad de la zona de fusión 22MnB5- 22MnB5.....	166
D1.3. Modelo estadístico para la zona afectada térmicamente 22MnB5-22MnB5. ....	169
D1.4. Modelo estadístico microdureza 22MnB5-22MnB5. ....	173
D1.5. Modelo estadístico Esfuerzo máximo 22MnB5-22MnB5.....	176
D2.1 Modelo estadístico para el diámetro de la zona de fusión 22MnB5-1006.....	179
D2.2. Modelo estadístico para la profundidad de la zona de fusión 22MnB5- 1006. ....	183
D2.3. Modelo estadístico para la zona afectada térmicamente 22MnB5-1006.....	186
D2.4. Modelo estadístico microdureza 22MnB5-1006.....	189

D2.5. Modelo estadístico esfuerzo máximo. ....	192
Apéndice E.....	196
Referencias.....	199
Índice de Imágenes. ....	205
Índice de tablas .....	213

## Resumen.

La calidad de soldadura por el proceso de resistencia continua dependerá de la composición química y espesor del acero, así como la correcta aplicación de los parámetros de soldadura. La composición química del acero determina la templabilidad, a mayores cantidades de carbono y de otros elementos de aleación mayor será su templabilidad y por lo tanto una soldabilidad menor.

La caracterización del metal base consistió en su análisis químico cuantitativo a través de espectrometría de chispa, análisis por microscopía óptica, ensayos de dureza. Se obtuvieron diversas muestras soldadas por el proceso de soldadura continua por resistencia eléctrica en aceros 22MnB5 y 1006, realizadas en la empresa. Se estudió la base de datos de parámetros de soldadura continua por resistencia empleados por la empresa, en particular la venta donde se ubicaron los parámetros empleados en la soldadura experimental.

Para evaluar la calidad de soldadura, se le realizó un perfil de microdureza, de la microestructura de las uniones soldadas se hizo medición de la zona transversal del cordón de soldadura, de la longitud de la zona centro de fusión, profundidad y el tamaño de la zona afectada térmicamente, así mismo se le realizaron ensayos de tensión de las uniones soldadas.

Los datos arrojados en la evaluación de calidad de soldadura fueron empleados para la elaboración de un modelo estadístico y encontrar los parámetros críticos que determinan la calidad de soldadura, finalmente se obtuvo la ecuación de regresión lineal que servirá para la predicción de los diferentes sistemas de respuestas utilizados en la calidad de soldadura.

Los resultados del modelo estadístico destacan que la presión de los electrodos, es un parámetro que influye directamente en la resistencia de la unión soldada, a mayor presión empleada mayor fue el esfuerzo máximo, en el rango de valores experimentales usados.



La caracterización del metal base, tal como el análisis químico permitió calcular el carbono equivalente, en el cual se observa que el acero 22MnB5 se encuentra por encima del 30 % C.E. indicando buena soldabilidad, siempre y cuando se tenga cuidado con las velocidades de enfriamiento, en cambio el acero 1006 es un perfecto candidato a ser soldado al encontrarse por debajo del 30 % C.E.

El diámetro de la zona de fusión de la unión 22MnB5-22MnB5 resultó cumplir el mínimo requerido por la norma AWS D8.1M La unión 22MnB5-1006 no cumplió con lo requerido por la norma AWS D8.1M, sin embargo, se pudo concluir que al utilizar presiones altas junto a corrientes bajas obtendremos una buena geometría.

# CAPÍTULO I

## EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE SOLDADURAS POR RESISTENCIA EN ACEROS AUTOMOTRICES AVANZADOS

### 1.1 Introducción.

La empresa Ternium México S. A. de C. V., donde cuenta con varias sucursales en diferentes partes de la República Mexicana, en particular la planta ubicada en el estado de Nuevo León en el domicilio Av. Universidad en San Nicolás de los Garza, donde sus actividades abarca desde el galvanizado de rollos de aceros en diferentes espesores y composiciones químicas, así como su distribución, para innovar nuevos materiales se han visto en la necesidad de soldar dos diferentes de aceros, con diferentes químicas y con diferentes espesores, esto lo llevan a cabo con un proceso de soldadura continua por resistencia eléctrica (RSEW) que posteriormente son llevados a un proceso de galvanizado.

### 1.2. Antecedentes.

La planta en Universidad se encarga del galvanizado de láminas de producto final que se utilizaran en la industria automotriz, para esto se sueldan dos tipos de aceros, 22MnB5 y 1006 con espesores de 1.1mm respectivamente, estos materiales se sueldan con un proceso de soldadura continua por resistencia o RSEW (Resistance Seam Welding), posteriormente se someten a un revenido para la liberación de esfuerzos y después de esto se somete a un galvanizado.

### 1.3. Motivación.

Debido a la diferente composición química que tiene los aceros a soldar esto no provee una adecuada unión soldada, lo que da como resultado la fractura, significando para la empresa una pérdida de tiempo y de material, traduciéndose como un gasto considerable en la modificación de los parámetros de soldadura con el fin de obtener

una adecuada unión soldada; además al llegar nuevos tipos de aceros y espesores no se tiene un adecuado modelo numérico, donde al variar la química y espesores dé los posibles parámetros de soldadura que aseguren una correcta unión soldada.

#### 1.4. Objetivos.

##### 1.4.1. Objetivo general.

Desarrollar, aplicar y evaluar un modelo estadístico para obtener los mejores parámetros de soldadura continua por resistencia en aceros avanzados automotrices y lograr la integridad del material durante el proceso de galvanizado.

##### 1.4.2. Objetivos particulares.

1. Caracterizar las uniones soldadas símiles y disímiles obtenidas por soldadura continua por resistencia eléctrica.
2. Evaluar la calidad de las soldaduras.
3. Elaboración de modelo estadístico para evaluar parámetros de soldadura continúa por resistencia.
4. Obtener los parámetros adecuados de soldadura continua por resistencia.

#### 1.5. Justificación.

Con este presente trabajo se pretende encontrar los mejores parámetros de soldadura, RSEW (Resistance Seam Welding) empleados en la unión de los aceros 22MnB5-22MnB5 y 22MnB5-1006, ya que, debido a la diferencia de su composición química, presenta fracturas en la zona centro de fusión y en mucho de los casos no presenta unión. De ahí la importancia del desarrollo de un modelo estadístico donde se estudie el efecto que causan los parámetros en las propiedades mecánicas de la unión soldada. Asimismo, el presente trabajo permitirá el estudio de la interacción de nuevos aceros, así como de aceros disímiles bajo este tipo de soldadura y profundizar los conocimientos teóricos que se tiene sobre el proceso de soldadura.

## 1.6. Hipótesis.

Obteniendo los parámetros de soldadura adecuados y una correcta aplicación de estos, se logrará obtener una mejor unión de soldadura, donde al momento de ser sometido al proceso de galvanizado no sufra fracturas entre los aceros involucrados, lo que significará una mejora del proceso, reduciendo la pérdida de material por fracturas abriendo la posibilidad de explorar la soldabilidad de nuevas aleaciones empleadas en la industria automotriz.

## CAPÍTULO II.

### CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS DE USO AUTOMOTRIZ

El acero se ha convertido en una parte integral de la vida en los países desarrollados industrialmente, lo cual resulta más evidente en la industria automotriz. Al crecer la industria automotriz crecen también las demandas y requerimientos para los productores de aceros, los cuales a su vez para lograr ser competitivos controlan muy estrechamente la calidad superficial, las tolerancias dimensionales y la uniformidad de las propiedades mecánicas de sus productos.

En 1975, Los vehículos contenían un promedio de 3.6% de aceros de media y alta resistencia para un contenido total de 61%, en su mayoría aceros de bajo contenido de carbono. En 1980, El acero libre de intersticiales fue desarrollado, inicialmente como material altamente deformable y usado extensivamente para aplicaciones de estampado, que requerían alta ductilidad y resistencia al adelgazamiento.

En 1970, el principal uso de los aceros de alta resistencia baja aleación fue en la industria de la construcción y en líneas de tuberías. A partir de 1990, se empezó a emplear en componentes automotrices debido a su resistencia, dureza, soldabilidad y bajo costo. Después del 2000, surgió una nueva generación de aceros de alta resistencia avanzados [1]. Los cuales se pueden clasificar en tres formas.

La primera es la designación metalúrgica, en la que se incluyen:

- Aceros de baja resistencia:
  - Libre de intersticiales (IF o Intersticial-Free).
  - Aceros de bajo carbono.
- Aceros de alta resistencia [2]:
  - Carbono-manganeso.

- Aceros endurecidos por envejecimiento/horneado (BH, Bake Hardenable) [1,3].
- Libre de intersticiales de alta resistencia.
- Aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA, High-Strength Low-Alloy steels).
- Aceros avanzados de alta resistencia:
  - Doble fase (DP, Dual Phase).
  - Plasticidad inducida por transformación (TRIP, Transformation-Induced Plasticity).
  - Fases complejas (CP, Complex Phase).
  - Aceros martensíticos (MS, Martensitic Steels).
  - Aceros de alta resistencia adicional:
    - Ferrítico-bainíticos (FB, Ferritic-Bainitic).
    - Plasticidad inducida por maclado (TWIP, Twinning-Induced Plasticity) [3].

Una segunda clasificación se basa en la resistencia del material [2], en la que se incluyen los aceros de alta resistencia (HSS, High-Strength Steels) y los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, Advanced High-Strength Steels) con una resistencia de cedencia de 210 a 550 MPa y un esfuerzo último de tensión de 270 a 700 MPa [2,4], mientras que los aceros de ultra alta resistencia (UHSS por su acrónimo Ultra-High-Strength Steels) tiene una resistencia de cedencia > 500 MPa y un esfuerzo último de tensión > 700 MPa [2].

Una tercera clasificación basada en propiedades mecánicas o parámetros de formado, tal como; elongación total, coeficiente de endurecimiento por deformación “n” [2] y la relación de expansión de boquete “λ” [1,4]. La Figura 2.1 muestra de color gris oscuro los aceros de baja resistencia, de color gris claro los aceros de alta resistencia convencionales y las elipses de colores corresponden a los aceros de alta resistencia avanzada. La Figura 2.2 muestra con colores los nuevos aceros de mayor

resistencia utilizados en la industria automotriz. Las Figuras 2.1 y 2.2 ilustran únicamente una comparación relativa de los diferentes tipos de aceros, no se especifican los rangos de propiedades de cada uno [2].

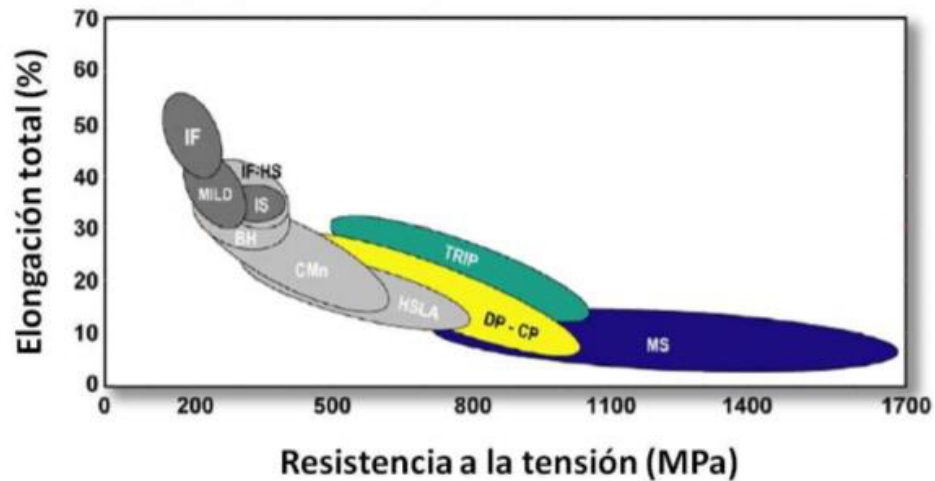


Figura 2. 1. Esquema de los aceros AHSS (se muestran en color) comparándolos con los aceros de baja resistencia (gris oscuro) y con los aceros HSS convencionales. (Gris claro) [2].

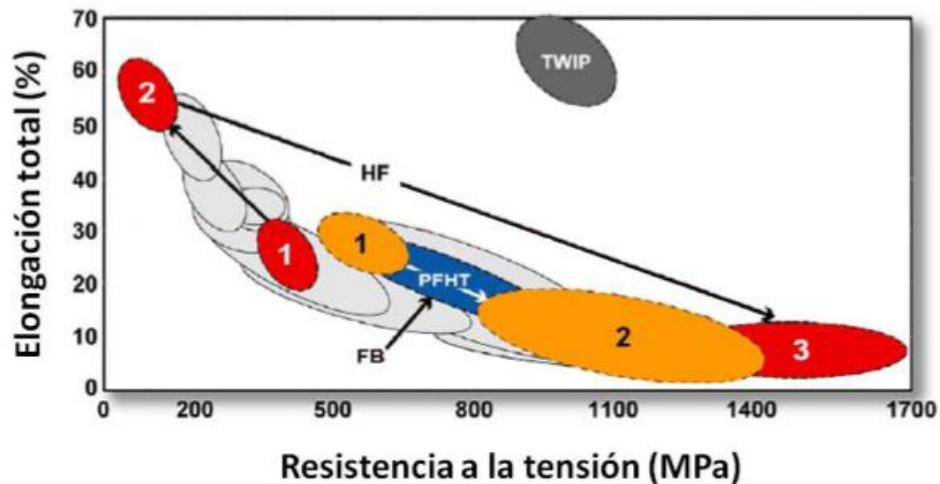


Figura 2. 2. Esquema de los nuevos aceros de mayor resistencia que utilizan una composición química, proceso y microestructuras únicas para obtener propiedades específicas y características de deformación [2].

La principal diferencia entre los aceros HSS convencionales y los AHSS es su microestructura. Los aceros HSS convencionales son de una sola fase, ferrita. Los aceros AHSS son principalmente, aceros que contienen una microestructura compleja, como i)

ferrita y perlita, ii) ferrita y martensita, iii) ferrita, austenita, martensita y bainita, en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas únicas. Algunos aceros del tipo AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento por deformación, resultando en un balance entre esfuerzo y ductilidad, superior a los aceros convencionales. Otros tienen un esfuerzo de cedencia y de tensión ultra alto y muestran un comportamiento de endurecido por envejecimiento.

La terminología para clasificar los aceros varía considerablemente a través del mundo. World Auto Steel usa una combinación de métodos para definir los aceros. Cada grado de acero es definido por espécimen metalúrgico, resistencia mínima de cedencia (MPa), y la resistencia mínima de tensión (MPa). Como ejemplo, DP 500/800, se significa un acero del tipo doble fase con una resistencia mínima de cedencia de 500 MPa y una resistencia mínima de tensión de 800 MPa [2].

## 2.1. Metalurgia de los aceros de alta resistencia avanzados (AHSS).

### 2.1.1. Aceros Doble Fase (DP).

Los aceros doble fase consisten de una matriz ferrítica que contiene una segunda fase martensita. Incrementando la fracción volumétrica de la segunda fase, generalmente aumenta la resistencia. Los aceros DP (ferrita más martensita) son producidos por el control de enfriamiento de la fase austenítica (en productos laminados en caliente) o de las dos fases, ferrita más austenita (recocido en productos laminado en frío y recubiertos por inmersión en caliente) transformando algo de austenita a ferrita mucho antes del enfriamiento rápido que transforma la austenita retenida a martensita [1].

La Figura 2.3 muestra la microestructura de un acero DP, el cual contiene ferrita más islas de martensita. La fase suave, ferrita es generalmente continua, dándole a estos aceros excelente ductilidad. Cuando estos aceros se deforman, la deformación es



concentrada en la fase ferrita (menor resistencia) circundante a las islas de martensita, creado una alta velocidad de endurecimiento por deformación [1].

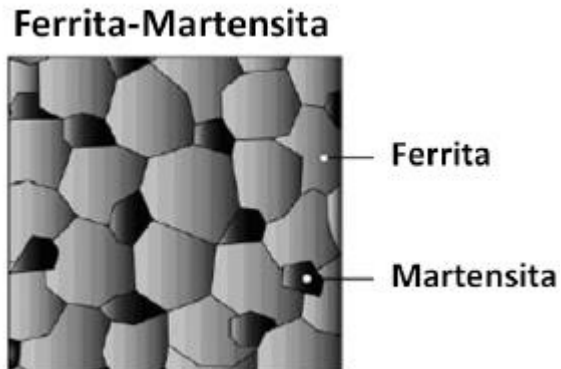


Figura 2. 3. Muestra las islas de martensita en una matriz de ferrita [1].

#### 2.1.2. Aceros con plasticidad inducida por transformación (TRIP).

La microestructura de los aceros TRIP consiste de austenita retenida en un mínimo de 5%, integrada a una matriz ferrítica. Una fase dura de martensita y bainita están presente en cantidades variables. Los aceros TRIP requieren de una temperatura constante para obtener una transformación isotérmica y alcanzar algo de bainita. Los altos contenidos de silicio y carbono en los aceros TRIP producen fracciones volumétricas importantes de austenita retenida en la microestructura final. La Figura 2.4 muestra la microestructura de un acero TRIP [1].

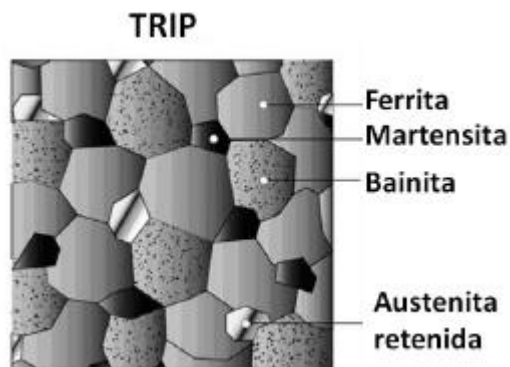


Figura 2. 4. Bainita y austenita retenida son fases adicionales en los aceros TRIP [1].

### 2.1.3. Aceros de fases complejas (CP).

La microestructura de los aceros CP consiste de una matriz ferrita/vainita, con pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita. Un refinamiento extremo de grano es creado por precipitación de los elementos microaleantes TI y NB. Los aceros CP se caracterizan por su alta absorción de energía y su alta capacidad de deformación residual [1].

### 2.1.4. Aceros Martensíticos (MS).

En los aceros martensíticos, la austenita presente durante la laminación en caliente o el recocido es transformada casi por completa a martensita durante el templeado o en la línea de enfriamiento de recocido. Como medio para incrementar el endurecimiento y para reforzar a la martensita se agrega C.

El resultado de un acero martensítico es que provee una alta resistencia última a la tensión (aproximadamente 1700mMPa), pero con baja deformación. Para mejorar su ductilidad y fiabilidad se les aplica un revenido después del templeado [1].

### 2.1.5. Aceros Ferríticos-Bainíticos (FB):

La microestructura de los aceros FB consiste de ferrita fina y vainita. Su resistencia es obtenida por el refinamiento de grano y por segunda estructura bainita. Los aceros FB están disponibles en productos laminados en caliente [1].

### 2.1.6. Aceros con plasticidad inducida por maclado (TWIP).

Los aceros TWIP tienen un alto contenido de manganeso (17-24%), producen un acero totalmente austenítico a temperatura ambiente. Esto hace que el principal modo de deformación sea el maclaje dentro de los granos austeníticos, produciendo mayor valor en el coeficiente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) debido a que la microestructura se va convirtiendo cada vez más fina. Los límites resultantes de las maclas que actúan igual que límites de granos, incrementan la resistencia del acero. Los

aceros TWIP combinan una altísima resistencia con una ultra elongación. El valor  $n$  incrementa a un valor de 0.4 de una deformación ingenieril aproximadamente de un 30 % y permanece constante hasta que alcanza un 50% en la elongación total. La resistencia a la tensión es mayor a los 1000 MPa.

## 2.2. Metalurgia de los aceros de baja y alta resistencia convencionales (HSS).

### 2.2.1. Aceros de bajo contenido de carbono.

Los aceros de bajo contenido de carbono tienen una microestructura esencial de ferrita lo que nos aporta una buena formabilidad del acero para su amplio uso en la industria automotriz; por lo que puede ser utilizado para casi cualquier parte del automóvil, siempre y cuando teniendo en cuenta su bajo esfuerzo a la cedencia. Debido a su bajo contenido de carbón tiene una buena soldabilidad. Los aceros de bajo contenido de carbono se producen en cuatro cualidades principalmente para la aplicación automotriz. Las cualidades enumeradas a continuación están organizadas por capacidad de deformación de menor a mayor según sea el caso [1,41].

*Acero comercial:* (CS) Es un acero de bajo carbono utilizado en varios componentes automotrices, donde se requiere un doblado simple o moderado. Es susceptible al envejecimiento, lo que puede causar problemas tales como bandas de Lüders, estrías, fracturas superficiales (en espesores altos) la pérdida de ductilidad y una mayor dureza. Por su bajo contenido de carbón es un buen candidato a la soldadura. [1].

*Calidad de estirado:* (DQ por su acrónimo Drawing Quality) tiene un mayor grado de ductilidad y es más consistente en el desempeño automotriz debido a estándares más altos en la producción, selección y de fusión del acero. La ductilidad mejorada y uniformidad de las propiedades proporciona un mejor rendimiento durante la fabricación.

*Acero de embutido profunda* (DDS por su acrónimo DDS deep-drawing Steel) como un tipo de acero de bajo carbono para cumplir con una mejor capacidad de

estiramiento. La combinación de bajos contenido carbono y manganeso junto a bajas cantidades de elementos residuales hacen que su estructura provee una buena formabilidad. Este acero es un buen candidato a ser galvanizado.

*Acero de extra embutido profunda* (EDDS por su acrónimo Extra Deep-Drawing Steel) se produce a partir de acero desgasificado al vacío para conseguir un contenido muy bajo en carbono. Se estabiliza químicamente con elementos tales como el titanio y el niobio (columbio) durante la producción de se combinan cantidades pequeñas de carbono y nitrógeno para que sea libre de intersticiales. Excelente uniformidad y excepcional capacidad de conformado recubiertos y sin recubrimiento. El producto final es excelente para piezas de embutida profunda en que la lámina presenta una alta resistencia al adelgazamiento durante el estirado [41].

*Aceros calmados al aluminio con calidad de estirado* (AKDQ por su acrónimo aluminium killed drawing quality) es aquel que ha sido desoxidado por completo previamente a la colada, por medio de la adición de manganeso, silicio o aluminio antes de la colada. Mediante este procedimiento se consiguen piezas con mejor calidad pues no produce gases durante la solidificación, evitando las sopladuras. [1, 42].

#### 2.2.2. Aceros endurecidos por envejecimiento (BH).

Los aceros BH tienen una microestructura básica ferrita y un endurecimiento por solución sólida. La única característica de estos aceros es la química y proceso diseñado para mantener el carbón y nitrógeno en solución durante la fabricación del acero e interacciones o dislocaciones durante el horneado de la pintura. Esto incrementa la resistencia de cedencia de la parte deformada y aumenta la resistencia a la abolladura [1].

#### 2.2.3. Aceros al carbono-manganeso (CM).

El contenido de manganeso en aceros al carbono se ha aumentado con el propósito de incrementar la dureza y mejora la resistencia y la tenacidad. Los aceros al

carbono que contienen 1.2% a 1.8% aproximadamente de manganeso como aceros al carbono-manganeso [43]. Los aceros CM de alta resistencia utilizan endurecimiento por solución sólida [1].

#### 2.2.3. Aceros dulces (Mild Steel).

Este término, es puramente comercial ya que se usan indistintamente para describir los aceros estándar que se utilizan con fines estructurales.

El término de acero dulce se aplica comercialmente a los aceros de bajo carbono que no cubren especificaciones estándares. El contenido de carbono de este acero puede variar de niveles bastantes bajos hasta aproximadamente 0.3%. Estos tipos de aceros son altamente soldables y tienen propiedades de flexión en frío, el término de acero dulce es técnicamente inapropiado y no se debe utilizar como un término ingenieril [43].

#### 2.2.4. Aceros libres de intersticiales (IF).

El grupo mayor de aceros formables para la industria automotriz es el acero libre de intersticiales. Estos aceros fueron desarrollados a partir de los aceros de bajo carbono calmados al aluminio con calidad de estirado.

Debido a su contenido ultra bajo carbono [1] y la adición de titanio y niobio como elementos microaleantes, los aceros IF no tienen átomos intersticiales como carbono, hidrogeno, nitrógeno o boro en la red cristalina [5].

#### 2.3. Aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA).

Actualmente, existe un interés importante en el desarrollo y uso de los aceros HSLA en aplicaciones automotrices con el objetivo de disminuir el peso en las unidades automotrices. En los últimos 30 años, los aceros HSLA, aceros de bajo contenido de carbono microaleados con niobio, titanio y vanadio, se han utilizado ampliamente en el sector automotriz y en aplicaciones de tubería. La alta resistencia de estos aceros la

obtienen a partir de una combinación de mecanismos que incluye: solución sólida, tamaño de grano, dislocación y endurecimiento por precipitación.

Los aceros HSLA tienen una resistencia de cedencia mínima de 550 MPa y suelen ser microaleados en una combinación de titanio y niobio. Los niveles de titanio son lo suficientemente altos para suprimir el nitrógeno en solución sólida por la formación de nitruro de titanio, el exceso de titanio es disponible para incrementar el endurecimiento por precipitación de finos carburos, formados por los elementos microaleados. La adición de niobio juega un papel crítico en el retraso de recristalización durante la laminación, por consiguiente, se forma una microestructura austenítica, lo que contribuye en un refinamiento de grano de ferrita, durante la transformación subsecuente de austenita a ferrita. Aceros aleados con manganeso, típicamente con 1.5% en peso, retarda la descomposición de la austenita durante el enfriamiento acelerado en la salida del rodillo de laminación en caliente a temperaturas de transformación suficientemente baja de tal manera que se forma una microestructura de ferrita poligonal [7].

### 2.3.1. Elementos microaleantes niobio, vanadio, titanio, zirconio y boro.

El niobio es comúnmente usado para mejorar la resistencia y la tenacidad a baja temperatura en aceros procesados termomecánicamente, por la inhibición de la recristalización de la austenita [38,39], por lo tanto, aumenta el refinado del grano [39]. El rango mínimo del tamaño de ferrita es de 3 a 5  $\mu\text{m}$  [38].

La deformación dentro del rango de temperatura más baja de austenita conduce a precipitación inducida por deformación de carburos de niobio finamente distribuidos, los cuales causan una retardación de recristalización. La Figura 2.5 muestra el efecto de retardación del niobio en la recristalización, la cual aumenta considerablemente con la deformación de la austenita toma lugar sin recristalización anterior. El efecto causado por la laminación termomecánica, es la base para el refinamiento del grano ferrítico.

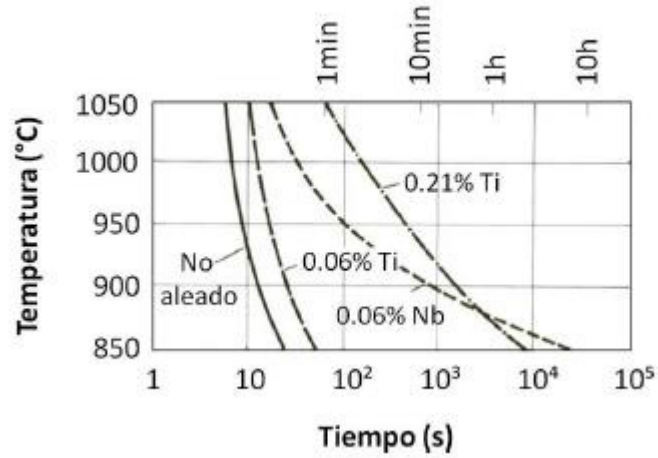


Figura 2. 5. Retraso de recristalización por el Nb o Ti [8].

Con una concentración estequiométrica de carbono y niobio, se puede producir láminas rodadas en frío con las características de un acero libre de intersticiales, debido a la gran afinidad del niobio con el carbono [8]

Entre los elementos microaleantes, el titanio puede ser denominado, como un elemento de aleación de múltiples propósitos. El gran número de funciones de rendimiento del titanio en el acero se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Ti elemento microaleante con múltiples usos [8].

Estado de Ti	Efecto en la estructura/propiedades
$[Ti]_{\gamma}$ , disuelto en $\gamma$	→ Retarda la transformación $\gamma/\alpha$
Ti como TiN	→ Refinamiento de grano en $\gamma$
Ti como $TiC^{\epsilon}$	→ Retardo de recristalización
Ti como TiC en $\alpha$	→ Endurecido por precipitado
Ti como TiN, TiC	→ Ferrita libre de intersticiales
Ti como $Ti_4C_2S_2$	→ Control de forma del sulfuro

Cuando se disuelve en la austenita, provoca un retardo sustancial de la transformación austenítica. Porcentajes menores de titanio son suficientes para unirse al nitrógeno en el acero y garantizar resistencia al envejecimiento. En caso de un ajuste estequiométrico de las concentraciones, los nitruros de titanio son finamente dispersados y capaces de reducir el tamaño de grano de la austenita. En rangos bajos de temperatura de austenización, los precipitados de carburos inducidos por deformación, similar a los carburos de niobio, causan una retardación de recristalización. La capacidad del titanio de unirse al carbono y al nitrógeno puede usarse para hacer aceros libres de intersticiales. Finalmente, debido a su afinidad con el sulfuro, el titanio es capaz de formar carburos de sulfuro.

Un acero de bajo contenido de carbono laminado en caliente es usado como ejemplo para mostrar el efecto multifacético del titanio. Conforme se incrementa el porcentaje de aleación, el titanio toma las funciones mencionadas anteriormente. Ver Figura 2.6.



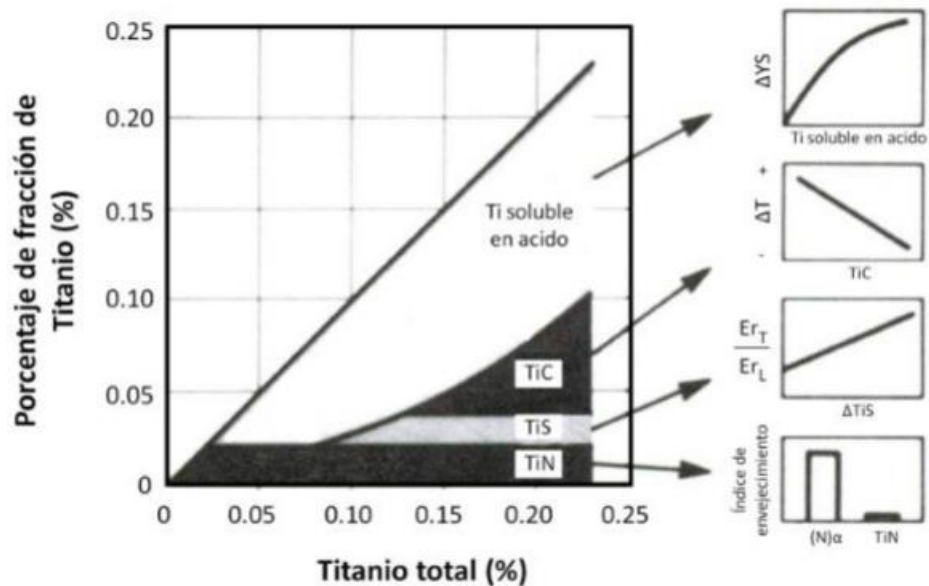


Figura 2. 6. Distintos efectos del titanio en un acero de bajo contenido de carbono laminado en caliente. Donde  $E_r$  es energía de impacto, T es dirección transversal y L es dirección longitudinal [8].

La unión del titanio con el nitrógeno, significa una disminución del índice de envejecimiento a cero. La unión de sulfuro causa la disminución de tenacidad anisotrópica y un incremento en la relación transversal y longitudinal de la energía de impacto Charpy. La deformación inducida por los carburos de titanio logra una mejora definitiva en la temperatura de transición correspondiente al refinamiento de grano sobre la austenita. Finalmente, el porcentaje de titanio que es soluble en ácido representa el potencial para un mayor endurecimiento por precipitación en la ferrita.

A diferencia del niobio y el titanio, el vanadio presenta una mejor solubilidad en el acero. Durante un tratamiento termomecánico, la sobresaturación relativamente bajo vanadio en rangos bajos de temperatura de austenización se refleja en un efecto débil en la recristalización. Ver Figura 2.7, marca con relieves la diferencia entre los tres elementos microalentes (Nv, Ti, V), conforme se aumenta el contenido de elementos microalentes, el rango de temperatura en el cual no hay recristalización, la recristalización puede ocurrir en cualquier tiempo si se eleva la relación de niobio, en caso del titanio se requiere un mayor porcentaje y el vanadio no tiene mayor efecto en

la recristalización, pero los aceros el vanadio presenta la ventaja de no causar un incremento en la fuerza de laminación durante el laminado en caliente.

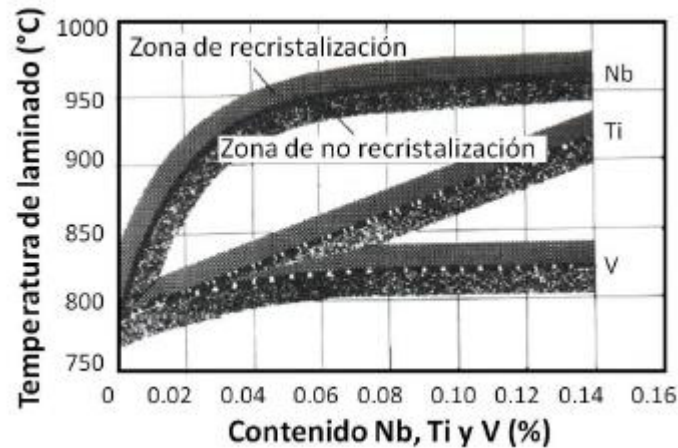


Figura 2. 7. Efecto del Nb, Ti y V sobre la temperatura crítica de recristalización de la austenita (contenido de carbono 0.15%) [8].

El Zirconio como elemento microaleante es caracterizado por su alta afinidad, particularmente con el nitrógeno y sulfuro. Nitruros de zirconio son formados antes o durante la solidificación del acero.

Los aceros deben su estructura de granos finos al efecto de nitruro de aluminio o nitruros de vanadio, pero son incompatibles con el zirconio debido a que los nitruros que refinan el grano pueden ser formados y el acero tiende a formar una estructura de grano grueso. Sin embargo, el zirconio no es considerado un elemento microaleante.

Los carbosulfuros de zirconio ( $Zr_4C_2S_2$ ) son relativamente duros a temperaturas de laminado en caliente, el zirconio es un elemento adecuado para el control de forma de sulfuro. Los precipitados de carbono se forman hasta que las fases de nitruros están completas. El zirconio tiende a unirse con el nitrógeno y el azufre, también puede combinarse con otros elementos microaleantes, que sean capaces de satisfacer los requerimientos, tales como retardo de recristalización, endurecimiento por precipitados. Además, se le puede dar uso al zirconio como un socio eficaz para el boro, el niobio, o el titanio.

El boro tiende a formar nitruros, pero su comportamiento de difusión y segregación es completamente diferente, porque su radio atómico es 24% menor al del hierro. Naturalmente, el efecto del boro depende decisivamente sobre sus condiciones, si está o no disuelto en la matriz o unido con el nitrógeno. La Tabla 2.2 muestra el rendimiento de la función más importante del boro como elemento microaleante. Si el boro actúa en su condición libre, debe ser preservado de la formación de nitruros con ciertos elementos tales como titanio o zirconio los que se unen con el nitrógeno en una etapa anterior. El boro tiene una fuerte tendencia a la segregación en los límites de granos. En la austenita, conduce a un retardo sumamente efectivo a la transformación de la austenita en concentraciones no mayores de 0.001% para una proporción de un átomo de aleación a 20,000 átomos de hierro, este es el más eficaz de todos los efectos de aleación.

Tabla 2. 2. Características del boro como elemento microaleante [8].

Estado de B	Efecto en la estructura/propiedades
[B] <sub>γ</sub> , segregación en los límites de granos – γ	→ Retardo efectivo de transformación de γ/α
B como BN	→ Vinculado en el recocido continuo en láminas de acero
[B] <sub>α</sub> , segregación de los límites de granos – α	→ Prevención de fractura intergranular en aceros libres de intersticiales

La formación de nitruros de boro es usada en aceros laminados en frío. La Figura 2.8, muestra las propiedades mecánicas de un acero de bajo contenido de carbono laminado en frío y la recrystalización del acero que puede ser obtenida con una concentración estequiométrica. El nitrógeno libre y el boro en exceso afectan adversamente a las propiedades mecánicas.

Es un hecho bien conocido que los aceros libres de intersticiales, son susceptibles a una fractura intergranular, subsecuente al alto grado de deformación, debido a la pureza de los límites de grano de la ferrita. Este efecto indeseable puede ser remediado por la capacidad del boro de producir una pronunciada segregación en los límites de grano.

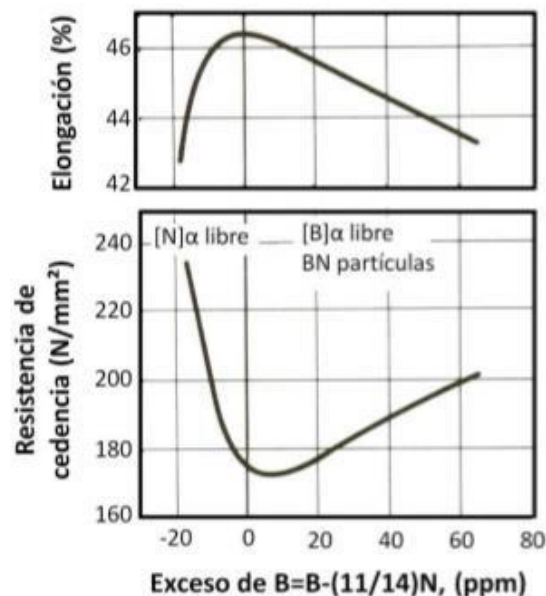


Figura 2. 8. Relación entre el exceso de boro y el efecto de las propiedades mecánicas [8].

### 2.3. Laminación en frío de aceros.

El laminado en frío es usado para producir láminas y cintas con una superior superficie de terminado y con tolerancias en dimensiones. Además, el endurecimiento por deformación resultante del endurecimiento en frío podría ser usado para dar un aumento en la resistencia. El proceso consiste en la reducción en espesor del material laminado en caliente y que antes de entrar al molino frío, pasa por una línea de decapado con ácido clorhídrico con finalidad de eliminar la capa de óxido superficial resultado del trabajo en caliente. El material que entra al molino en frío tiene una temperatura menor a la temperatura de recrystalización (aproximadamente  $0.6 T_m$ ) lo

cual es la principal diferencia con la laminación en caliente que involucra llegar a la temperatura de recristalización.

No es posible fabricar material trabajado en caliente a un tamaño exacto, debido a los cambios dimensionales que tiene lugar durante el enfriamiento. Por otro lado, el material trabajado en frío puede mantenerse estrechas tolerancias; está libre de óxidos superficiales, pero requiere de más potencia para deformarse; por lo tanto, es más costoso producirlo (46).

La reducción total lograda por la laminación en frío generalmente varía cerca del 50% a 90%. Al establecer la reducción en cada paso, es deseable distribuir el trabajo tan uniformemente como sea posible sobre los varios pasos sin caer debajo de la máxima reducción en cada paso.

Generalmente, el porcentaje más bajo de reducción es tomado en el último paso para permitir mejor control de aplanamiento, deformación y acabado superficial. Un procedimiento racional para desarrollar programas de trabajo en frío es ajustar la reducción en cada paso para producir una constante carga de rolado [47].

#### 2.4. Procesos termomecánicos.

El objetivo principal de un proceso termomecánico, es lograr una microestructura de austenita predominante antes de la transformación, para asegurar una microestructura de ferrita fina. El refinamiento del grano de austenita en un proceso termomecánico, se obtiene controlando la recristalización y el engrosamiento de grano subsecuente de la programación de múltiples pasos de laminación.

Tanaka [48] muestra que un proceso termomecánico consiste de un control de proceso de laminado seguido de un enfriamiento acelerado interrumpido. El propósito principal del proceso de laminado es producir deformación en los granos de austenita para incrementar la densidad de sitios de

nucleación de la ferrita, mientras que el enfriamiento acelerado interrumpido, mejora la velocidad de nucleación de la ferrita.

En base a una deformación relativa que ocurre a temperaturas críticas del material y a las condiciones de austenita, el control de laminado puede ser dividido en tres tipos:

- a) Control de laminado de recristalización.
- b) Control de laminado convencional.
- c) Control de laminado intensificado.

En general, la deformación a temperaturas altas, por arriba de la temperatura de inicio de la recristalización, a un 95% de la temperatura de recristalización completa (dependiendo de cada material), es representativa de un proceso de control de laminado de recristalización, mientras que en un proceso de control de laminado convencional implica deformaciones a temperatura baja, por debajo de la temperatura del paro de recristalización  $T_{RXN}$  o a un 5% de la temperatura de recristalización completa, la microestructura de la austenita, cambia en función de la temperatura de deformación y la deformación, ver la Figura 2.9.

Control de laminación de recristalización es un proceso de deformación a temperaturas altas, que consiste de una rápida recristalización, seguido por una inhibición de grano grueso, como se muestra en la Figura 1.14. En este proceso, la magnitud de la fuerza de anclaje,  $F_{Anclaje}$ , de los precipitados de los elementos microaleantes debe ser lo suficiente grande para suprimir el engrosamiento de grano. En este caso, los granos originales equiaxiales de austenita son remplazos por un nuevo grupo de granos pequeños recristalizados durante cada paso. El valor de maximización de la densidad de los sitios efectivos de nucleación de ferrita por unidad de volumen  $S_v$ , aumenta como resultado de un incremento en el área de límites de granos por unidad de volumen, el cual es causado por una disminución en el promedio del volumen de grano, como se muestra en la Figura 2.9.

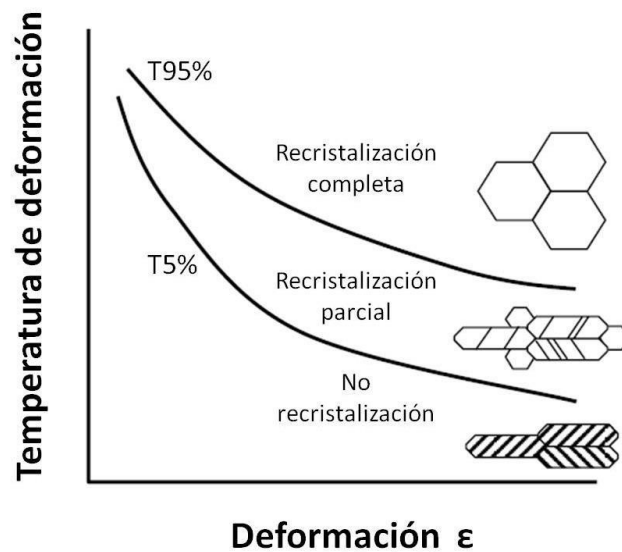


Figura 2. 9. Ilustración esquemática de la microestructura de austenita resultado de distintas condiciones de deformación.

Cuddy [49] y Sekine [50] muestran la limitación del refinamiento de grano en un proceso de control de laminación de recristalización. Se requiere de arreglos adicionales en el proceso para incrementar los sitios de nucleación de la ferrita. El proceso de control de laminación convencional implica el aplanamiento de los granos de austenita y la formación de defectos intergranulares planares, tales como maclas y bandas de deslizamiento, como resultado de una deformación repetitiva en regiones de no recristalización por debajo de 5% de la temperatura de recristalización completa. En este caso, el valor de  $S_v$  aumenta como resultado del incremento del área de límites de granos por unidad de volumen que surge de un cambio en la forma de grano y a través de la adición de los defectos intergranulares planares, como se muestra en la Figura 2.10 [48].

Por otro lado, la deformación que toma lugar en la región de dos fases austenita-ferrita es clasificada como proceso de control de laminado intensificado. La diferencia en la programación de deformación entre estos dos procesos se muestra en la Figura 2.11 [48].

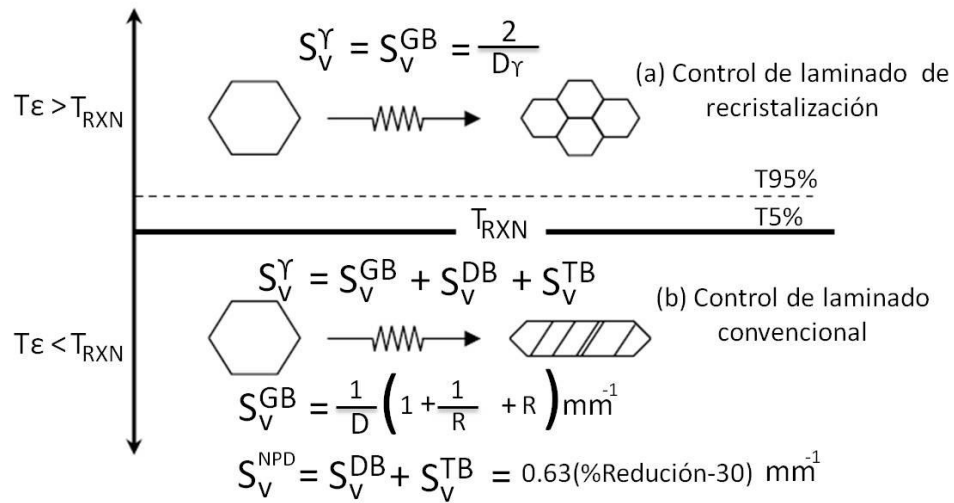


Figura 2. 10. Representación esquemática de la microestructura austenítica, cuando la deformación es por abajo y por arriba de la temperatura de paro de recrystalización  $T_{RXN}$ , de austenita. Nota GB, DB, TB Y NPD denotan la contribución total  $S_v$  de los límites de grano, bandas de deslizamiento y maclaje. Por otra parte, D es la longitud del borde al cuadrado y R es la proporción de reducción de laminado [48].

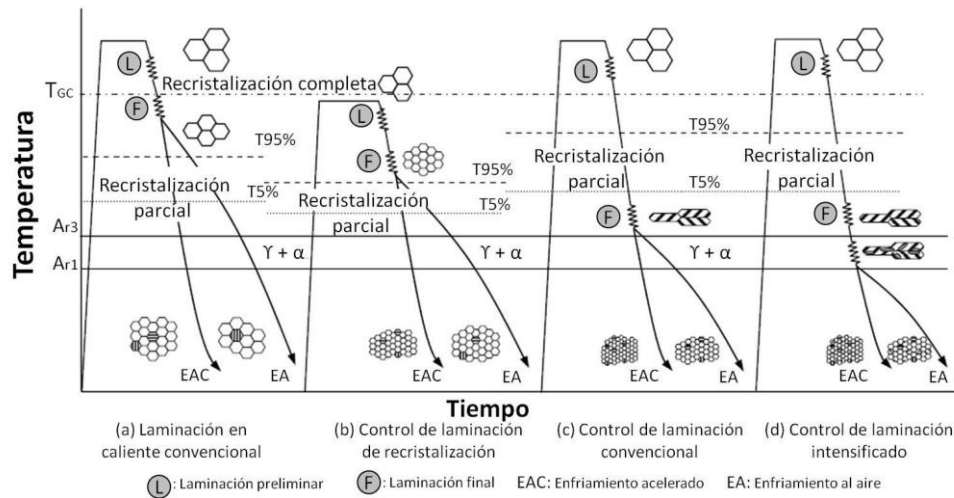


Figura 2. 11. Ilustración esquemática del proceso de laminado. Nota T<sub>6c</sub> es la temperatura de engrosamiento de grano [15].



## CAPÍTULO III.

### PRINCIPIO DEL PROCESO DE SOLDADURA CONTINUA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA.

La soldadura consiste en la unión de dos o más metales mediante la aplicación de calor y algunas veces de presión.

La soldadura por resistencia abarca una rama de soldadura donde el calor generado para que se produzca la unión viene determinada por la resistencia que se opone de una corriente eléctrica de elevada intensidad. Esta resistencia dependerá de la configuración de la unión soldada y de la conductividad eléctrica de los materiales. Además de requerirse el paso de una corriente eléctrica, es necesario aplicar una presión durante y después del paso de la corriente [23].

La soldadura continua por resistencia es muy parecida a la soldadura por puntos, pero esta produce una soldadura continua mediante el uso de rodillos como electrodos. El proceso de soldadura continua por resistencia es complicado por la interrelación de sus cuatro variables principales, presión de electrodo, el tiempo de permanencia de la corriente, la corriente de soldadura y la velocidad de soldadura o avance [24,25].

#### 3.1. Soldadura continua por resistencia.

La soldadura continua consiste en la unión de dos o más materiales traslapados, usando como electrodos la rotación de dos rodillos, se puede dividir en dos tipos, llamadas soldadura continua y soldadura por puntos rolados, donde la diferencia más relevante es el tiempo de permanencia de la presión ejercida por los rodillos, el mismo equipo de soldadura puede producir estos dos tipos de soldadura [25].

Las dos laminas a soldar se colocan en la maquina donde se encuentran los rodillos, la superior es la que baja y ejerce la presión sobre los materiales a soldar. Como

los rodillos giran, provocan el desplazamiento de las chapas. En este momento se hace pasar la corriente eléctrica de forma interna, con lo que se produce la fusión y la unión de los materiales. Algunas aplicaciones típicas de este procedimiento de soldadura son el depósito de combustible, latas y radiadores [24,26].

### 3.2. Fundamentos de soldadura de resistencia continúa.

El calor necesario para crear la fusión en RSEW es generada por la aplicación de una corriente eléctrica a través de las láminas traslapadas como se muestra en la Figura 3.1. La generación de calor en un circuito eléctrico es:

$$Q = I^2 R t \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde Q es el calor (Watt- Segundos o Joules), I es la corriente (Ampere), R es la resistencia eléctrica (ohm  $\Omega$ ) y t es el tiempo de la corriente (segundos) es evidente que la magnitud de la generación de calor puede ser variada por cambios en cualquier de los tres factores de la Ecuación 3.1. Sin embargo, una pequeña parte modificación de I resulta en un cambio significativo en la generación de calor. La I y t se puede variar para ajustar los parámetros de soldadura, mientras que R depende de la resistencia interna de los materiales a soldar. Hay dos tipos de resistencia eléctrica presentes en el circuito secundario de la máquina soldadora de RSEW. Una es la resistencia interna de los materiales más la resistencia de contacto de las interfaces. La resistencia interna está en función de la composición del material y varía con la temperatura, la resistencia real se denomina como la resistencia efectiva y es directamente proporcional a la longitud del conductor y casi inversamente proporcional al área seccional. Por otro lado, la resistencia de contacto es relacionada con la resistividad eléctrica interna del material y sus propiedades mecánicas, tales como, la topografía de contacto superficial, las propiedades de recubrimiento y los contaminantes que puedan estar presentes en la superficie [23, 26]

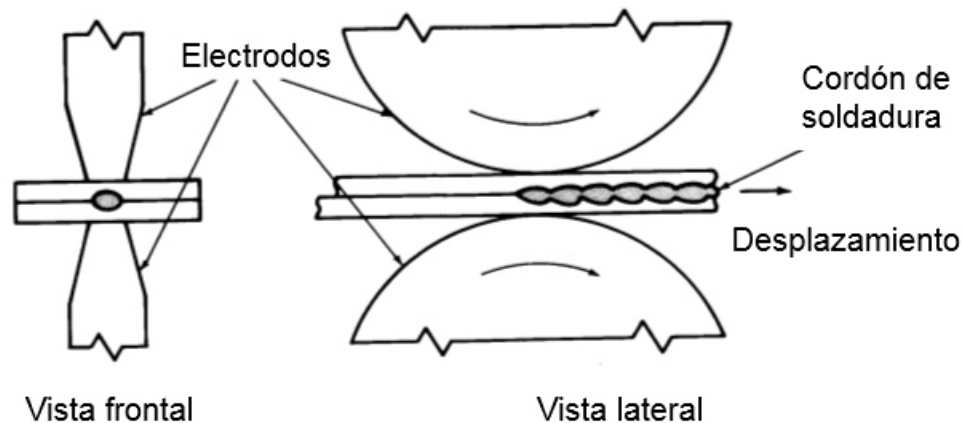


Figura 3. 1. Generación de calor en RSEW [51].

### 3.3. Aplicaciones.

Las aplicaciones de este tipo de soldadura son muy variadas dependiendo principalmente del tipo de su preparación y juntas, entre las que destacan.

#### 3.3.1. Soldadura continua a traslape.

Un conjunto en el que las piezas de trabajo se traslapan suficientemente para evitar que los bordes de las láminas sean soldadas clasifica como una soldadura continua de traslape este tipo soldadura son populares en aplicaciones de automóviles tales como tanques de combustible, convertidores catalíticos, silenciadores, y las articulaciones del techo, así como en aplicaciones no automotrices, tales como intercambiadores de calor de hornos, tanques de agua, y ciertos tipos de lata con este tipo de soldadura se puede aplicar a espesores diferentes.

#### 3.3.2. Soldaduras continuas Mash.

Son producidos por el traslape de dos hojas por una cantidad que oscila entre uno y dos veces el espesor de la lámina donde se le aplica la presión del electrodo y una corriente.

Las aplicaciones típicas incluyen tambores, cubetas, camisas de vacío, latas de aerosol, tanques de agua, y la unión de rollos de acero. Hojas de espesores y / o

revestimientos disímiles han sido exitosamente soldados por este medio. Este desarrollo ha creado un nuevo conjunto de aplicaciones en la industria automotriz.

### 3.3.3. Soldadura continua a tope.

Un conjunto en el que se sueldan dos bordes a tope se clasifica como soldadura continua a tope. El espesor de la soldadura debe ser aproximadamente la misma, o ligeramente menor que el espesor de la lámina. Soldadura continua a tope es típicamente reservado para las aplicaciones en las que no se pueden utilizar otros procesos de soldadura a tope (por ejemplo, para la soldadura del tubo y de láminas en vagones de ferrocarril) [25].

## 3.4. Parámetros de soldadura.

### 3.4.1. Corriente de soldadura.

Es importante señalar que la actual gama de soldadura continua se amplía por el uso prudente de la corriente impulsada para formar diferentes tipos de cordones. Impulso de 25 a 33% de frecuencias se utilizan comúnmente. Los impulsos contienen tiempos muertos o pulsaciones para los electrodos, para que de esta forma se pueda extraer el calor de la superficie de la soldadura. Otro y probablemente el efecto más importante de utilizar impulsos es la reducción del calentamiento requerido para que se dé la soldadura. [52]. Por lo tanto, la aparición de discontinuidades en la superficie se reduce. Los puntos calientes son lugares dentro de la soldadura, donde los picos térmicos pueden estar ocurriendo ya sea debido a una relativa alta resistencia local, una densidad de corriente no uniforme o materiales y espesores disímiles [25].

### 3.4.2. Velocidad de soldadura.

A medida que se aumenta la velocidad de soldadura, un enfriamiento más eficaz se produce tanto en el electrodo como en el material dando así el utilizar una corriente más elevada. La penetración de la soldadura cae rápidamente. Además, se reduce la cantidad de superposición en la unión y las propiedades mecánicas se ven

comprometidas. Esto requiere un aumento de la corriente en el intento de mantener el tamaño del cordón de soldadura deseable y mantener las propiedades mecánicas conjuntas. Las corrientes más altas dan como resultado un calentamiento más severo del electrodo y de la lámina, donde puede llegar al punto de fusión el electrodo. Por lo que se debe tener cuidado en la elección de estos parámetros para obtener las propiedades deseables. En la Figura 3.2 se muestra el comportamiento de la velocidad de soldadura usando dos corrientes, 23.75 KA y 25.2KA y como estas afectan al porcentaje de penetración del botón de soldadura [51].

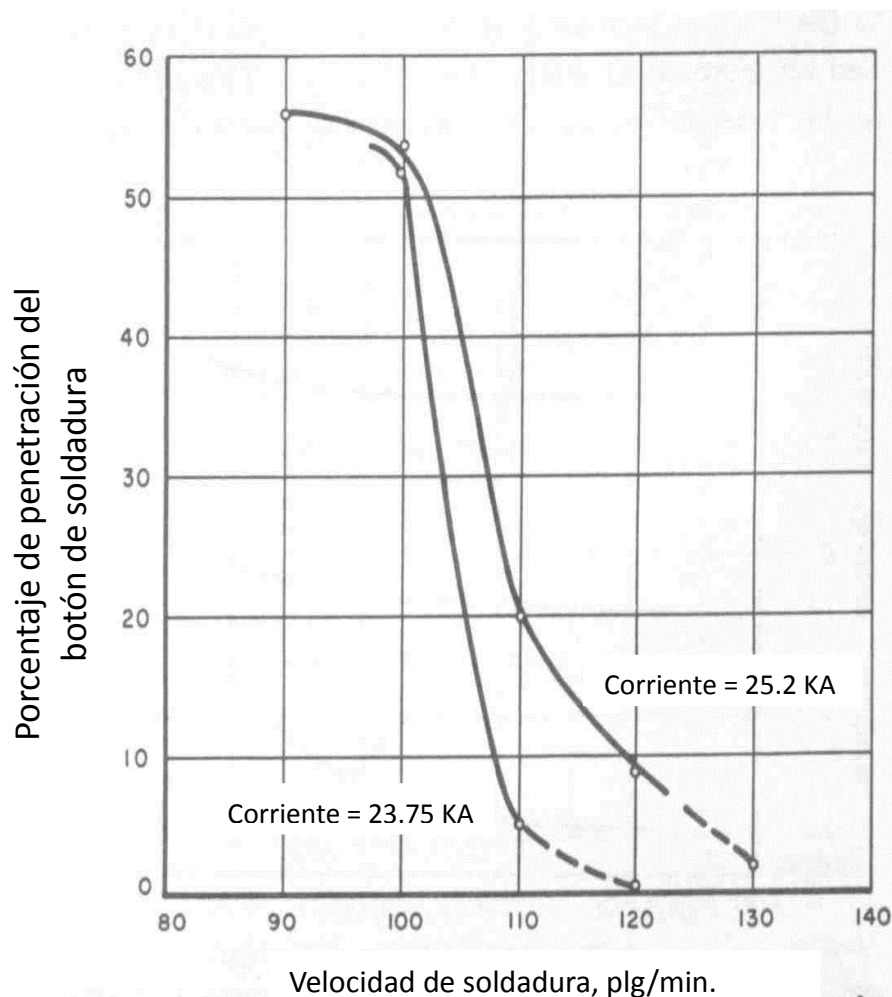


Figura 3. 2. Ilustración esquemática de la relación entre velocidad de soldadura y el porcentaje de penetración utilizando dos corrientes [51].

### 3.4.3. Fuerza de los electrodos.

La fuerza de los electrodos tiene varias funciones: mantener unida las láminas traslapadas, reducir la resistencia de contacto inicial en las interfaces, suprimir la expulsión del metal fundido en la unión soldada y consolidar el botón de soldadura [28]. Demasiada fuerza de los electrodos puede causar una severa indentación en el punto de soldadura, sin embargo, no siempre es posible reducirla, ya que una fuerza alta remueve más rápido el recubrimiento en el área de soldadura y el tiempo de soldadura se puede reducir, en la Figuras 3.3 y 3.4 se muestra el efecto que tiene la presión de los electrodos sobre el porcentaje de penetración y ancho del cordón respectivamente.

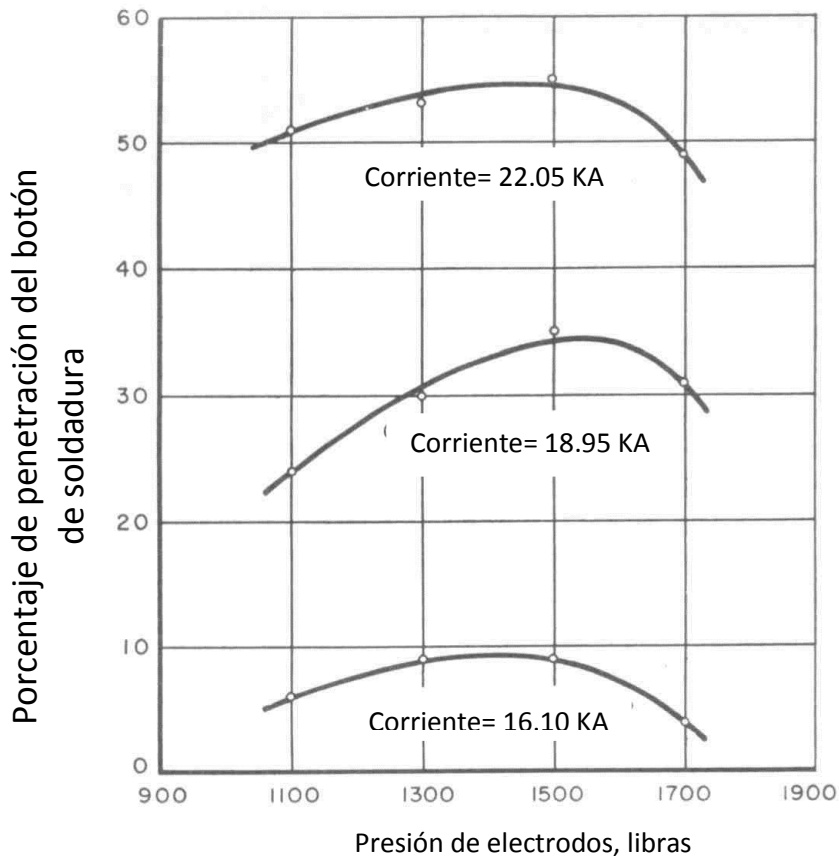


Figura 3. 3. Ilustración esquemática del comportamiento de la presión y corriente y cómo influye en el porcentaje de penetración del botón de soldadura

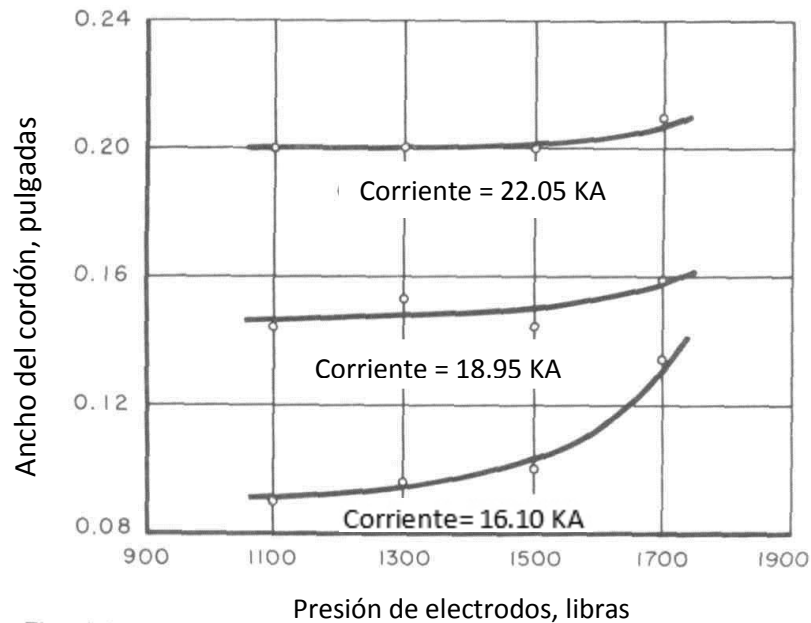


Figura 3. 4. Ilustración esquemática del comportamiento de la presión y la corriente y como estos influyen el ancho del cordón.

### 3.4. Soldabilidad de aceros de bajo y medio contenido de carbono.

La mayoría de aceros puede ser soldada con la soldadura por resistencia continua.

#### 3.4.1. Aceros de bajo carbono.

Estos aceros tienen una gran soldabilidad por este método ya que su templabilidad es baja, aunque si su porcentaje de carbón es superior al 0.08% y las láminas a soldar son delgadas puede llegar a tener una dureza relativamente alta después de haber sido soldada. [23].

#### 3.4.2. Aceros suaves.

Para poder soldar estos tipos de aceros es necesario controlar la temperatura de enfriamiento durante el proceso de soldadura, o elaborar un ciclo de revenido posterior a la soldadura con fin de evitar la dureza excesiva y agrietamiento asociada a la zona de la soldadura. Además de que incrementa la resistencia a la cizalla con respecto se incrementa el contenido de carbono al ser soldada con este procedimiento.

Con los aceros suaves, se recomienda un postcalentamiento con una corriente menor durante varios ciclos (60 Hz) esto con fin de evitar la formación de martensita dura en la soldadura [23].

#### 3.4.2. Gráfica “lobe” de soldadura por resistencia continua.

La soldabilidad de un acero puede ser cuantificada por las gráficas denominadas “lobe” o lóbulo. Esta gráfica define las condiciones de soldadura sobre la cual un cordón de soldadura continua se puede producir sin que surjan interrupciones del proceso o se vea afectado la integridad del cordón. La gráfica lobe generalmente se representa en dos dimensiones que representa las combinaciones eficaces de velocidad de soldadura y la corriente de soldadura. En tres dimensiones, este se expande para incluir todas las combinaciones de corriente de soldadura, velocidad de soldadura, y la fuerza del electrodo. El límite superior del lóbulo (es decir, un calentamiento excesivo de la soldadura) típicamente se caracteriza por la erupción de superficie, agrietamiento del acero o la adherencia de los electrodos a la del acero. El límite inferior del lóbulo (es decir, crecimiento insuficiente de la soldadura) se define como el punto en el que ya no se observa un cordón de soldadura continua.

Estos diagramas de soldabilidad son herramientas poderosas para determinar tanto el rendimiento de los procesos de una aplicación determinada y la capacidad de un hacer a ser soldado. Un lóbulo amplio generalmente es muy tolerante de los cambios en las condiciones del proceso, mientras que un lóbulo estrecho sugiere que incluso pequeños cambios en las condiciones del proceso tendrán un efecto significativo sobre la calidad de la soldadura. Para ilustrar este enfoque, los lóbulos de soldabilidad que se muestra en la Figura 3.4 nos muestra las condiciones de soldadura, corriente, fuerza del electrodo, y la velocidad de soldadura, para un acero de bajo carbono, se puede seleccionar para cada aplicación utilizando el enfoque de soldabilidad lóbulo, que indica claramente la robustez del proceso de soldadura en las diferentes condiciones [23].



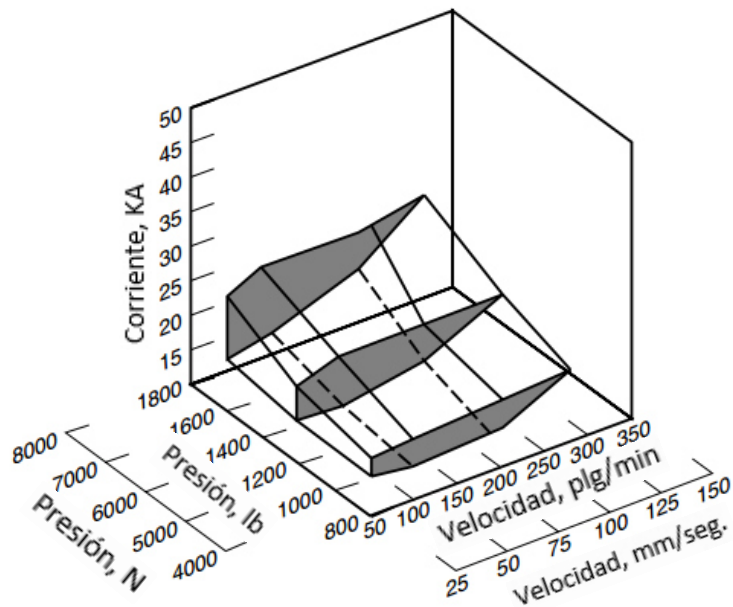


Figura 3. 5. Gráfica de lóbulo tridimensional para un acero bajo carbono usando pulsos de corriente 3-1

### 3.5. Formación de la soldadura.

Supongamos en primer lugar que los electrodos se encuentran en reposo, y establecemos para un espesor de láminas una corriente, una velocidad y una presión tales que permitan obtener un punto de soldadura, en este tipo de regulación y asumimos que la corriente será continua, sin pulsos.

El flujo de corriente juega un papel muy importante en la producción de la fusión y por ende en la formación del botón de soldadura. Ya que al iniciar la soldadura la corriente empieza a fluir a través de la región donde hace contacto los electrodos y la temperatura comienza a subir. La resistencia al interfaz sigue siendo alta debido a que no están todavía unidas y la temperatura sigue bastante baja debido al corto tiempo de flujo de corriente, se realiza algunas uniones en estado sólido debido a la presión de los electrodos. Esta unión reduce la resistencia a la interfaz por lo que la temperatura aumenta rápidamente haciendo que la fusión se produzca, consecuente a esto un botón de soldadura aparece, y después uno más pequeño; este proceso sigue hasta obtener un cordón de soldadura.

En la Figura 3.6 corresponde a la curva de resistencia durante la formación de un punto de soldadura. Donde se observa que la resistencia cambia dinámicamente.

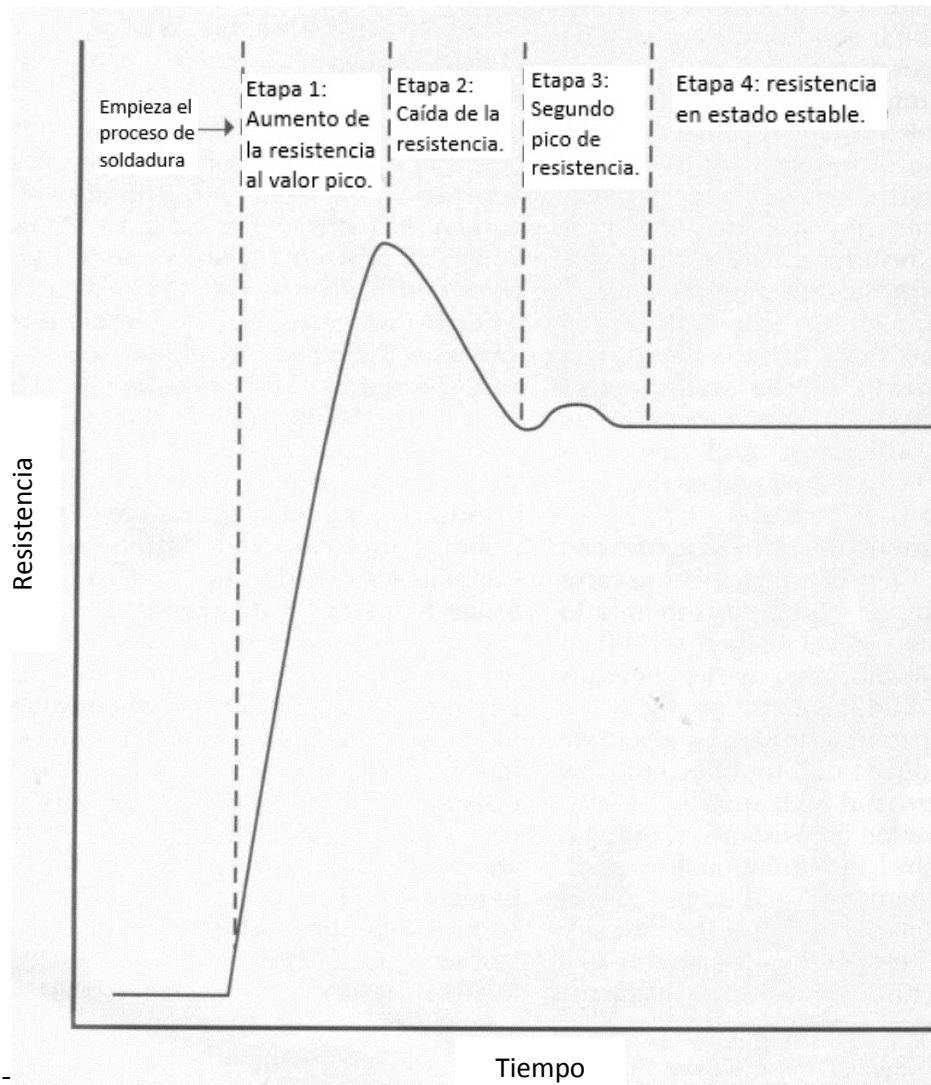


Figura 3. 6. Curva del comportamiento de la resistencia contra el tiempo en una soldadura continua por resistencia eléctrica (RSEW)

Etapa 1: Aumento de la resistencia debido al aumento de temperatura y a la reducción de espesores por la presión de los electrodos, además de un mejor contacto

superficial a través del reblandecimiento de asperezas y descomposición de óxidos superficiales, en materiales más delgados el pico se produce más rápidamente.

Etapa 2. La resistencia disminuye debido que se encuentran tanto partes sólidas como líquidas, un porcentaje pequeño se encuentra unido.

Etapa 3: El Punto de soldadura este líquido completamente y posteriormente empieza la solidificación donde éste empieza a crecer en un estado estacionario, hay una cierta inestabilidad en el flujo de corriente, esto es evidente por el corto tiempo en el que sucede este fenómeno.

Etapa 4: Después entra en un estado de aparente equilibrio, como se muestra en la Figura 3.6 hasta que hay una nueva corriente para la formación de un nuevo punto de soldadura.

A medida que se aumenta la velocidad de desplazamiento (velocidad de soldadura) las etapas iniciales se producen con mayor rapidez y se alcanzan más rápidamente el estado de equilibrio. A velocidades bajas las condiciones de calentamiento y el flujo de corriente tiende durar más, en cambio a velocidades más altas, el punto de soldadura tiende a crecer a la salida del electrodo. Además, menos calor se extrae a través de los electrodos ya que hay menos tiempo de contacto de electrodo debido a la alta velocidad. Esto se traduce en mayor crecimiento de espesor del cordón. Las velocidades más lentas tienden a tener menor penetración que las velocidades altas.

En la Figura 3.7 se muestra la sección transversal de un cordón de soldadura, a tres velocidades de soldadura, con las velocidades más lentas la sección trasversal es más amplia pero su penetración es pobre, con velocidades rápidas el cordón es estrecho, pero con una penetración significativa. Con la velocidad excesivamente rápida el cordón de soldadura sobresale de la superficie de la lámina [53].

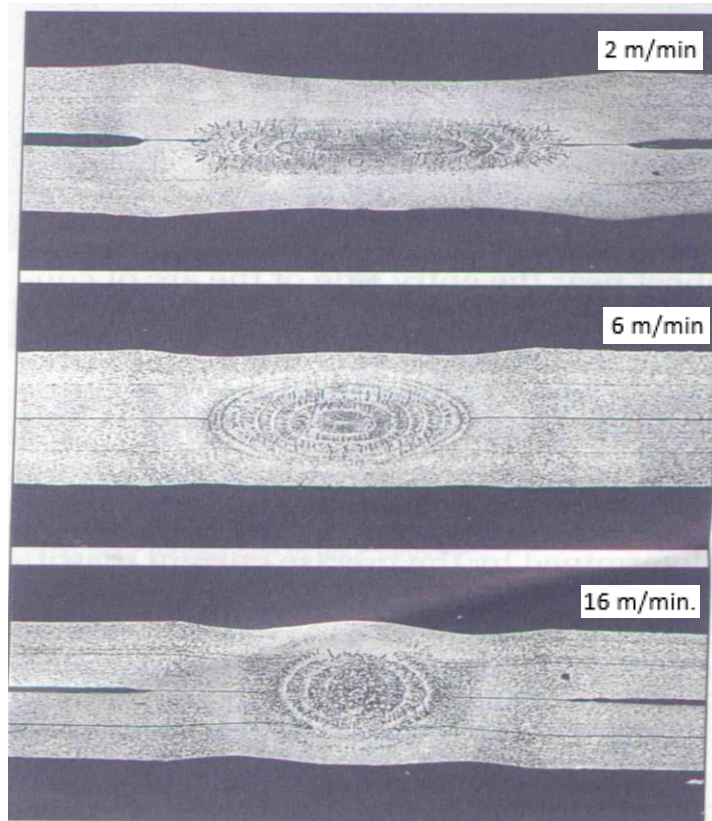


Figura 3. 7. Sección transversal del cordón de soldadura a tres velocidades diferentes [53].

### 3.6. Solidificación en el proceso de soldadura continua por resistencia.

Las propiedades mecánicas de láminas de acero son de gran importancia en el comportamiento de un miembro estructural. Estas dependen principalmente, de la composición química, los procesos de laminado y el tratamiento térmico a que es sometido. Sin embargo, estas propiedades, no son tan óptimas cuando se hace una unión por el proceso de RSEW.

La solidificación de un botón de soldadura es parecida a la colada de un metal. Esto consiste en dos pasos, nucleación y crecimiento. El proceso de cristalización es controlado por la disipación de calor a través de electrodos y del metal base [53].

La composición química de la aleación influye decisivamente en el tipo, tamaño y orientación del cristal. Durante la solidificación del botón de soldadura, surgen cambios en la aleación que tiene lugar en los cristales, que precipitarán.

En un rápido enfriamiento en el proceso de RSEW, la velocidad de difusión de los cristales no es suficiente para lograr un equilibrio en la distribución de la composición, produciendo microsegregaciones dentro de los cristales formados.

Dependiendo de la programación de RSEW, se pueden formar varias estructuras en el botón de soldadura. El escenario ideal, es cuando ocurre la solidificación de manera uniforme en todos los alrededores del sólido.

### 3.6.1. Microestructura del punto de soldadura.

La microestructura producida en el punto de soldadura es diferente a la del metal base, que era la característica clave que determinaba la resistencia y formabilidad del metal. La microestructura original es destruida y tres regiones se pueden identificar en el punto de soldadura.

- Metal base sin afectar
- Zona afectada térmicamente.
- Zona de fusión [31]

La zona de fusión consiste del material que ha sido fundido durante la soldadura y solidificado después de la soldadura, posteriormente sigue la transformación de fases. Dependiendo de la composición química del material, puede seguir dos trayectorias:

- Líquido, ferrita delta ( $\delta$ ), austenita ( $\gamma$ ), martensita ( $\alpha'$ ) y bainita.
- Líquido, austenita ( $\gamma$ ), martensita ( $\alpha'$ ) y bainita [32].

La composición microestructural del botón de soldadura puede ser martensita, bainita o una mezcla de ambas, esto depende de la composición química del metal base y la velocidad de enfriamiento. La zona afectada térmicamente (ZAT) consiste en el

material que no ha sido fundido pero que alcanza temperaturas cercanas o por arriba de la austenización [33]. Esta zona la podemos considerar como una zona de revenido del acero, con un espesor que puede alcanzar entre 5 y 10 mm. Un hecho importante a tener en cuenta, es la velocidad de deformación en caliente, en el caso de la soldadura continua, es menor debido, a que el propio rodillo desplaza el punto soldado, no actuando como refrigerante de la zona, ello genera una microestructura más complicada que en la soldadura por puntos. Como existe un solapamiento de los puntos de soldadura, la formación de uno nuevo genera la aparición de una zona de fusión parcial del punto anterior, lo que provoca una reorientación de las dendritas del grano, y una aplicación térmica de la zona anteriormente solidificada, pudiéndose modificar la microestructura de forma proporcional al calor generado por el punto posterior [26].

Los límites de granos parcialmente fundidos de la zona afectada térmicamente ZAT, pueden servir como núcleo para el crecimiento de granos sólidos. La ZAT puede ser dividido en tres zonas desde el punto de vista metalúrgico: supercrítico, intercrítico, y subcrítico.

Región supercrítica puede ser dividida en dos partes: región de crecimiento de grano y región de refinamiento de grano.

Región intercrítica: experimenta una transformación parcial de fase, el pico de temperatura es menor que en la región supercrítica. Nuevas fases que no existen en el metal base pueden formarse en esta región, entonces la transformación depende de la duración del metal expuesto al pico de temperatura y a la velocidad de enfriamiento.

Región subcrítica: normalmente no sufre modificaciones microestructurales observables, como el rango de temperatura es generalmente bajo, es muy difícil distinguir esta región del metal base. En algunos casos pueden aparecer precipitados muy finos [32].

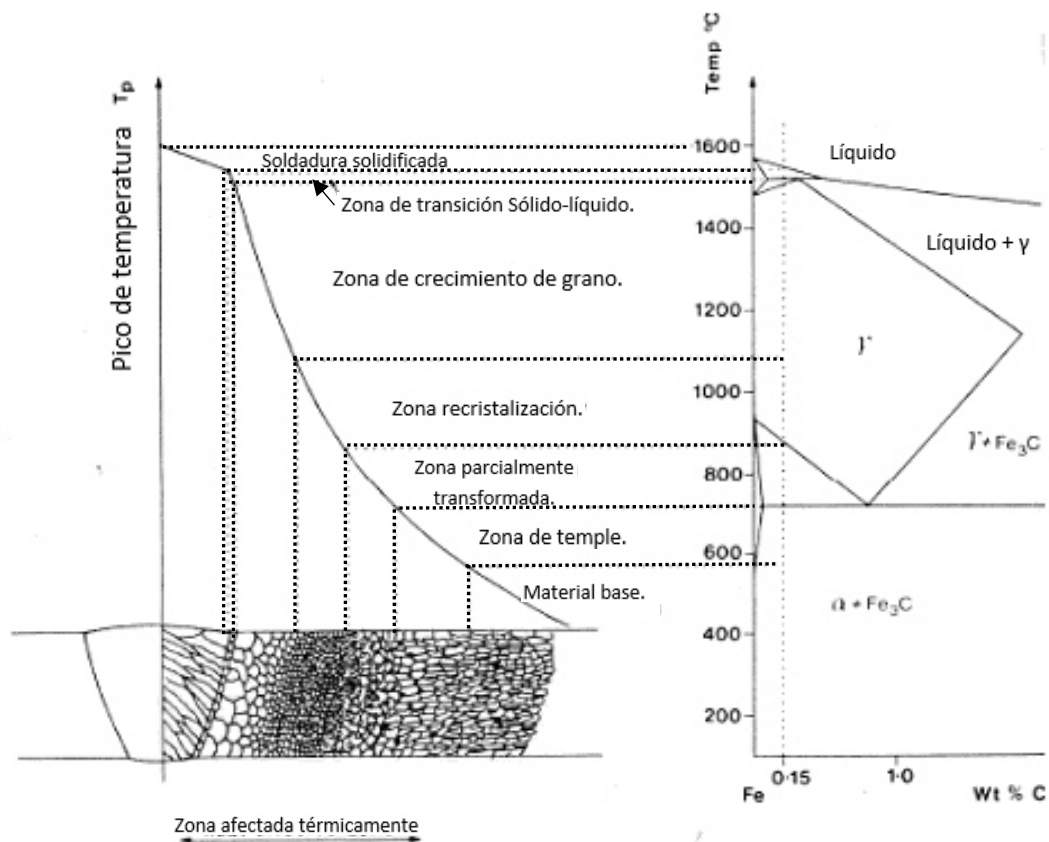


Figura 3. 8. Un diagrama esquemático de las diversas zonas de la región de soldadura correspondiente a la aleación de C (0,15 en peso % C) indicado en el diagrama de equilibrio Fe-Fe<sub>3</sub>C [54].

### 3.6.2. Velocidad de enfriamiento en el proceso soldadura de resistencia continua.

Los electrodos utilizados en el proceso de RSEW, dan como resultado una alta velocidad de enfriamiento, que a menudo exceden la velocidad crítica de enfriamiento, produciendo la formación de martensita. El tiempo de enfriamiento, produciendo la formación de la martensita. El tiempo de enfriamiento de 800 ° C a 500 ° C ( $\Delta t_{8/5}$ ) es reconocido como un buen indicador de la descomposición de la austenita. Por ejemplo, la máxima velocidad de enfriamiento, en la soldadura de resistencia continua con

frecuencia excede la velocidad crítica de enfriamiento del material. Además, el enfriamiento es más grave cuando el área transversal a soldar es muy pequeña.

Los diagramas de transformación tiempo temperatura (TTT) son una importante herramienta para entender la microestructura que puede ocurrir en un enfriamiento. Estos diagramas, muestran como transforman los metales a una temperatura dada. La Figura 3.9 muestran diagramas TTT para un acero eutectoide. Un diagrama TTT típico de un acero de bajo contenido de carbono muestra el comienzo y la formación completa de ferrita, perlita, bainita y martensita. La transformación de la martensita por difusión es representada por una línea horizontal  $M_s$  (inicio). Las otras dos líneas horizontales en la Figura 3.10 indica el porcentaje de transformación de austenita a martensita. Los elementos de aleación son comúnmente añadidos para el control de producción de fases y tiene un efecto significativo sobre las curvas de temperatura "C".

Los diagramas de transformación de enfriamiento continuo (CCT) son representativos a los diagramas TTT. Como el enfriamiento en el cordón de soldadura RSEW está lejos de isoterma; por eso los diagramas CCT son más aplicables para el entendimiento microestructural de la soldadura. Los diagramas CCT son similares a los diagramas TTT, excepto que en los diagramas CCT la transformación ocurre sobre un rango de temperatura [31].



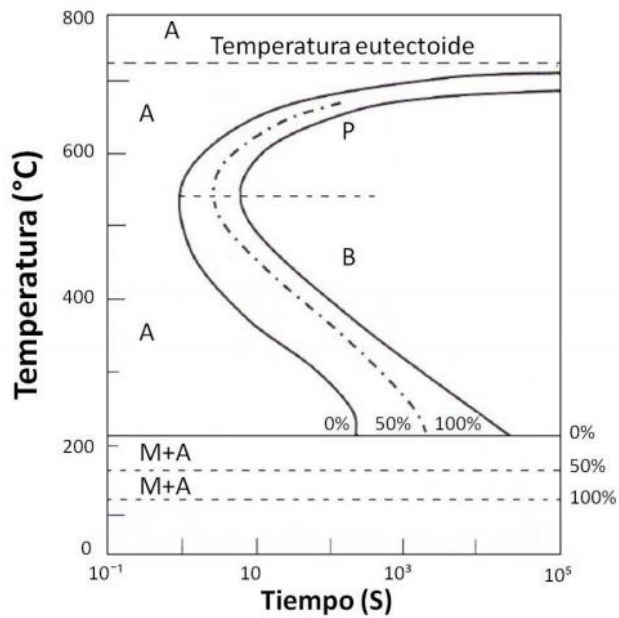


Figura 3. 9. Diagrama TTT para una aleación hierro-carbono con una composición eutectoide: A= austenita, B= bainita, M= martensita, P= Perlita [31].

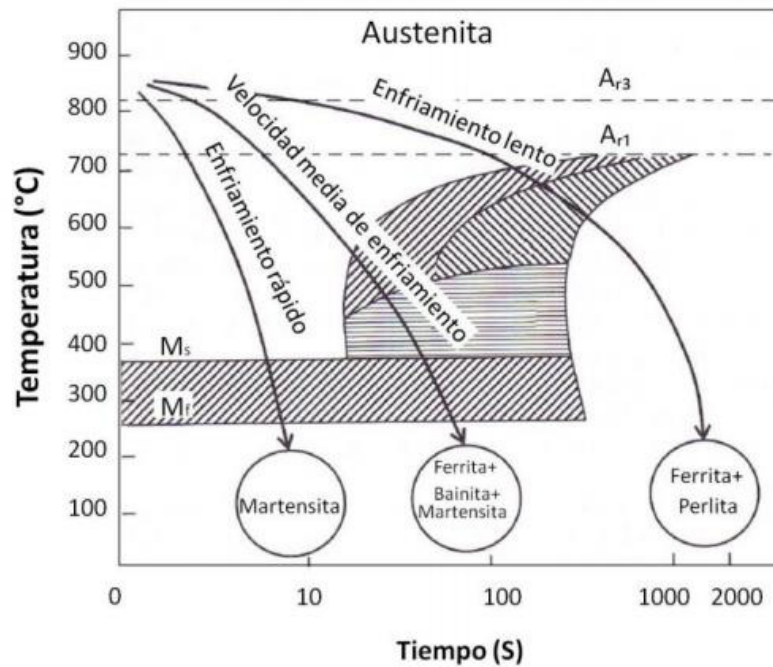


Figura 3. 10. Diagrama CCT típico de un acero de bajo carbono: A= austenita; F= Ferrita, P= perlita, B= bainita, M= martensita

### 3.7. Efecto de la composición química del acero.

Un aumento de carbono y de algún otro de los elementos aleantes incrementará la susceptibilidad de amplia variación en la microestructura y en las propiedades mecánicas de acuerdo al tiempo de enfriamiento. Un rápido y drástico temple produce la formación de una microestructura dura y frágil.

#### 3.7.1. Carbono.

Es el más potente de los elementos endurecedores del acero, sin embargo, no presenta ningún efecto en la RSEW si su contenido es menor al 0.20% de peso. Un incremento en el contenido de C reduce significativamente la resistencia al clivaje en la ZAT, además de promover la formación de productos de transformación de bajas temperaturas como la martensita y bainita.

#### 3.7.2. Manganeso.

También incrementa la dureza y la resistencia a la tensión. A valores arriba de 0.60% de peso y combinado con alto C, incrementa la tendencia al agrietamiento de la soldadura. Mientras que a niveles menores a 0.30% de peso, puede incrementar su susceptibilidad a la porosidad y agrietamientos internos.

#### 3.7.3. Azufre.

Debe mantenerse en un rango de 0.035% y 0.05% de peso, ya que arriba de este valor promueve la formación de grietas en la soldadura y en la ZAT.

#### 3.7.4. Silicio.

Incrementa la susceptibilidad al agrietamiento de la zona soldada, especialmente cuando se combina con un incremento en el contenido de C.

### 3.7.5. Fósforo.

Es considerado una impureza, no tiene ningún efecto positivo en la soldadura y debe mantenerse tan bajo como sea posible, en cantidades arriba del 0.04% de peso, tiende a producir botones frágiles, causar fractura y reducir la resistencia a la fatiga y al impacto de la unión.

### 3.7.6. Titanio.

Reduce el diámetro máximo del botón de soldadura, así como la resistencia a la tensión y el intervalo de resistencia de corriente de soldadura aceptable. Se recomienda que el contenido de Ti no exceda el 0.18% de peso y que se utilice una fuerza mayor a la recomendada, así como electrodos de un mayor diámetro.

### 3.7.7. Nitrógeno.

Promueve la fractura en la interfase del botón de soldadura de una manera más severa en aceros laminados en frío. Esta sensibilidad puede ser reducida disminuyendo el contenido de N libre con Al durante el recocido.

### 3.7.8. Oxígeno.

Un alto nivel de O promueve la falla en la interfase del botón de soldadura, ya sea por agrietamiento en caliente de la línea central del botón o a través de un mecanismo de fragilización de la soldadura.

### 3.7.9. Hidrógeno.

Proveniente de los aceites superficiales, se ha identificado que asiste a las fallas en las soldaduras al difundirse en el área de soldadura.

### 3.7.10. Boro.

Pequeñas cantidades de boro que oscilan entre el 0.002-0.004 % junto con un enfriamiento lento en el proceso de soldadura nos puede dar como resultado una

microestructura con bainítica dura o martensítica, aun si los aceros a soldar son con un bajo contenido de carbono [35].

Probablemente el elemento que más afecta la soldabilidad es el C, y es que en calibres automotrices la dureza se incrementa rápidamente con pequeños incrementos en el contenido de C ocasionando fractura en la interfase y deterioro del botón de soldadura. Para obtener un buen desempeño en los puntos de soldadura se ha sugerido que el contenido de C debe mantenerse por debajo de  $0.01\% + 0.011t$ , donde t es el espesor de la lámina en milímetros, es por esta razón que los aceros bajo carbono tienen buena soldabilidad por RSEW [34].

### 3.8. Relevancia del carbono equivalente.

El valor de carbono equivalente (CE) predice que tan susceptible es un material a presentar agrietamiento en frío en la ZAT después de que es soldado. La susceptibilidad al agrietamiento en frío es directamente proporcional a la cantidad de martensita en la ZAT. Los elementos aleantes pueden ayudar en la formación de martensita. El CE proporciona un índice de medida de los efectos que tienen los elementos aleantes en la formación de martensita.

Existen una gran variedad de ecuaciones para calcular el CE Cada una tiene en cuenta numerosos elementos de aleación, en los que se incluyen elementos estabilizadores de ferrita y austenita. Las ecuaciones disponibles son: CE (IIW) y  $P_{cm}$  desarrollada por Ito y coautores [36], la cual es expresada en la ecuación 3-2 y 3-3 respectivamente.

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Estudios han mostrado que es más apropiado utilizar la ecuación CE (IIW) [37], para aceros de alto contenido de carbono 0.16%. Y la ecuación Pcm [36], para aceros de bajo contenido de carbono y baja aleación.

Yurioka y coautores [38] realizaron diversos métodos de prueba para determinar la temperatura de precalentamiento necesaria para evitar la formación de agrietamiento en frío durante la soldadura. En particular, Stout realizó ensayos de soldadura en 20 diferentes aceros, proponiendo la siguiente ecuación.

$$CE_Y = C + A(C) * \left\{ 5B + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right\} \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Donde CEY es carbono equivalente Yurioka y  $A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(0.12)\}$ . La ecuación 3-4 contiene un factor de arreglo A(C) que se aproxima a 0.5 cuando el carbono está por debajo de 0.08 % y un incremento a 1 cuando el contenido de carbono es de 0.18 %. La ecuación CEY se aplica en aceros con rango de contenido de carbono de 0.02 y 0.2 [38].

### 3.8.1. Diagrama de Graville.

El Diagrama de Graville, Figura 3.11, es utilizado normalmente para evaluar la posibilidad de aplicación de precalentamiento o tratamiento térmico post-soldadura a través de la composición química del acero, dependiendo la zona donde se referencie el carbono equivalente se puede determinar el procedimiento a seguir; se consideran en el diagrama tres zonas las cuales se clasifican de la siguiente manera:

- Zona I: Aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento donde la fisuración es imposible, pero puede ocurrir con alto hidrógeno o alto nivel de restricción.
- Zona II: Aceros con mayor porcentaje de carbono, el riesgo de presentarse fisuramiento en la ZAT puede ser evitado mediante un control de la velocidad de enfriamiento o por medio de aporte térmico.

- Zona III: Aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura se pueden presentar microestructuras susceptibles a fisuras, por lo que se debe aplicar procesos de bajo hidrogeno, precalentamiento y proceso de post-soldadura [63].

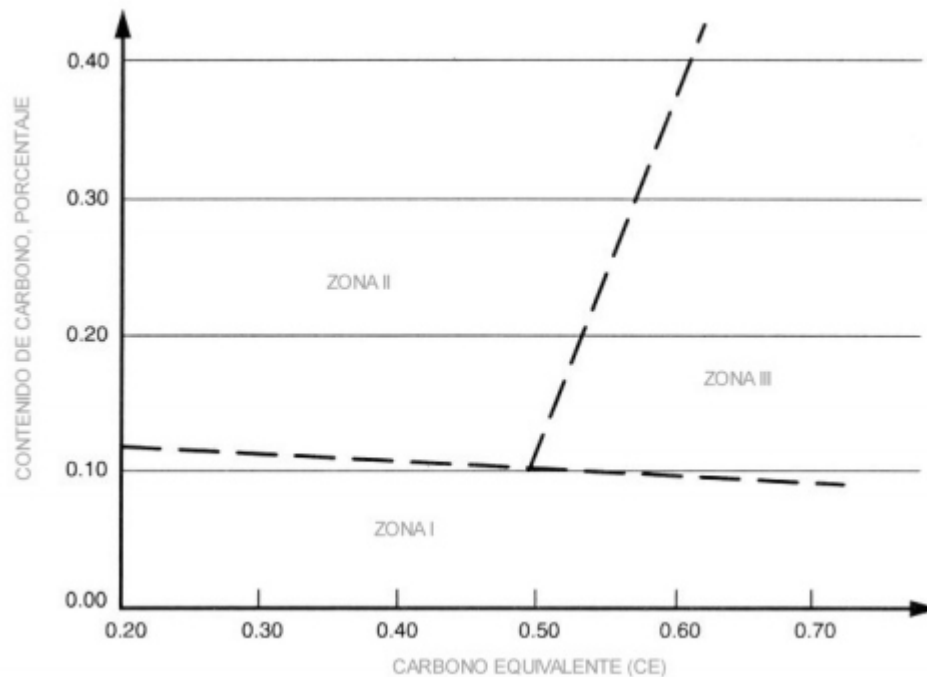


Figura 3. 11. Diagrama de Graville [61].

### 3.9. Pruebas de Soldadura.

Los estándares de calificación y certificación son utilizados por empresas automotrices para calificar a sus proveedores de materiales, cada compañía tiene sus propias especificaciones para materiales recubiertos y no recubiertos.

En general los parámetros propios de la prueba así como el tipo de probetas y los criterios de evaluación y aceptación utilizados varían para los diferentes aceros y materiales de acuerdo a los criterios de cada compañía. Sin embargo, los principales métodos de evaluación son los descritos a continuación, además se utilizan otros

métodos que incluye metalografías, perfil de dureza, ensayos de tensión de impacto y fatiga, etc.

#### 3.9.1. Ensayo de pelado.

Mediante este ensayo se determina la resistencia de la unión entre láminas sintéticas al someter ésta a esfuerzos de pelado. Para ello, se sujeta los extremos de la soldadura en las mordazas de una máquina multiensayos y se someten a una fuerza de tracción a velocidad constante.

Este ensayo se realiza tanto in situ como en el laboratorio y es fundamental a la hora de evaluar la calidad del cordón de soldadura ya que el estado de las soldaduras condiciona la efectividad de la impermeabilización [25].

#### 3.9.2. Ensayo de tensión de cizalla.

Este ensayo determina el comportamiento del material sometido a un esfuerzo cortante, progresivamente creciente, hasta conseguir la rotura. El ensayo se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de cizalladura determinado por la configuración del aparato de cizalladura [25,29].

#### 3.9.3. Pruebas no destructivas de hermeticidad

Compuesto por pruebas de fuga, cambio de presión (neumática o hidrostática), burbuja, espectro de masas y fugas con rastreadores de hidrógeno, ofrece información acerca del grado en que pueden ser contenidos los fluidos en recipientes sin que escapen a la atmósfera o queden fuera de control [25,30].

## Capítulo IV.

### DISEÑO FACTORIAL $2^k$

Los diseños factoriales  $2^k$  son una clase especial de los diseños factoriales en los que se tienen  $k$  factores de interés a dos niveles cada uno. Son especialmente útiles en las etapas iniciales de la investigación para determinar, de un gran número de factores candidatos, cuales son los que realmente influyen sobre la variable respuesta. Se llaman diseños factoriales  $2^k$  porque se quiere investigar la forma como influyen  $k$  factores sobre una variable respuesta y en cada factor se consideran dos niveles solamente, donde, pueden ser cualitativos o cuantitativos y se denotan como alto y bajo o más (+) y menos (-). La réplica completa de un diseño de este tipo requiere  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observaciones y recibe el nombre de **diseño factorial  $2^k$**  [56].

En la Figura 4.1, se muestran los componentes de un experimento. Las variables que se modifican en el experimento se denominan **factores**, representados por letras mayúsculas. Los estados diferentes de los factores se denominan **niveles**, es decir, los valores que pueden tomar los factores dentro del experimento, y se denotan por letras minúsculas. Las cantidades indican el número de niveles empleados para cada factor. La **respuesta** es la salida del proceso que se desea investigar, resultado de ajustar los factores de entrada a los niveles previamente establecidos [56, 57].



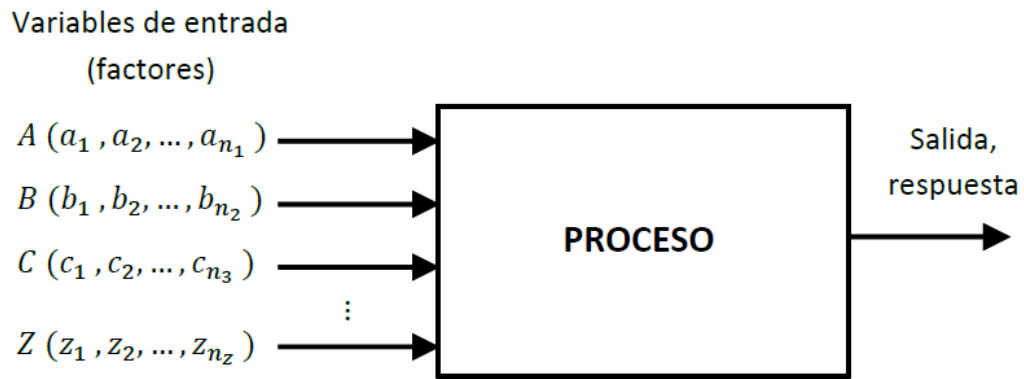


Figura 4. 1. Componentes de un experimento

El **rango** de un diseño de experimentos es el conjunto de valores que puede tomar el factor, entre el nivel máximo establecido y el nivel mínimo. El experimentador debe ser cuidadoso al elegir el rango adecuado, ya que el análisis no tendrá validez para una combinación de niveles con valores fuera del rango.

#### 4.1. Definiciones y diseños $2^2$

Es el tipo más sencillo de diseño experimental  $2^k$ . En este diseño se tienen dos factores A y B, cada uno con dos niveles. Lo usual es considerar estos niveles como los niveles bajo y alto del factor. El diseño  $2^2$  se suele representar por un cuadrado como el que se ilustra en la Figura 4.2 [58].

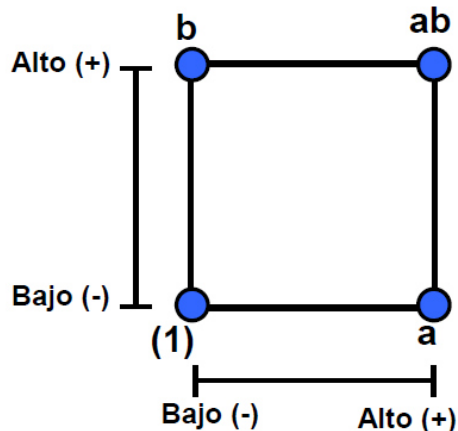


Figura 4. 2. Representación geométrica del diseño  $2^2$  [58].

A esta representación se le conoce como representación geométrica del diseño  $2^2$ . Donde cada vértice del cuadrado corresponde a una combinación diferente de tratamientos (niveles) en el diseño factorial.

En la Figura 4.2 se aprecia una notación especial para etiquetar las combinaciones de tratamiento en el diseño  $2^2$ . Esta notación de letras minúsculas se utiliza, en general, para todos los diseños  $2^k$ . y se conoce como notación de Yates. Si una letra está presente, el factor correspondiente se corre con el nivel alto en dicha combinación de tratamiento; si está ausente, el factor se corre con su nivel bajo. Por ejemplo, la combinación de tratamiento a indica que el factor A está en el nivel alto, y el factor B en el nivel bajo. La combinación de tratamiento donde ambos factores tienen el nivel bajo está representada por (1) [58].

#### 4.1.1. Efectos en el diseño $2^2$ .

Los efectos de interés en el diseño  $2^2$  son los efectos principales A y B, y la interacción entre los dos factores AB. Si suponemos que las letras (1), a, b y ab representan los totales de todas las n observaciones tomadas en los puntos de diseño, es sencillo estimar los efectos de estos factores. Para estimar el efecto principal de A, se promedian las observaciones del lado derecho del cuadrado de la Figura 4.2, donde A tiene el nivel alto, y se resta de éste el promedio de las observaciones que están en el lado izquierdo del cuadrado, donde A tiene el nivel bajo, dando la Ecuación 4-1 [58].

$$A = \overline{y_{A+}} - \overline{y_{A-}} = \frac{a + ab}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)] \quad \text{Ecuación 4-1.}$$

De igual forma, el efecto principal de B se obtiene al promediar las observaciones de la parte superior del cuadrado, donde B tiene el nivel alto, y se resta de éste el promedio de las observaciones que están en la parte inferior del cuadrado, donde B tiene el nivel bajo, Ecuación 4-2:

$$B = \overline{y_{B+}} - \overline{y_{B-}} = \frac{b + ab}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} [b + ab - a - (1)] \quad \text{Ecuación 4-2.}$$

Finalmente, la interacción AB se estima tomando la diferencia en los promedios de la diagonal de la Figura 4.1, Ecuación 4-3:

$$AB = \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \quad \text{Ecuación 4-3.}$$

Simplificando da como resultado las Ecuaciones 4-4, 4-5 y 4-6, respectivamente:

$$\text{Contraste}_A = [a + ab - b - (1)] \quad \text{Ecuación 4-4.}$$

$$\text{Contraste}_B = [a + ab - a - (1)] \quad \text{Ecuación 4-5.}$$

$$\text{Contraste}_{AB} = [ab + (1) - a - b] \quad \text{Ecuación 4-6.}$$

Para cada término de efecto principal y cada término de interacción, hay un coeficiente y un efecto. El efecto es dos veces el coeficiente. Los efectos y coeficientes determinan la fortaleza relativa de los efectos. Tanto el valor como el signo son importantes en la determinación:

Los valores absolutos determinan las fortalezas relativas de los factores. Mientras más alto sea el valor, mayor será el efecto sobre la respuesta. En ausencia de interacciones, el signo del efecto determina cuál valor de configuración de factor produce una medición de respuesta más alta.

–Un signo positivo indica que la configuración alta del factor tiene como resultado una respuesta más alta que la configuración baja.

–Un signo negativo indica que la configuración baja del factor tiene como resultado una respuesta más alta que la configuración alta [59].

La manera práctica de calcular los contrastes de cualquier efecto (principal o de interacción) es a partir de la tabla de signos. Esta tabla, para el diseño  $2^2$  se muestra en la Figura 4.3.

Tabla 4. 1. Tabla de signos para el diseño  $2^2$  y notación de Yates [58].

A	B	AB	Notación de Yates
-	-	+	(1)
+	-	-	a
-	+	+	b
+	+	-	ab

Observe que la tabla de signos, Tabla 4.1, que la interacción AB se obtiene multiplicando la columna con los signos de A por la columna con los signos de B y, el resultado son los signos del contraste AB, Ecuación 4-6. Para generar un contraste a partir de esta tabla, se multiplican los signos de la columna apropiada de la Tabla 4.1 por las combinaciones de tratamientos que aparecen en la columna de notación de Yates, y luego se suma. Por ejemplo,  $\text{contraste}_{AB} = [(1)] + [-a] + [-b] = ab + (1) - a - b$ . Los contrastes se emplean en el cálculo de las estimaciones de los efectos y en las sumas de cuadrados de A, B y la interacción AB. Las fórmulas para las sumas de cuadrados son [58]:

$$SC_A = \frac{[a + ab - b - (1)]^2}{4n} = \frac{[\text{Contraste}_A]^2}{4n} \quad \text{Ecuación 4-7.}$$

$$SC_B = \frac{[b + ab - a - (1)]^2}{4n} = \frac{[\text{Contraste}_B]^2}{4n} \quad \text{Ecuación 4-8.}$$

$$SC_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} = \frac{[\text{Contraste}_{AB}]^2}{4n} \quad \text{Ecuación 4-9.}$$

El Análisis de Varianza para el diseño  $2^2$  se completa con la suma de cuadrados totales Y la suma de cuadrados de los errores que se obtiene por diferencia, Ecuaciones 4-10 y 4-11 Respectivamente.

$$SC_T = \sum_{I=1}^2 \sum_{J=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{4n}$$

Ecuación 4-10.

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

Ecuación 4-11.

#### 4.1.2. Valor "P"

El ANOVA completo para el diseño  $2^2$  se muestra en la Tabla 4.2, Se utilizó los valores (P) de la tabla de análisis de varianza, Tabla 4.2; para determinar cuáles de los efectos en el modelo son estadísticamente significativos. Normalmente se observan primero los efectos de interacción del modelo, porque una interacción significativa influirá en la manera de interpretar los efectos principales. Para utilizar el valor p estudia:

- Se identifica el valor p para el efecto que desea evaluar.
- Se compara este valor p con su nivel  $\alpha$ . Un nivel  $\alpha$  frecuentemente utilizado es 0.05.

–si el valor p es menor que o igual a  $\alpha$ , se debe concluir que el efecto es significativo.

–si el valor p es mayor que  $\alpha$ , se debe concluir que el efecto no es significativo [59].

Tabla 4. 2. Tabla ANOVA para un diseño factorial  $2^2$  [58].

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	$F_0$	Valor P
Factor A	$SC_A = \frac{[a + ab - b - (1)]^2}{4n} = \frac{[Contraste_A]^2}{4n}$	1	$MC_A = \frac{SC_A}{1}$	$F_0 = \frac{MC_A}{MC_E}$	Probabilidad
Factor B	$SC_B = \frac{[b + ab - a - (1)]^2}{4n} = \frac{[Contraste_B]^2}{4n}$	1	$MC_B = \frac{SC_B}{1}$	$F_0 = \frac{MC_B}{MC_E}$	Probabilidad
Interacción AB	$SC_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} = \frac{[Contraste_{AB}]^2}{4n}$	1	$MC_{AB} = \frac{SC_{AB}}{1}$	$F_0 = \frac{MC_{AB}}{MC_E}$	Probabilidad
Error	$SC_E = SC_T - SC_{AB} - SC_A - SC_B$	$4(n-1)$	$MC_E = \frac{SC_E}{4(n-1)}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{4n}$	$4n-1$			

#### 4.1.3. Diagrama de Pareto.

Con los resultados obtenidos del Análisis de Varianza, se tienen los diagramas de Pareto, los cuales ordenan los efectos de los factores e interacciones de mayor a menor, según su contribución en la respuesta de un proceso. La longitud de cada barra es proporcional al efecto de cada factor e interacción en la respuesta del proceso analizado [60].

La línea de referencia en la gráfica indica cuáles efectos son significativos, por lo regular se utiliza un nivel  $\alpha$  de 0.05 para dibujar la línea de referencia

En resumen, en los diagramas de Pareto muestra el:

- Valor absoluto de los efectos no estandarizados cuando no existe un término de error
- Valor absoluto de los efectos estandarizados cuando existe un término de error [59].

#### 4.2 Modelo de Superficie de Respuesta para un diseño $2^k$ .

Un aspecto interesante de los diseños factoriales  $2^k$  es que si se codifican las variables al intervalo  $[-1,1]$  entonces, se puede obtener el modelo de regresión correspondiente con relativa facilidad. Consideremos el diseño  $2^2$ , el cual será el empleado en esta investigación. En este diseño se tienen dos efectos principales, A y B y la interacción AB. El modelo de regresión se muestra en la Ecuación 4-12 [58].

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 \quad \text{Ecuación 4-12.}$$

Donde  $x_1$  representa el factor A,  $x_2$  representa el factor B, y el producto entre  $x_1$  y  $x_2$  representa la interacción entre A y B. Los parámetros del modelo de regresión,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{12}$  se pueden demostrar que son iguales a la mitad de las estimaciones de los efectos correspondientes, mientras que  $\beta_0$  es igual a la gran media. De lo anterior da como resultado la Ecuación 4-13 y 4-14 respectivamente:

$$\text{Cualquier Parámetro en el modelo de Regresión} = \frac{\text{Efecto en ANOVA}}{2} \quad \text{Ecuación 4-13.}$$

$$\beta_0 = \text{gran promedio} = \text{promedio de todas las observaciones} \quad \text{Ecuación 4-14.}$$

Se debe recordar que los valores de las variables en el modelo de regresión están codificadas al intervalo  $[-1, 1]$ . Esto quiere decir que si se quiere expresar el modelo en las unidades en las que realmente se mide la variable se debe hacer la transformación correspondiente. Esta transformación se ilustra en la Figura 4.3:

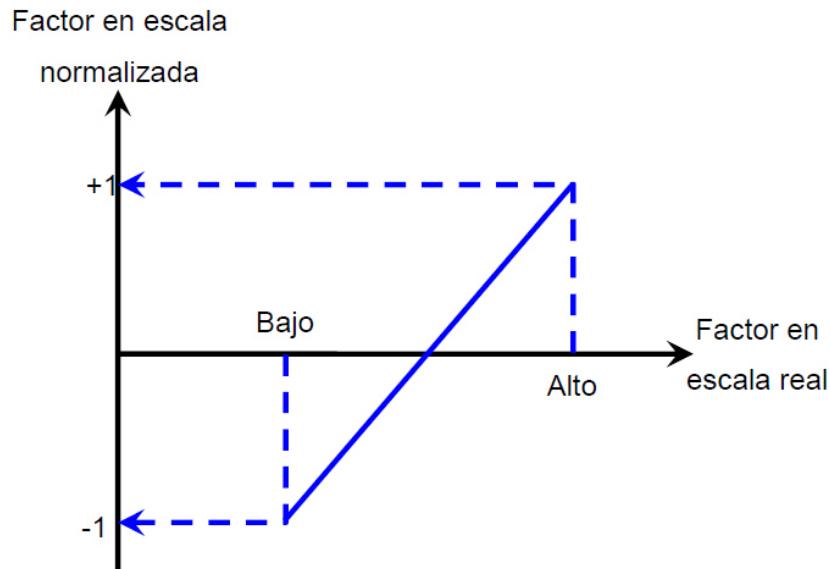


Figura 4. 3. Transformación usada para encontrar el modelo de regresión en un diseño  $2^k$ .

Esto nos lleva a la ecuación de transformación:

$$x_{cod.} = \frac{2x_{real} - Bajo - Alto}{Alto - Bajo} \quad \text{Ecuación 4-15.}$$

La cual se puede utilizar para obtener el modelo de regresión en las unidades originales en las que se miden los factores de interés. Esto transforma la ecuación 4-16 en el modelo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{2x_A - A_{Bajo} - A_{Alto}}{A_{Alto} - A_{Bajo}} \right) + \beta_2 \left( \frac{2x_B - B_{Bajo} - B_{Alto}}{B_{Alto} - B_{Bajo}} \right) + \beta_{12} \left( \frac{2x_A - A_{Bajo} - A_{Alto}}{A_{Alto} - A_{Bajo}} \right) \left( \frac{2x_B - B_{Bajo} - B_{Alto}}{B_{Alto} - B_{Bajo}} \right) \quad \text{Ecuación 4-16}$$

Sin embargo, siempre se prefiere trabajar el modelo con las variables codificadas (en el intervalo [-1,1])

Si los factores son cuantitativos, el modelo de regresión, se puede utilizar, con toda confianza, para predecir el valor de la variable respuesta para cualquier punto entre



-1 y 1 (si el factor o variable está codificado) o desde el valor bajo al alto si la variable o factor no está codificado. Es decir, el modelo de regresión se puede utilizar para interpolar cualquier valor intermedio de la variable respuesta sin problemas, pero no se debe utilizar para extrapolar [58].

## Capítulo V.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para cumplir con los objetivos del presente estudio se desarrolló un procedimiento experimental en cumplimiento con las técnicas de investigación actuales, procedimientos y normas competentes, además de las necesidades particulares de esta investigación. Donde los materiales a trabajar corresponden a una lámina de acero 1006 y otra lámina de un acero de 22MnB5, cada una con un espesor de 1.1 mm.

En la Figura 5.1 se muestra el diagrama experimental realizado en la investigación, dividido en cuatro etapas.

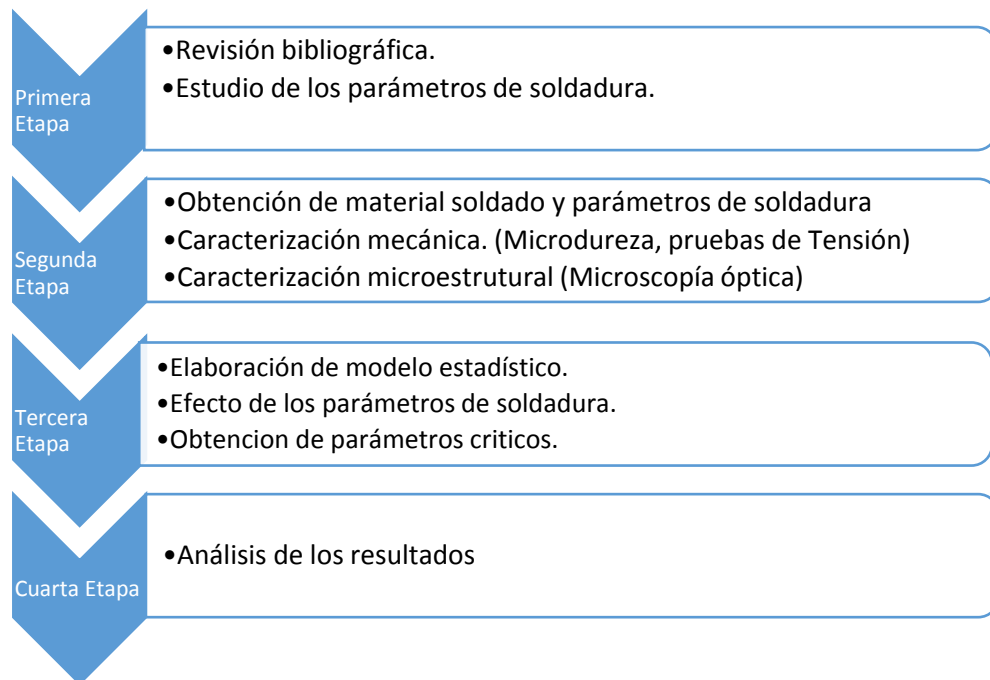


Figura 5. 1. Diseño experimental de la investigación.

Etapa 1: en esta etapa se obtuvieron las uniones soldadas hechas por la empresa, así mismo los parámetros de soldadura empleados, estos parámetros fueron propuestos

por la empresa ajustándose al tipo de aceros con los cuales ellos trabajan y utilizando la base de datos proporcionada [70], en la Figura 5.2 se muestran los parámetros empleados para la soldadura de los aceros 22MnB5 y 1006.

Etapa 2: Se realizó un análisis metalográfico de las uniones soldadas, ensayos de microdureza y tensión.

Etapa 3: Se analizaron los resultados que se obtuvieron en la etapa 2 y se elaboró un análisis estadístico para estimar el efecto de los parámetros de soldadura, esto se realizó con la ayuda de Minitab.

Etapa 4: Se realizó la escritura de la tesis y se presentó los resultados obtenidos.

### 5.1. Parámetros de soldadura.

Las condiciones que se consideraron en la elaboración de la soldadura se describen en la Tabla 5.1 y 5.2; de la Ecuación 5-1 se puede apreciar que el valor más sobresaliente es la corriente, siendo esta variable una de las condiciones a modificar, por otro lado la resistencia de la pieza de trabajo no se puede variar ya que esta viene determinada por cada material específico, sin embargo la presión ejercida por los electrodos tiende a influir en ésta, por lo que se decidió que esta fuera otra variable a considerar.

$$HI = I^2 \cdot R \cdot t$$

Ecuación. 5-1

Donde HI = calor introducido, joules

I=corriente, ampers

R= Resistencia de la pieza de trabajo, ohms

t= tiempo de soldadura, segundos

Tabla 5. 1 Parámetros utilizados para la unión entre 22MnB5-22MnB5

Condición	Corriente (KA)	Presión (N)
1	26.1	2100
2	27.4	2100
3	26.1	2200
4	27.4	2200

Tabla 5. 2. Parámetros utilizados para la unión entre el acero 22MnB5-1006.

Condición	Corriente (KA)	Presión (N)
1	26.2	2100
2	26.8	2100
3	26.2	2200
4	26.8	2200

Una vez mencionado lo anterior, la experimentación se ajustó a la elaboración de un experimento factorial  $2^2$ , donde las variables que se estudiaron fueron corriente y presión en condiciones de bajo y alto, así como las posibles interacciones que existe entre ellas, Tabla 5.1 y 5.2.

Para la obtención de los valores que se muestran en la Tabla 5.1 y 5.2 fue necesario ajustar los parámetros a aceros de calidad y cualidad similares, según datos obtenidos en procedimientos de soldadura utilizados por la empresa, estos parámetros se observan en la Figura 5.2. Donde se aprecian los parámetros propuestos, estos parámetros se ubican a la izquierda de los parámetros utilizados por la empresa, se resalta el valor mínimo y máximo en las dos uniones estudiadas, como se observa los parámetros del 22MnB5-1006 se modificó solo la corriente y la presiones se consideraron iguales a la que se utilizaron en la unión 22MnB5-22MnB5.

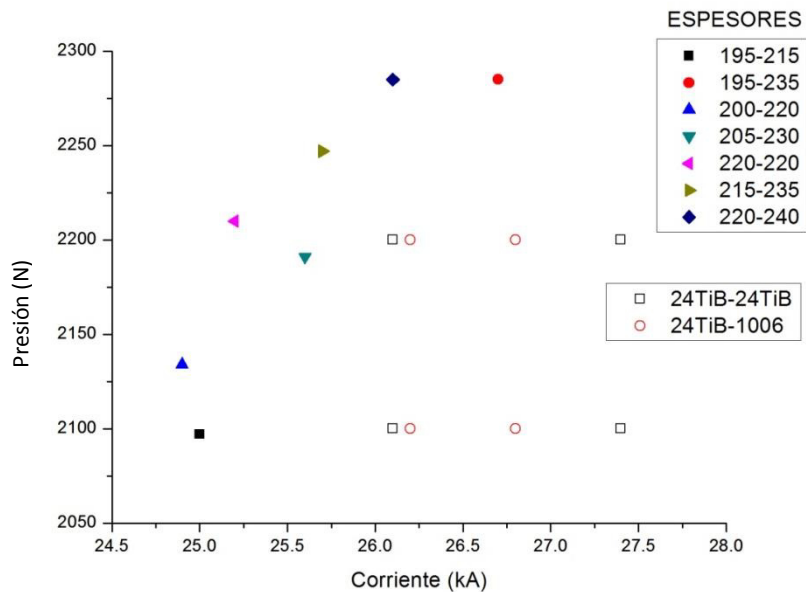


Figura 5. 2. Parámetros de soldadura [70].

## 5.2. Caracterización de los aceros.

Para la caracterización de las láminas, se realizaron químicos y ópticos del metal base, además del ensayo de microdureza Vickers.

### 5.2.1. Análisis químico cuantitativo mediante espectrometría de chispa.

Con el propósito de conocer la composición química de los aceros y determinar el carbono equivalente, se realizó un análisis químico del acero por espectrometría, conforme a la norma ASTM EA415a [63], utilizando un espectrómetro de la marca Spectrolab modelo M5 (análisis por chispa).

De acuerdo con la norma de soldadura de resistencia por puntos en componentes automotrices, el carbono equivalente máximo aprobado es 0.30 %. El carbono equivalente se calculó por la siguiente fórmula [64]

$$C.E = \%C + \% \frac{Mn}{6}$$

Ecuación. 5-2

### 5.2.2 Microscopia óptica.

Para determinar el efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura de cada una de las soldaduras, se realizó la metalografía óptica con microscopio óptico de marca VERSAMET modelo 3.

### 5.2.3. Ensayos de microdureza vickers.

Los ensayos de microdureza en el metal base se realizaron para comprar la microdureza antes y después de la soldadura. Se llevaron a cabo 9 indentaciones, tanto en la dirección longitudinal, así como en la dirección transversal, aplicando una carga de 200 g, con un tiempo de mantenimiento de 15 s, de acuerdo a la Norma ASTM E 92-00 [65]. Utilizando un microdurometro Shimadzu.

### 5.3. Ensayos de calidad de soldadura.

#### 5.3.1. Medición de la Zona centro de fusión, zona afectada térmicamente y profundidad.

Para la evaluación de soldadura se midieron diversas características de la zona transversal del cordón de soldadura, como son el diámetro de la fusión de la soldadura, ancho de la zona afectada térmicamente y la profundidad de la soldadura, estas dimensiones se describen en la Figura 5.3.

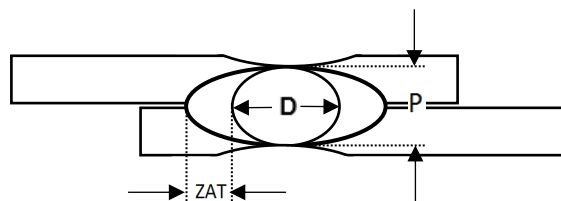


Figura 5. 3. Medición de soldadura.

Dónde:

D: Ancho de la zona de fusión.

P: profundidad de la soldadura.

ZAT: Zona afectada térmicamente.

### 5.3.2. Ensayo de tensión.

Los ensayos de tensión de corte se realizan cumpliendo con la norma AWS/SAE D8.9:2002 [67], con una velocidad de desplazamiento de cabezal de 10 mm/min. Para realizar los ensayos se utilizaron placas del mismo material ensayado como apoyo a las mordazas. El esquema de la prueba se muestra en la Figura 5.4. [67,68, 73]

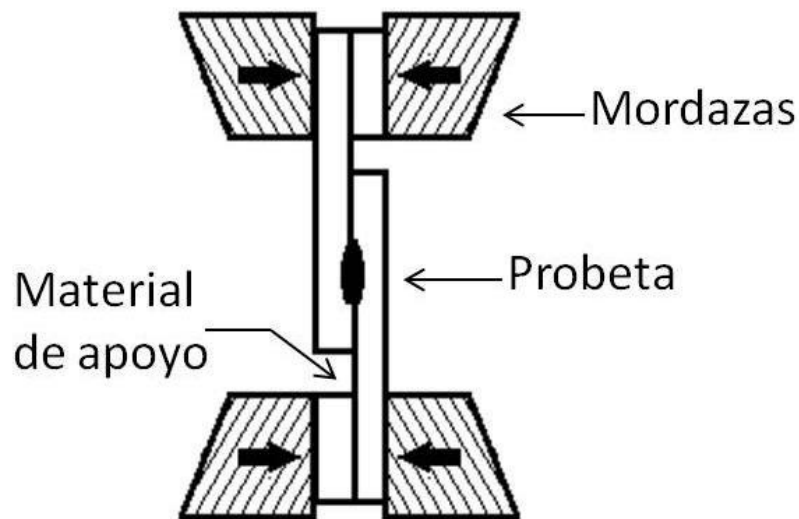


Figura 5. 4. Esquema de prueba de tensión a corte

### 5.3.2. Ensayos de microdureza.

Para cada una de las condiciones se realizó un perfil de microdureza Vickers formando una diagonal transversal que inicia en el metal base del cupón superior, atravesando el botón de fusión y terminando en el metal del cupón inferior, Figura 5.5. El perfil de microdureza se realizó de acuerdo con la norma ASTM E92 [65] con carga de 200 g y un tiempo de 15 s y con un espacio entre indentaciones de 0.4 mm [67,68].

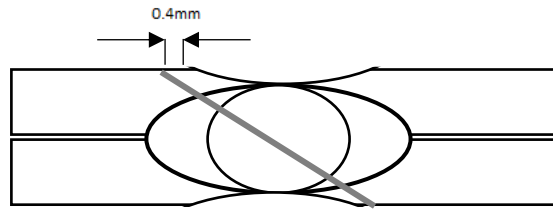


Figura 5. 5. Esquema del perfil de dureza Vickers [67,68].

### 5.3.3. Microscopía óptica.

En la Figura 5.5 se muestra el diagrama de donde se obtuvieron las micrografías tanto en las uniones soldadas 22MnB5-22MnB5 como en 22MnB5-1006, las fotos se tomaron en tres graduaciones, 50X, 100X y 500X respectivamente.

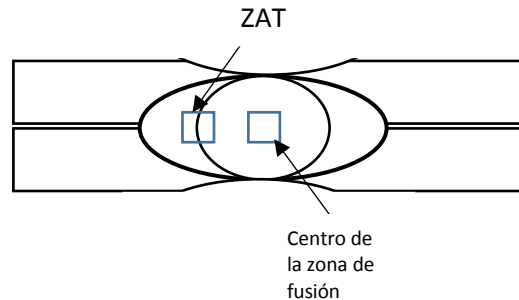


Figura 5. 6. Diagrama de la ubicación de la toma de micrografías en uniones soldadas.

### 5.4. Diseño factorial $2^2$ .

De las respuestas antes obtenidas, de dimensiones del cordón de soldadura, microdureza y tensión, se ajustaron al diseño de factorial de  $2^2$ , donde, se realizaron cuatro replicas, en todos los experimentos. Además, en todos los casos se elaboró el Diagrama de Cubo, ANOVA, y el Diagrama de Pareto, descritos en el capítulo anterior, esto con el fin de una mejor comprensión de los datos arrojados por el análisis.



## Capítulo VI.

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se presentan y se discuten los resultados obtenidos de la caracterización de los diferentes aceros y, de las uniones soldadas, así como de los ensayos de calidad de soldaduras. La presentación de esta información se hizo el orden establecido en la metodología experimental mostrada en el Capítulo 5 en el que se establece como principal diferencia la composición química de las láminas, por lo que los resultados se catalogan de acuerdo a estas condiciones.

#### 6.1. Caracterización de los aceros.

##### 6.1.1. Análisis químico de los aceros.

La Tabla 5.1, presenta el análisis químico de los aceros conforme a la norma ASTM EA415-90, el cálculo de carbono equivalente (C.E) de acuerdo con la norma de Chrysler PS-10947 y a la Ecuación de Graville.

El porcentaje de C.E. obtenido según la Norma Chrysler PS-10947 para el 22MnB5, de 0.4645%, lo hace susceptible a la fisuración en frío de la zona afectada térmicamente, puesto que el valor máximo permitido es de 0.30%, caso contrario al 1006, donde se obtuvo un valor de 0.1731%. De acuerdo al Diagrama de Graville confirma lo mencionado, ubicando el 22MnB5 en la Zona II del Diagrama, donde se recomienda cuidado en la velocidad de enfriamiento, en cambio el 1006 se encuentra ubicado en la Zona I, donde no presentaría ningún inconveniente al soldarse.

##### 6.1.2. Microscopía óptica.

En la Figura 6.1 se muestra la microestructura del acero 22MnB5 y en la 6.2 la del acero 1006. Se puede observar que la microestructura del acero 22MnB5, es ferrítica perlítica, bandeada por la dirección del rolado en frío, en cambio en el 1006 se observa la presencia de perlita en una matriz ferrítica.



Figura 6. 1. Microestructura del acero 22MnB5.

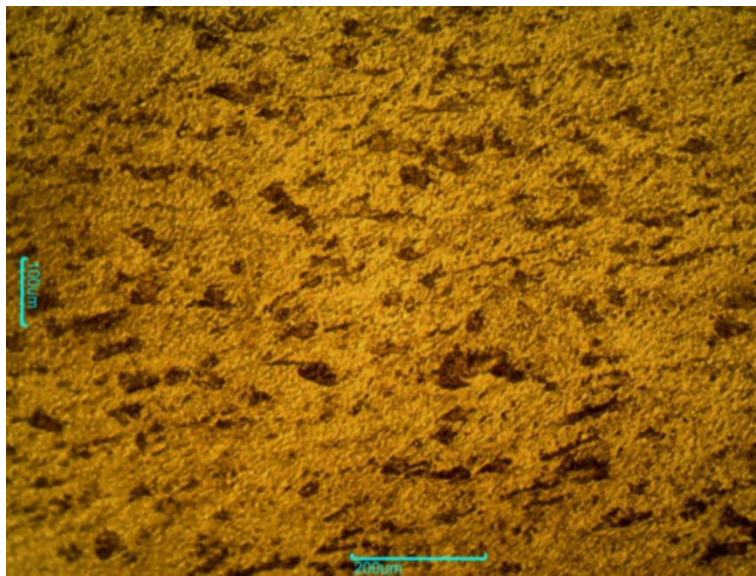


Figura 6. 2. Microestructura del acero 1006.

Tabla 6. 1. Análisis químico de los aceros

<b>Variable a determinar %</b>	<b>22MnB5</b>	<b>1006</b>
<b>C</b>	<b>0.257</b>	<b>0.071</b>
<b>Mn</b>	<b>1.242</b>	<b>0.613</b>
<b>P</b>	0.012	0.02
<b>S</b>	0.0014	0.0045
<b>Ni+Cr+Mo</b>	0.0336	0.033
<b>Nb+Ti+V</b>	0.037	0.045
<b>Si</b>	0.212	0.022
<b>B</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.0002</b>
<b>C.E</b>	<b>0.464</b>	<b>0.1731</b>
<b>C.E. Graville</b>	<b>0.5067</b>	<b>0.1843</b>

### 6.1.3. Propiedades mecánicas de los aceros.

En la Tabla 6.2, se muestra las propiedades mecánicas más relevantes de los aceros. Donde el acero 22MnB5 presenta una microdureza de  $243 \pm 8.37$  HV, el acero 1006 presenta una microdureza de  $189 \pm 8.15$  HV.

Tabla 6. 2. Propiedades mecánicas de los aceros [71, 72].

<b>Propiedad mecánica</b>	<b>Acero</b>	
	<b>22MnB5</b>	<b>1006</b>
<b>Esfuerzo máximo</b>	500 – 700 MPa	330 MPa
<b>Esfuerzo a la cedencia</b>	320 – 550 MPa	285 MPa
<b>Porcentaje de elongación</b>	6 %	20 %
<b>Microdureza</b>	243±8.37 HV	189±8.15 HV

### 6.2. Ensayos de calidad de la soldadura.

Se evaluó la calidad de la soldadura con los criterios que se describieron en el capítulo anterior, mediante los ensayos de tensión y microdureza, se analizó la calidad de la unión. Para completar el estudio de la calidad se estudió la geometría del cordón de soldadura para tratar de comprender los fenómenos que ocurren.

Para facilitar la comprensión de lector las uniones soldadas se expresarán como 22MnB5-22MnB5 y 22MnB5-1006.

### 6.2.1. Macrográficas de la unión 22MnB5-22MnB5.

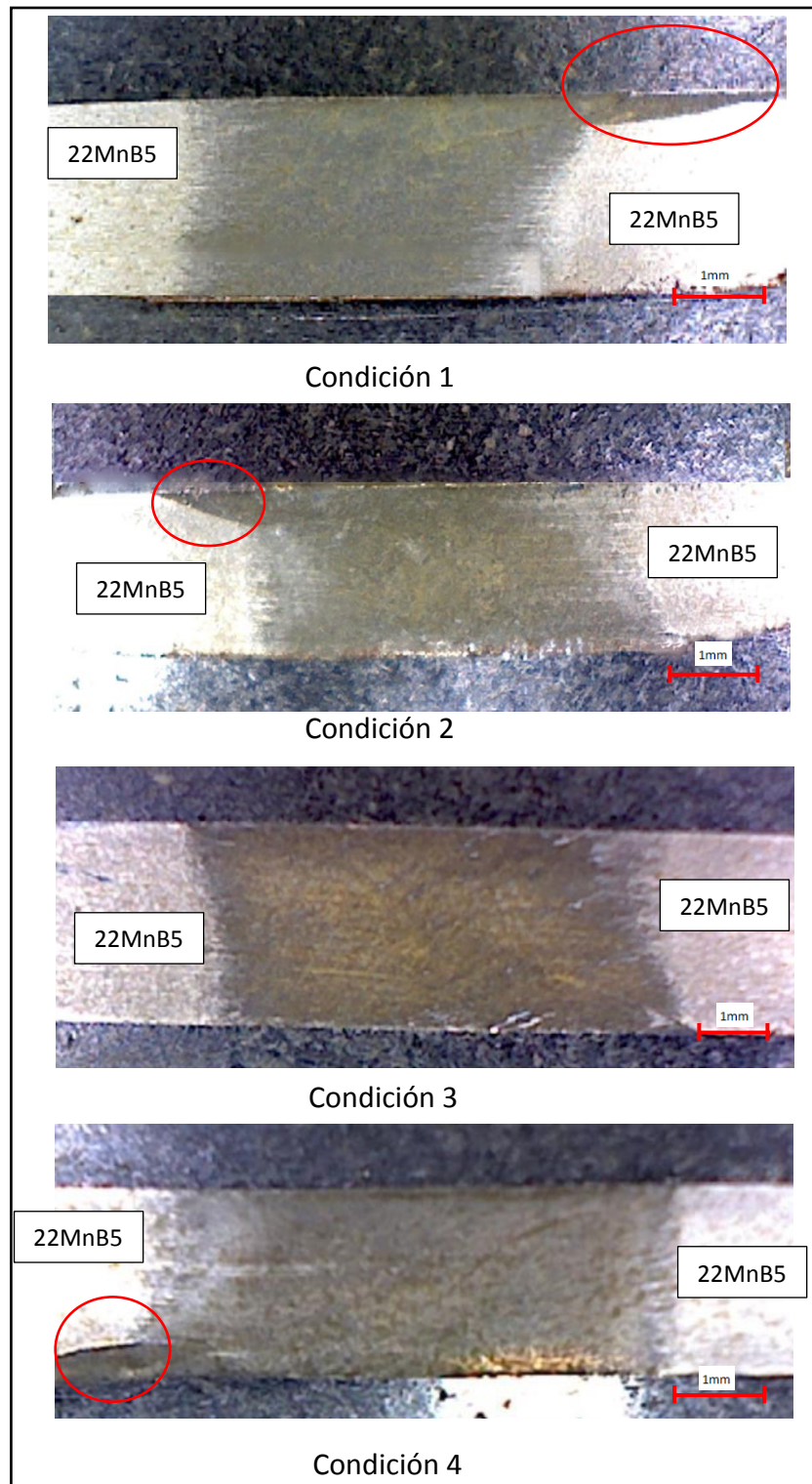


Figura 6. 3. Sección transversal del cordón de soldadura para cada condición entre 22MnB5-22MnB5.

En la Figura 6.3 se muestra la geometría de la zona de fusión del cordón de soldadura entre 22MnB5-22MnB5, la condición 3 muestra un diámetro de fusión más homogéneo, en cambio en las demás condiciones muestra que existe un exceso de diámetro, en la cual se resalta por un círculo. Por otra parte, la condición 1 muestra una irregularidad en el diámetro de la zona de fusión, ya que hay una reducción de diámetro.

#### 6.2.2. Micrografías de 22MnB5-22MnB5.

En la Figura 6.4 se muestra el diagrama de donde se obtuvieron las micrografías tanto en 22MnB5-22MnB5 como en 22MnB5-1006, las fotos se tomaron en tres graduaciones, 50X, 100X y 500X respectivamente. Las Figuras 6.5 a 6.8, presentan las microestructuras simbólicas de la zona de la interfase (límite de fusión) y del centro de la zona de fusión del cordón de soldadura en la unión de los aceros 22MnB5-22MnB5.

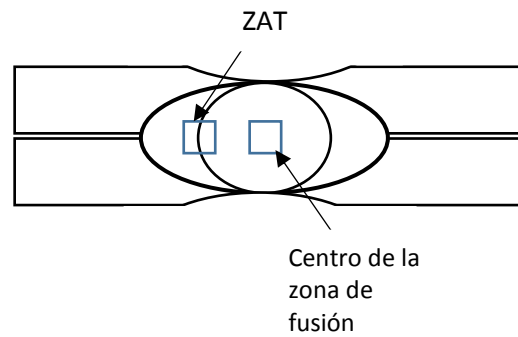


Figura 6. 4. Diagrama de la ubicación de la toma de micrografías en las dos uniones.

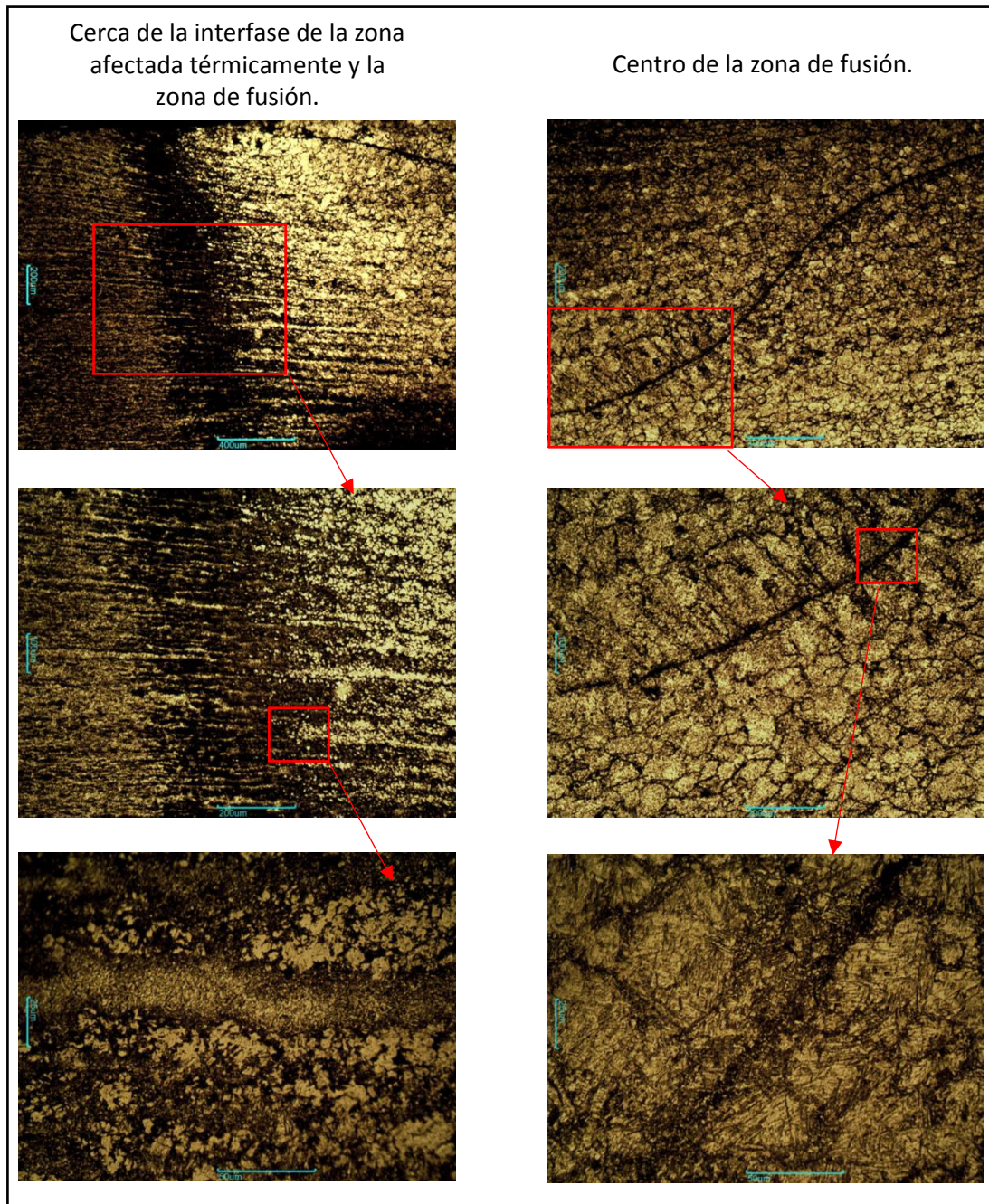


Figura 6. 5. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 1), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente.

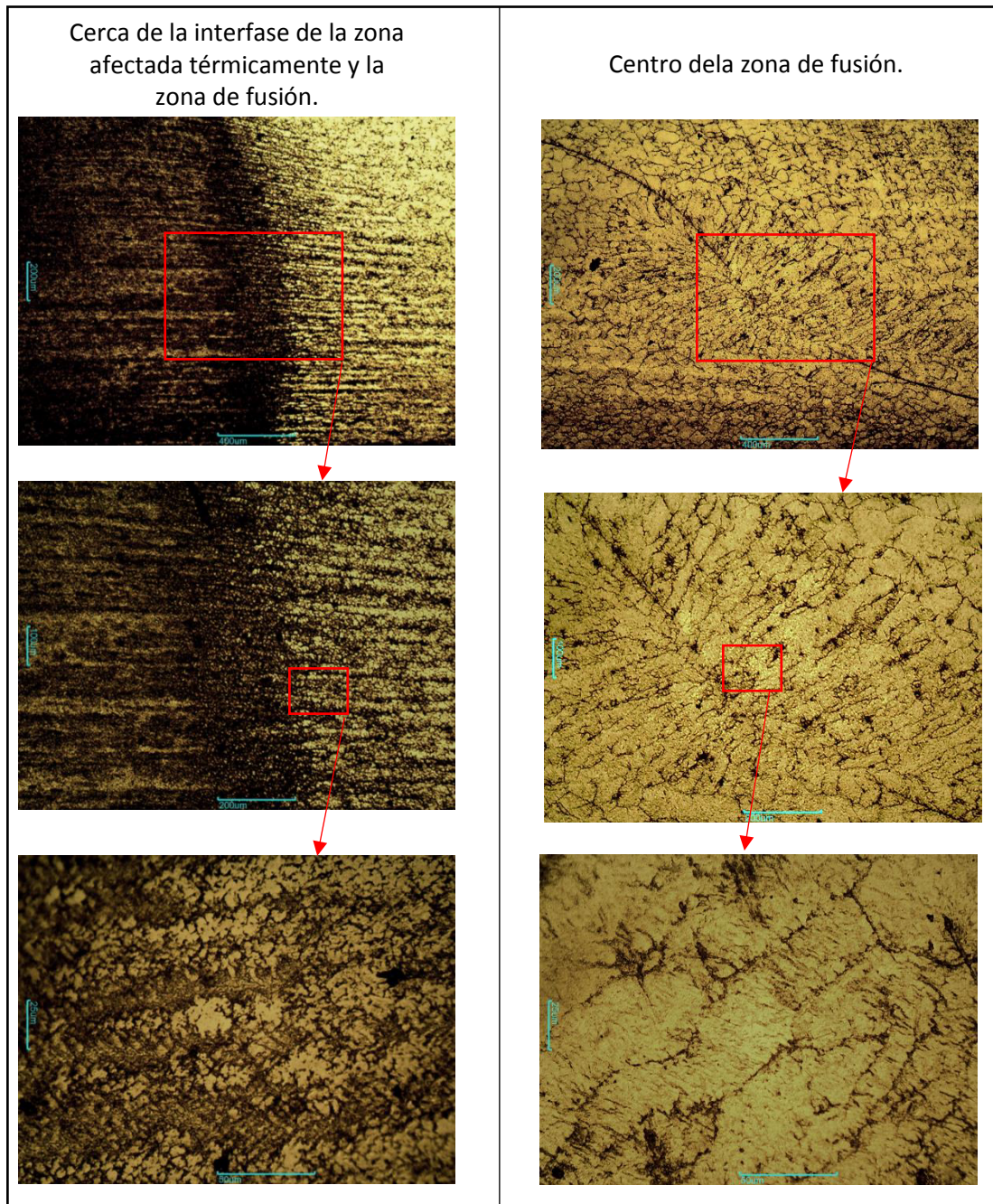


Figura 6. 6. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 2), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente.



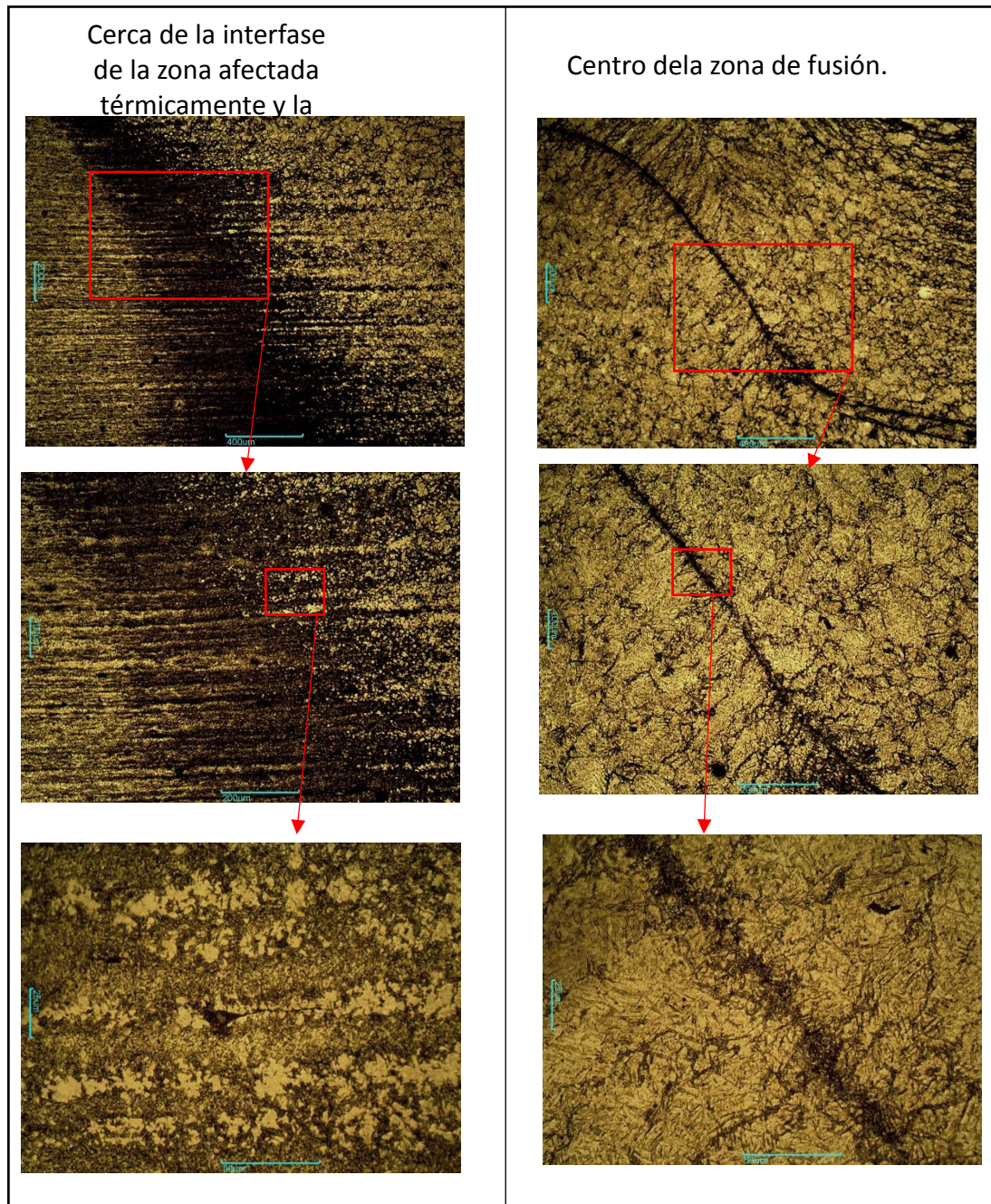


Figura 6. 7. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 3), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente.

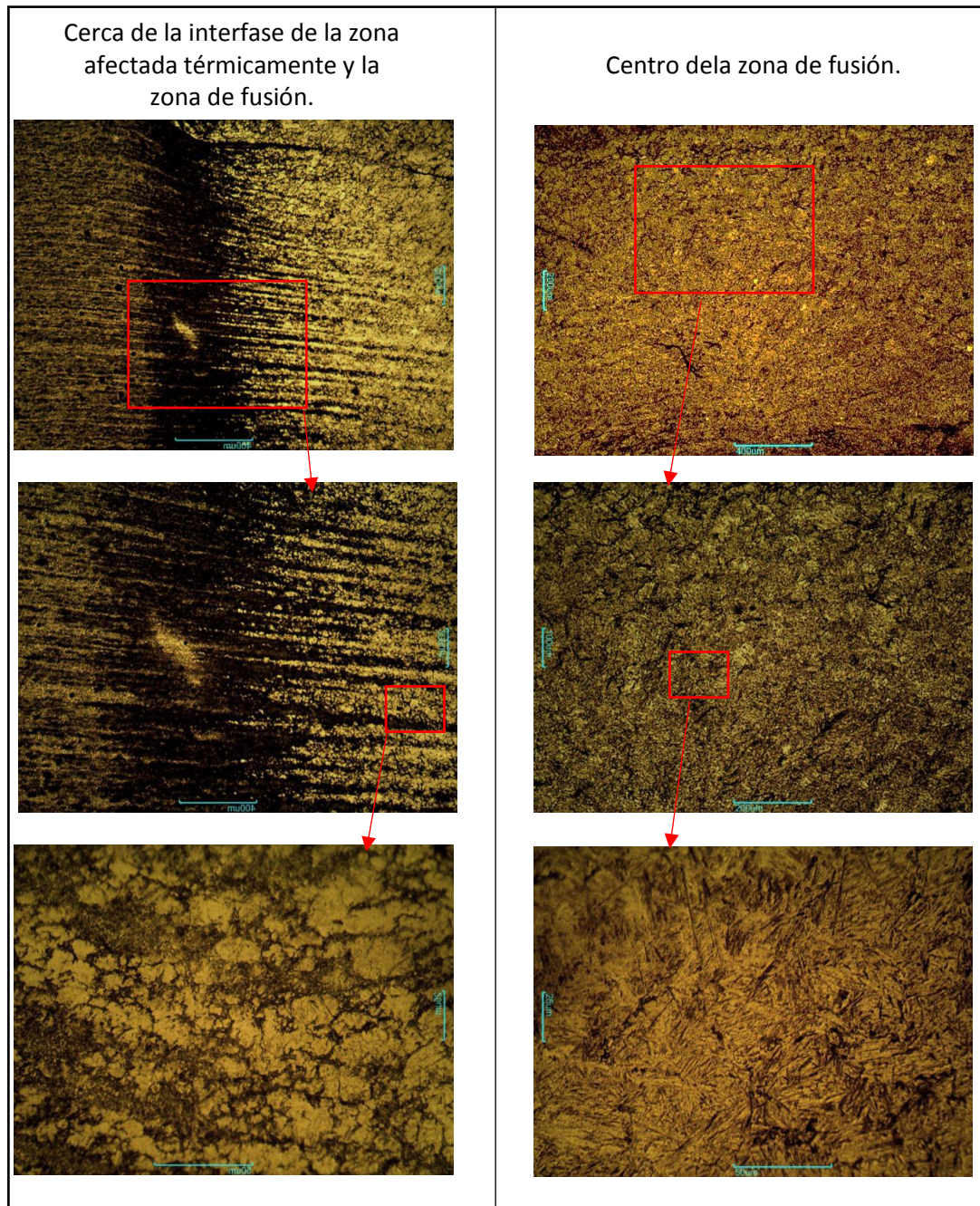


Figura 6. 8. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 4), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente.

La zona de fusión es donde el material base alcanzó temperatura de aproximadamente 1600°C asegurando acero líquido, inmediatamente después solidifica rápidamente por el enfriamiento a través de los electrodos. La trayectoria de transformación de fase de acuerdo al diagrama hierro-carbono: líquido ferrita  $\delta$ , austenita  $\gamma$ , martensita  $\alpha'$  y bainita.

Debido a la composición química del 22MnB5 y la velocidad de enfriamiento, en las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 presentaron micrografías en la zona de fusión compuestas por granos columnares y aciculares con estructuras martensíticas laminares, los primeros están orientados por la trayectoria de solidificación, en cambio los aciculares se encuentran ligeramente orientados por la dirección de laminación, así mismo cerca de la zona centro de fusión se aprecian fracturas, no así para la Figura 6.8 donde no muestra fractura y la zona de fusión es compuesta por martensita y bainita laminares.

En la zona afectada térmicamente, desde el punto de vista metalúrgico, se observan tres zonas: supercrítica, intercrítica y subcrítica. La zona supercrítica se divide en dos regiones crecimiento de grano y refinamiento de grano. En la región de refinamiento de grano la microestructura es principalmente ferrítica con escasa martensita y un tamaño de grano mucho más fino que el grano del metal base, ver Figura 6.5 a 6.8. De acuerdo con la literatura la zona intercrítica alcanza un pico de temperatura menor que la región supercrítica, produciendo una transformación de fase parcial y La zona subcrítica aparecieron algunos precipitados muy finos.

La zona afectada térmicamente de la unión 22MnB5-22MnB5 se muestra en la Figura 6.9 donde se aprecian todas las zonas que forman parte de ésta, supercrítica, intercrítica y subcrítica. En la región supercrítica se aprecia un refinamiento del grano ferrítico-perlítico y como éste sufre un cambio de tamaño de grano conforme se va hacer acercando a la zona de fusión.

En la region intercrítica, se muestra una estructura ferrítica de tamaño de grano muy similar al del metal base (22MnB5). En la región intercrítica no se observa un cambio aparente de fase.

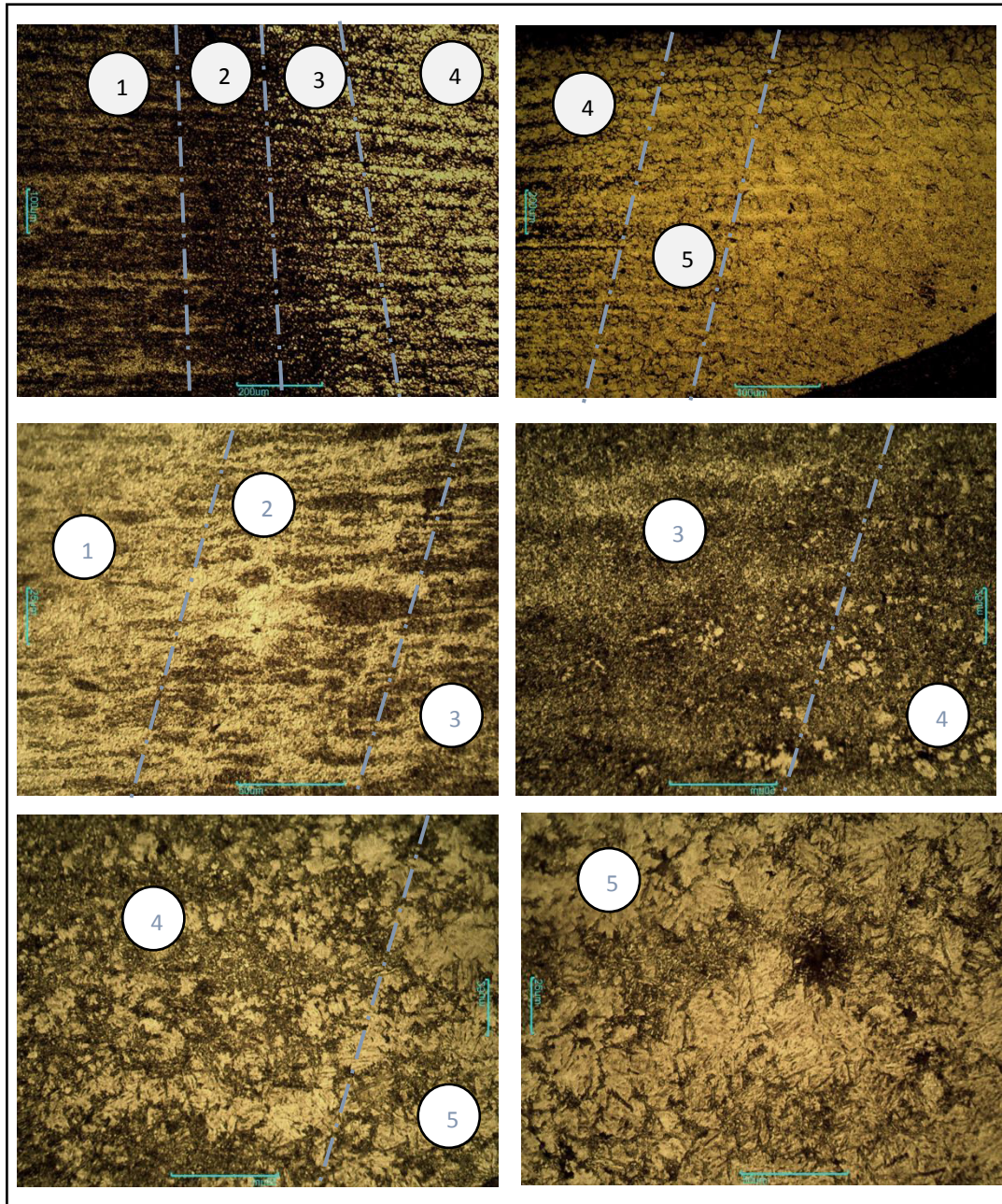


Figura 6. 9 Microestructura de la zona afectada térmica del acero 22MnB5 a 50x,100x 500x. El 5 y 4 corresponden a la región supercrítica, el 3 corresponde a la región intercrítica, el 2 corresponde a la región subcrítica y el 1 corresponde metal base.

### 6.2.3. Medición de la zona transversal del cordón de soldadura 22MnB5-22MnB5.

Según la Norma AWS D8.1M [69] el diámetro mínimo de fusión para que la soldadura de resistencia eléctrica sea aceptable debe ser mayor a 4.5 mm, para las uniones 22MnB5-22MnB5 se observa que todas las condiciones cumplen con esta norma, siendo la condición 2 y 3 las que tiene un mayor diámetro de fusión y una mejor homogeneidad en sus mediciones de aproximadamente 5 a 5.5 mm, ver Figura 6.10. Con lo que respecta a la profundidad de la zona de fusión la condición 1 y 3 a una corriente constante de 26.1 KA muestra una mayor homogeneidad, Figura 6.11, el tamaño de la zona afectada fue muy regular en todas las condiciones a excepción de la condición 2 donde se observa que llegó a obtener un valor de 1.4 mm ver Figura 6.12.

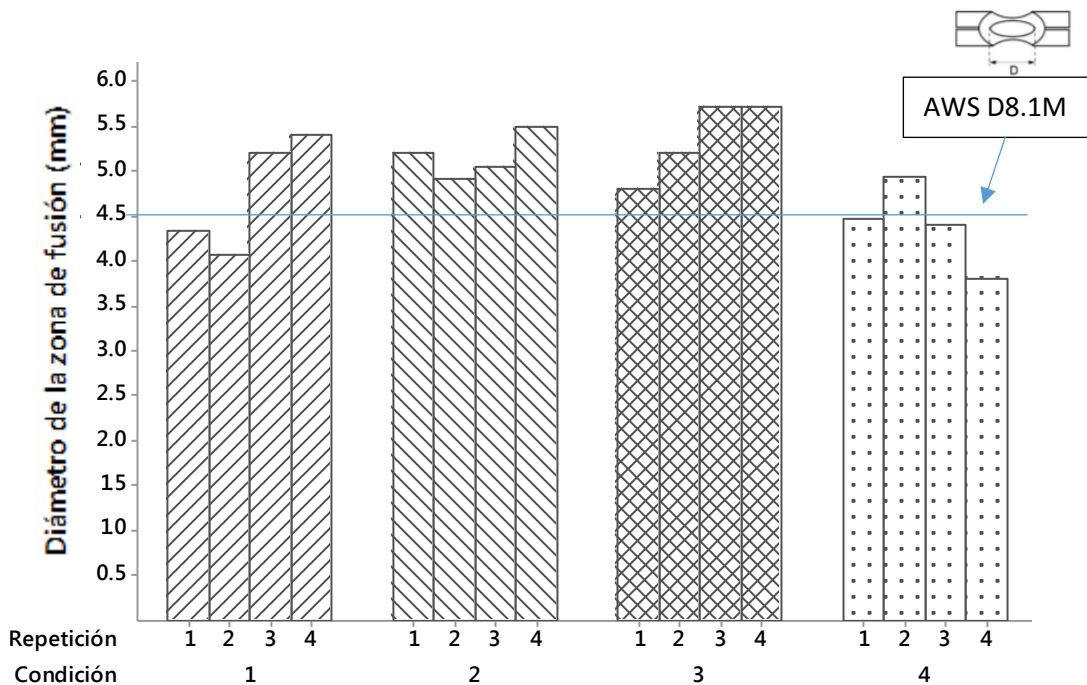


Figura 6. 10. Medición de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para las soldaduras 22MnB5-22MnB5.

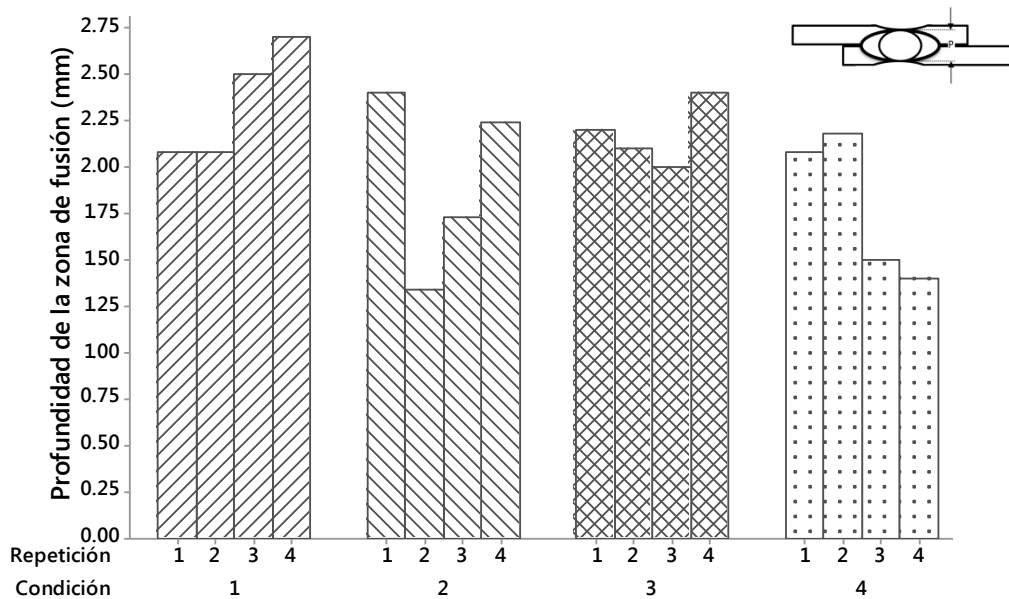


Figura 6. 11. Medición de la profundidad de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para las soldaduras 22MnB5-22MnB5.

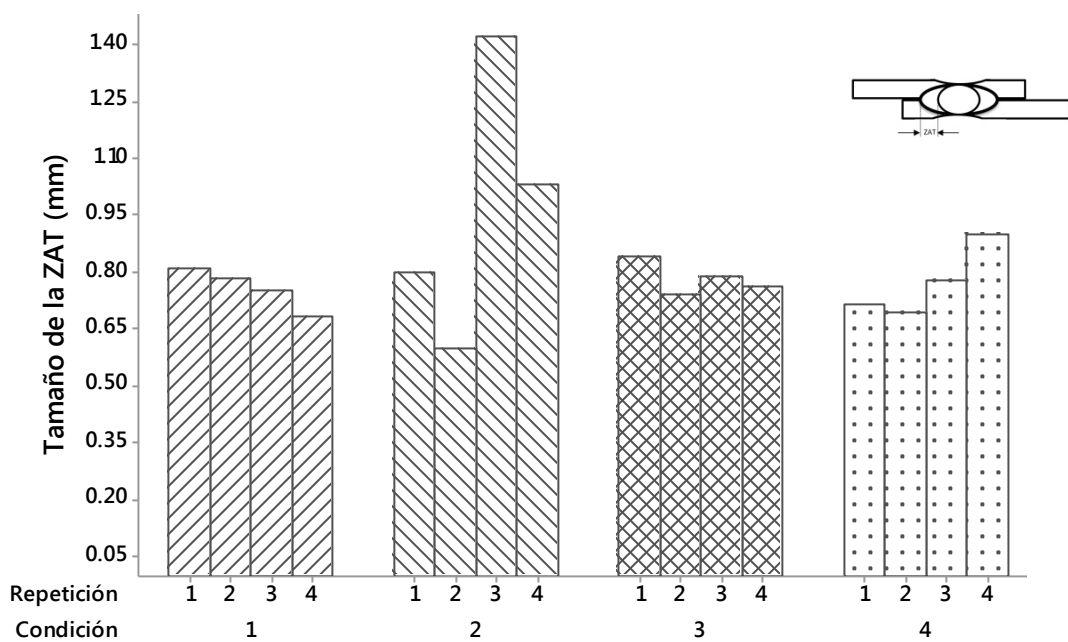


Figura 6. 12. Medición de la Zona afectada térmicamente (ZAT) de cada una de las corridas y condiciones para las soldaduras 22MnB5-22MnB5.

#### 6.2.4. Microdureza de la soldadura 22MnB5-22MnB5.

Los resultados de microdureza de la sección transversal de cada cordón de soldadura se muestran en la Figura 6.13 a 6.16 para 22MnB5-22MnB5, se muestra que los valores más altos se encuentran en la zona de fusión. Los valores más bajos se encuentran en la zona afecta térmicamente, más precisamente cerca del metal base. La transición de la dureza del metal base hacia la soldadura fue incrementándose gradualmente hasta llegar a la zona de fusión, Figuras 6.13 a 6.16. El incremento de la dureza fue, desde 240 HV a 470 HV en promedio, siendo el último valor el que se encuentra en la zona de fusión, solo las repeticiones 1 y 2 para la condición 1 muestra microdurezas atípicas, así como la repetición 4 en la condición 2, ver Figura 6.17.

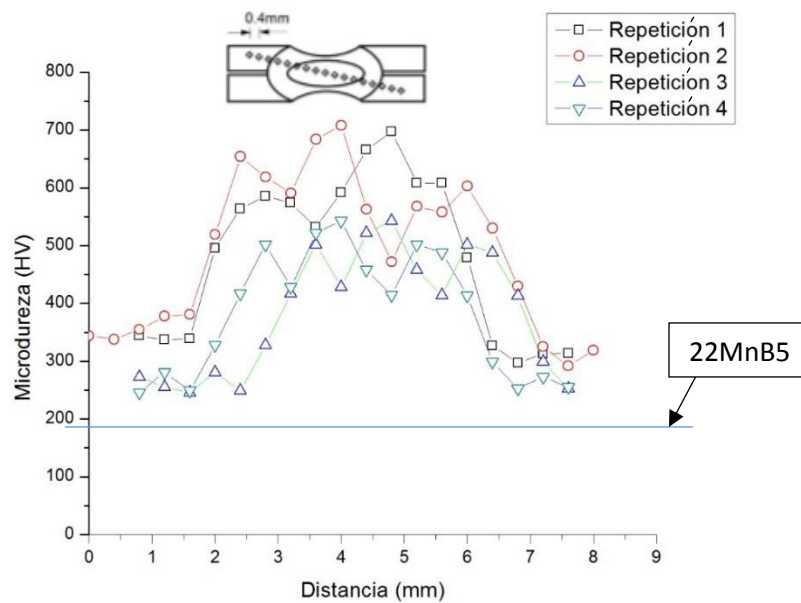


Figura 6. 13. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 1.

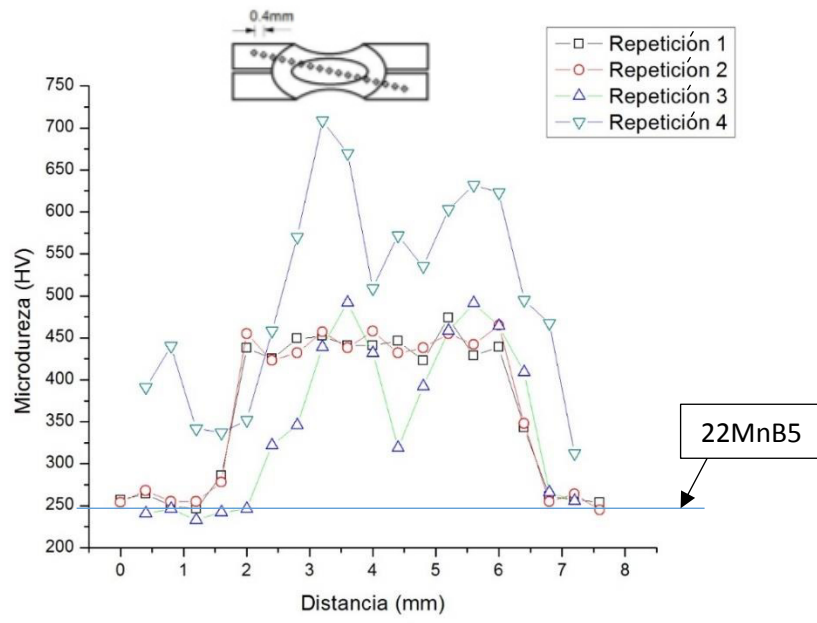


Figura 6. 14. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 2.

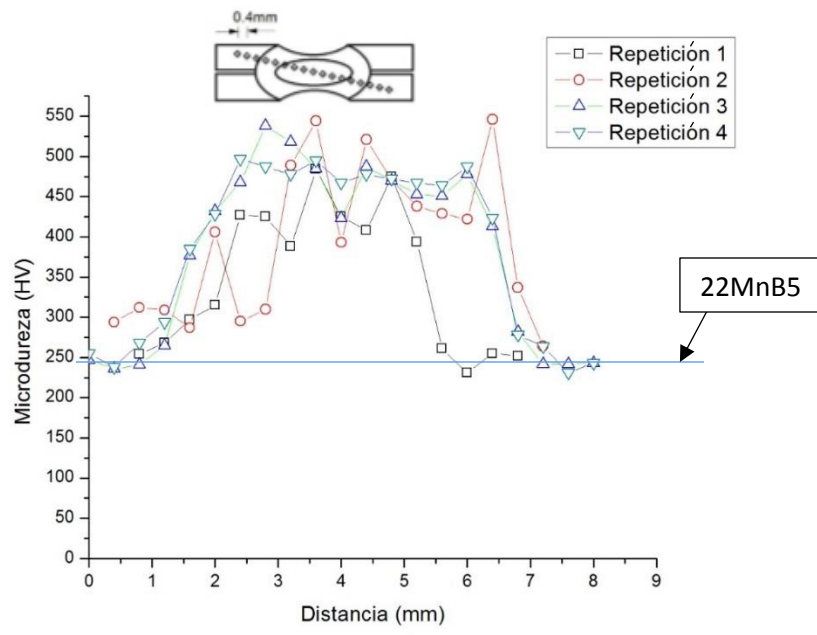


Figura 6. 15. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 3.



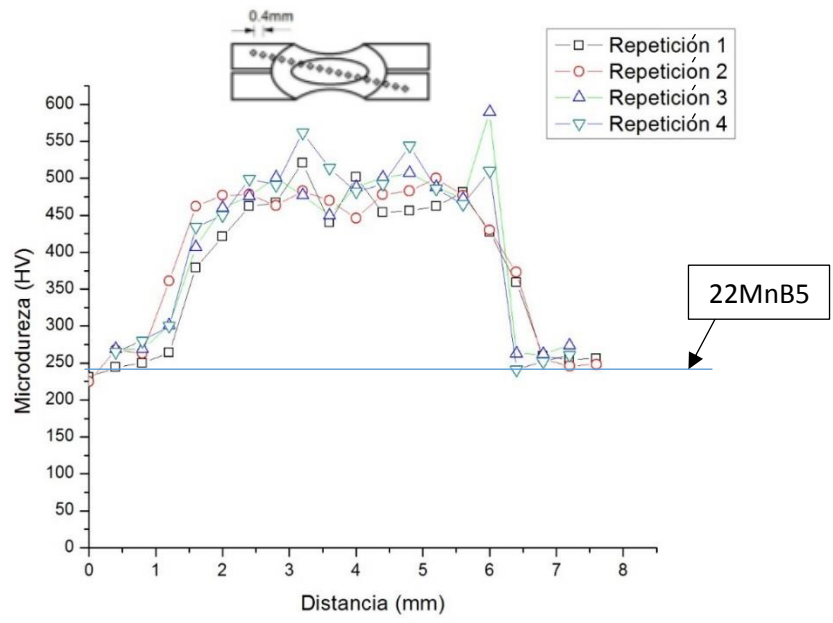


Figura 6. 16. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 4.

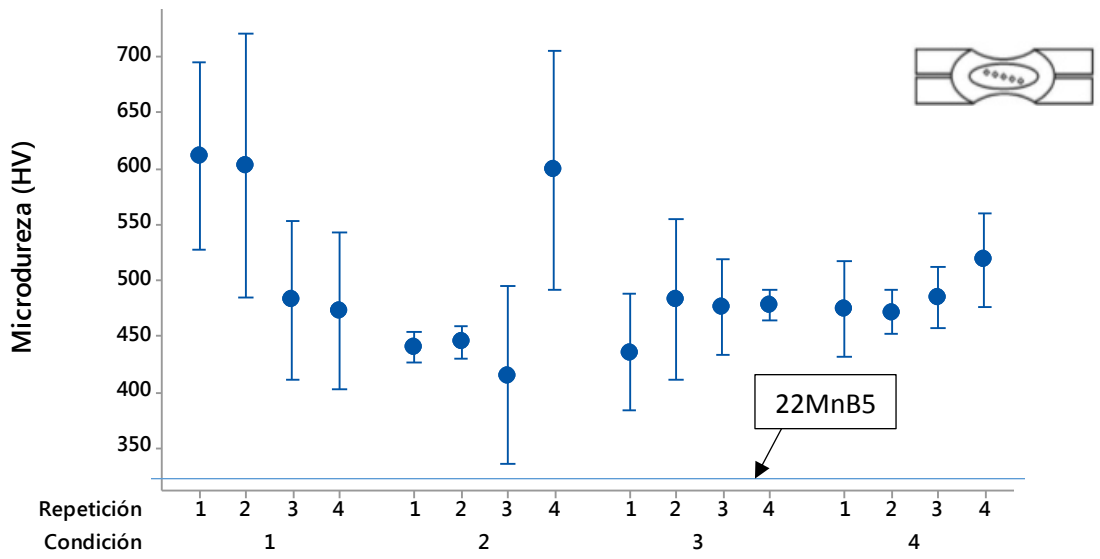


Figura 6. 17. Dureza Vickers en el centro de la zona de fusión en 22MnB5-22MnB5 para cada condición y replica.

### 6.2.5. Esfuerzo máximo 22MnB5-22MnB5.

Para los ensayos de tensión se observa que las condiciones 3 y 4, corrientes de soldadura de 26.1 y 27.4 KA, con una presión de electrodos constante de 2200N,

presenta mayor resistencia, además de que sus valores no presentaron variación en ninguna de sus repeticiones ver Figura 6.18, también se observó que estas dos condiciones obtuvieron un porcentaje de deformación mayor, Figura 6.20. En la Figura 6.19 se observa la influencia que tienen los diferentes parámetros en el esfuerzo máximo, donde se observa que la presión de los electrodos influye directamente, donde la presión constante de 2200 N hizo posible la obtención del valor mayor en el esfuerzo máximo [73].

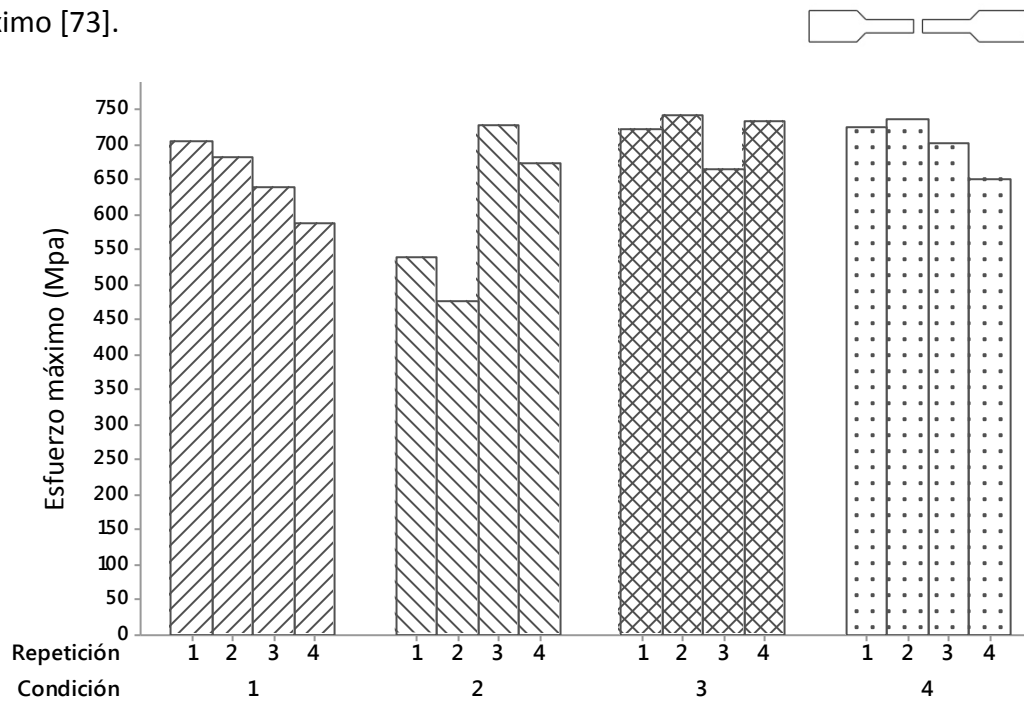


Figura 6. 18. Esfuerzo máximo de los ensayos de tensión para la unión de soldaduras 22MnB5-22MnB5.

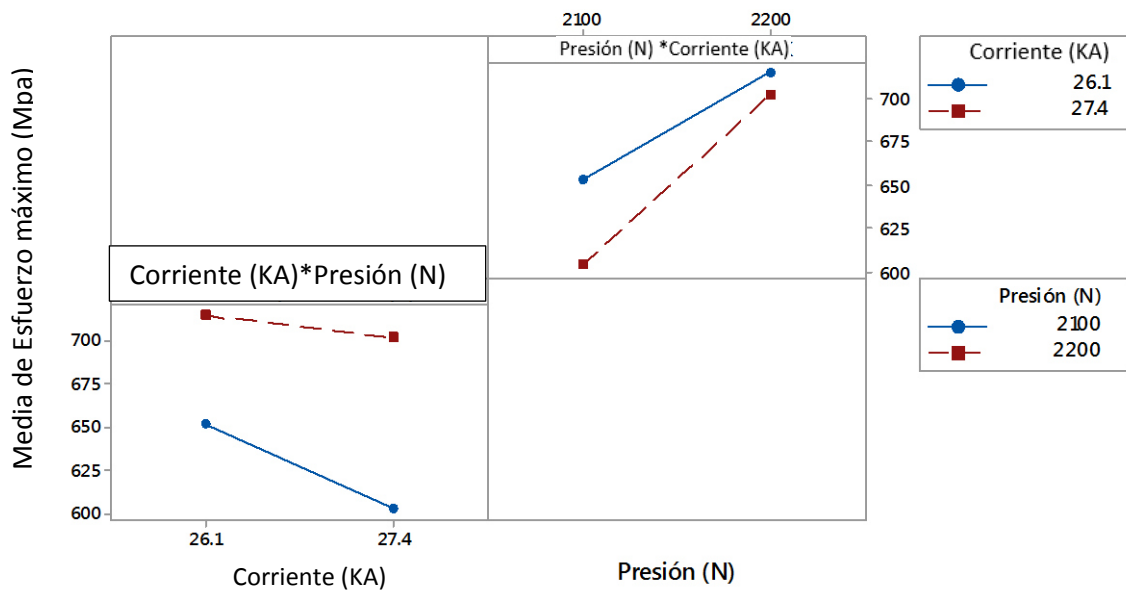


Figura 6. 19. Gráfica de interacción para esfuerzo Máximo para 22MnB5-22MnB5.

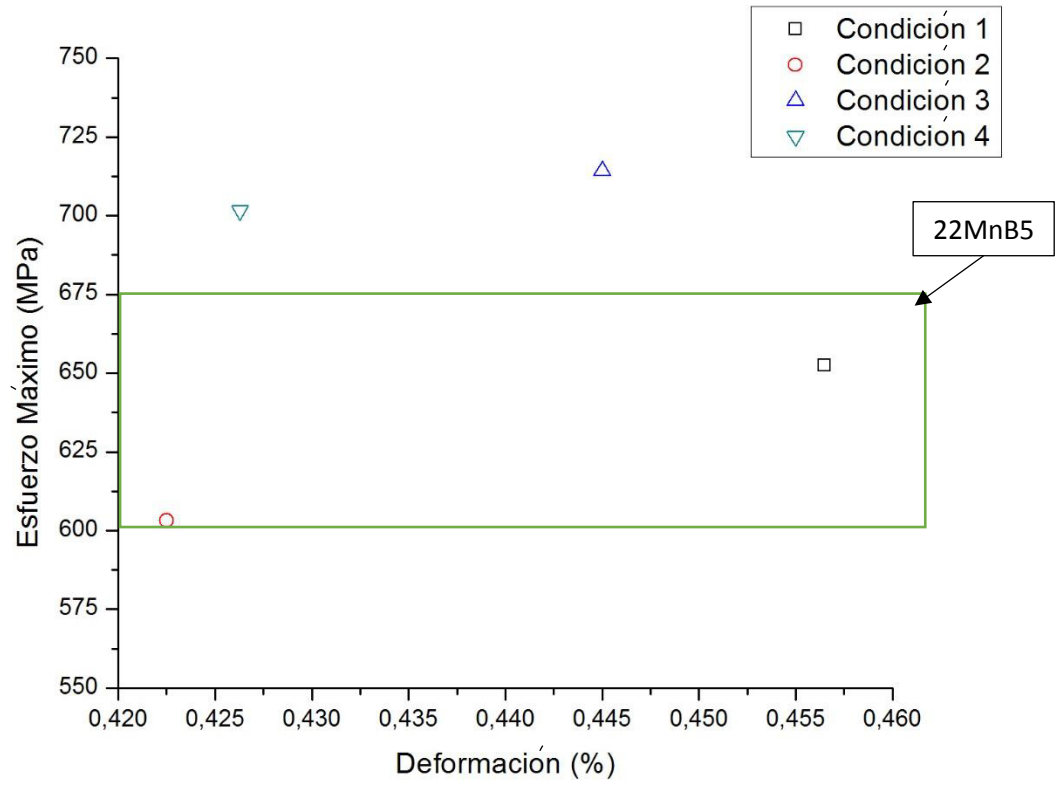


Figura 6. 20. Comportamiento mecánico a la tensión para cada condición para soldaduras 22MnB5-22MnB5.

6.2.6. Análisis de resultados soldadura disímil 22MnB5-1006

6.2.7. Macrográficas de la unión 22MnB5-1006.

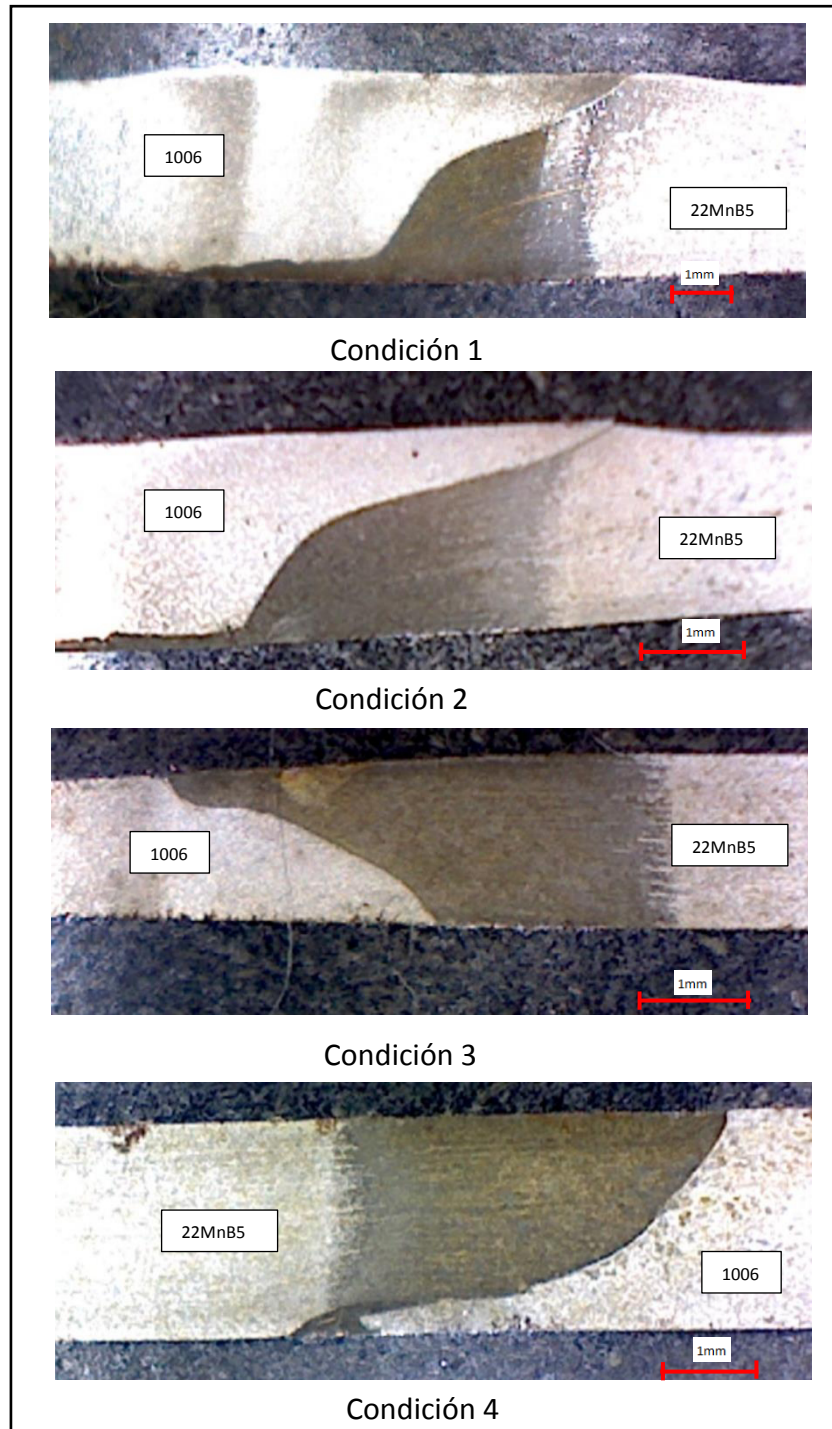


Figura 6. 21. Sección transversal del cordón de soldadura para cada condición de la unión 22MnB5-1006.

### 6.2.8. Micrografías 22MnB5-1006.

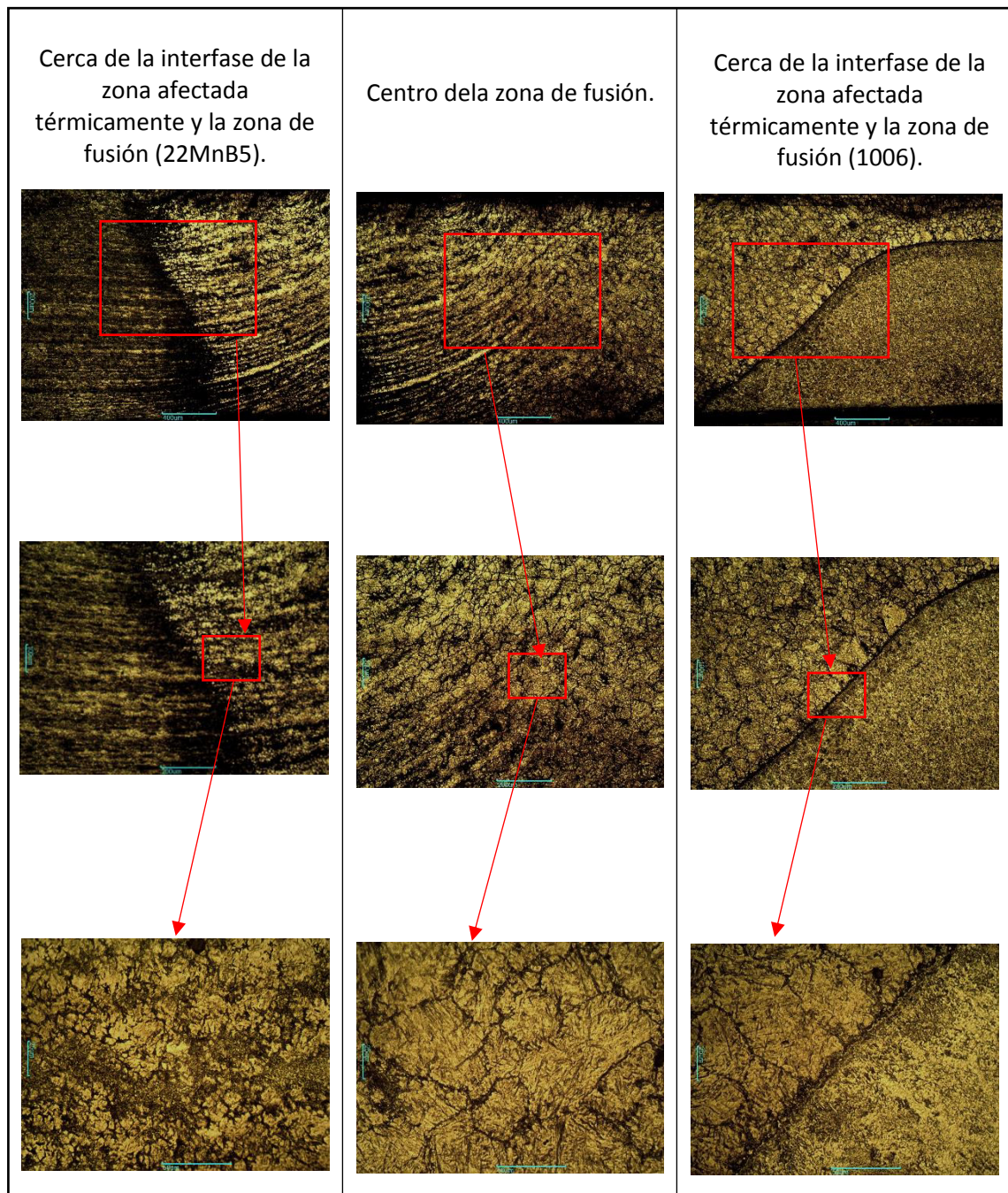


Figura 6. 22. Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 1).

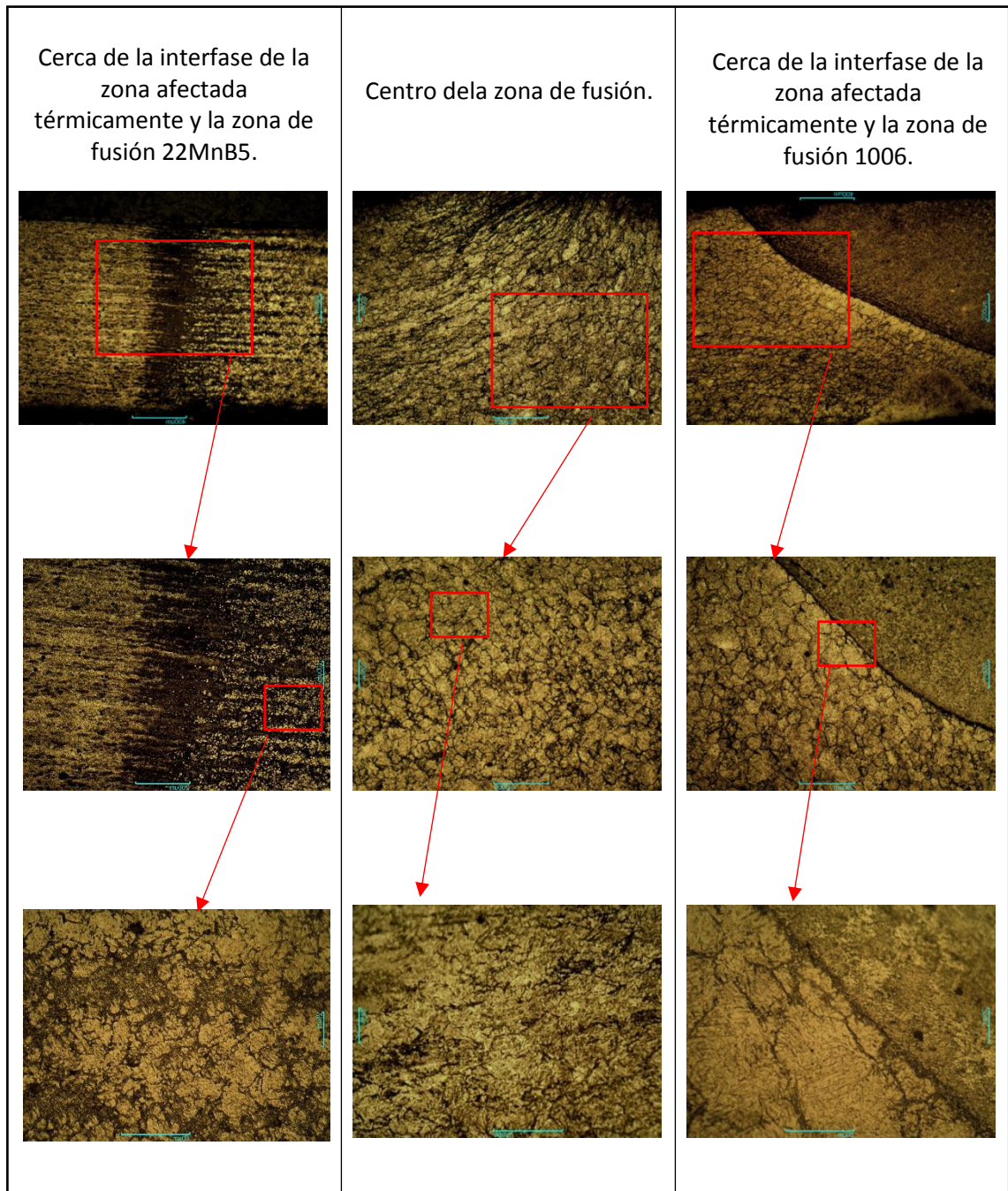


Figura 6. 23. Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 2).

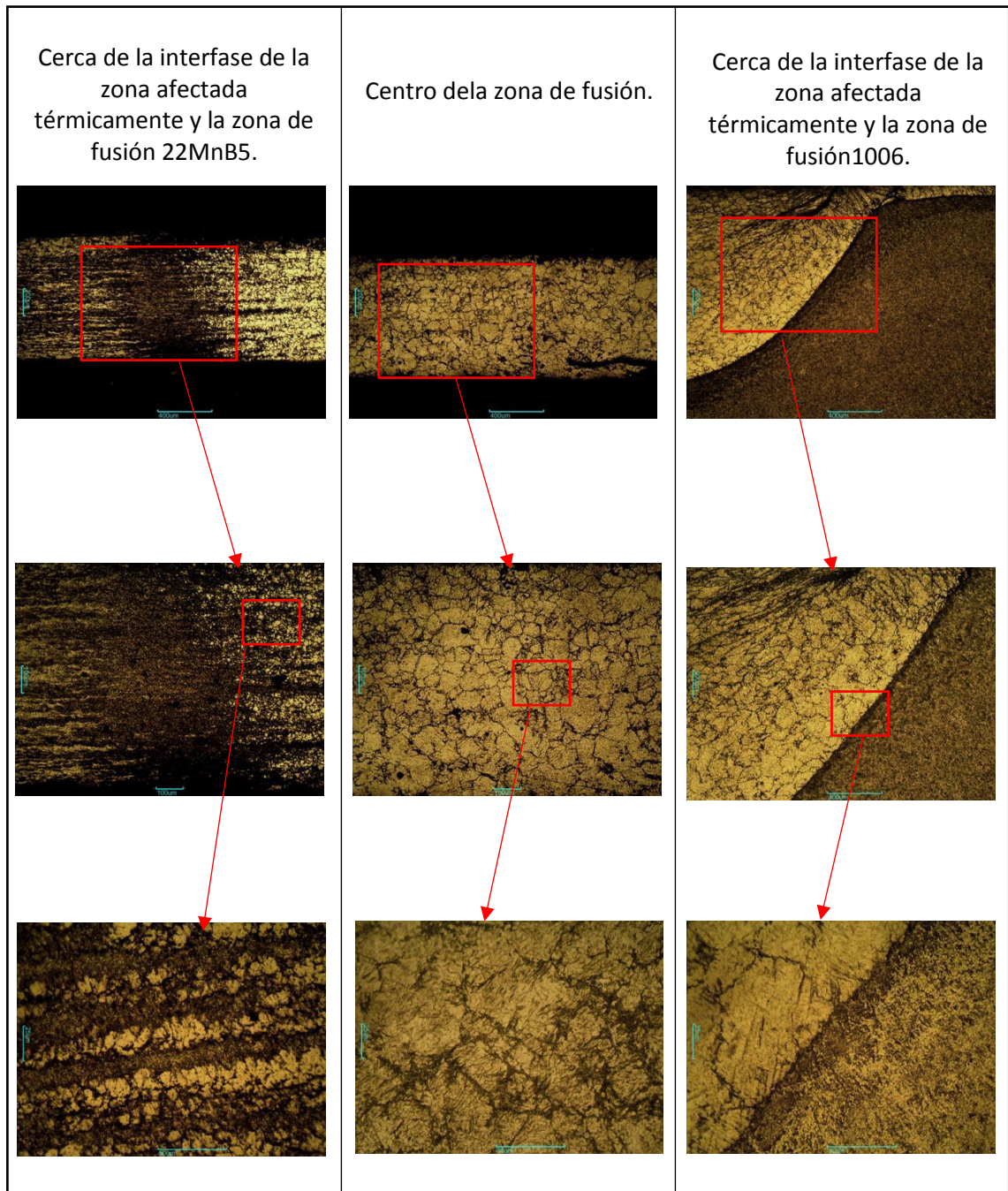


Figura 6. 24. Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 3).



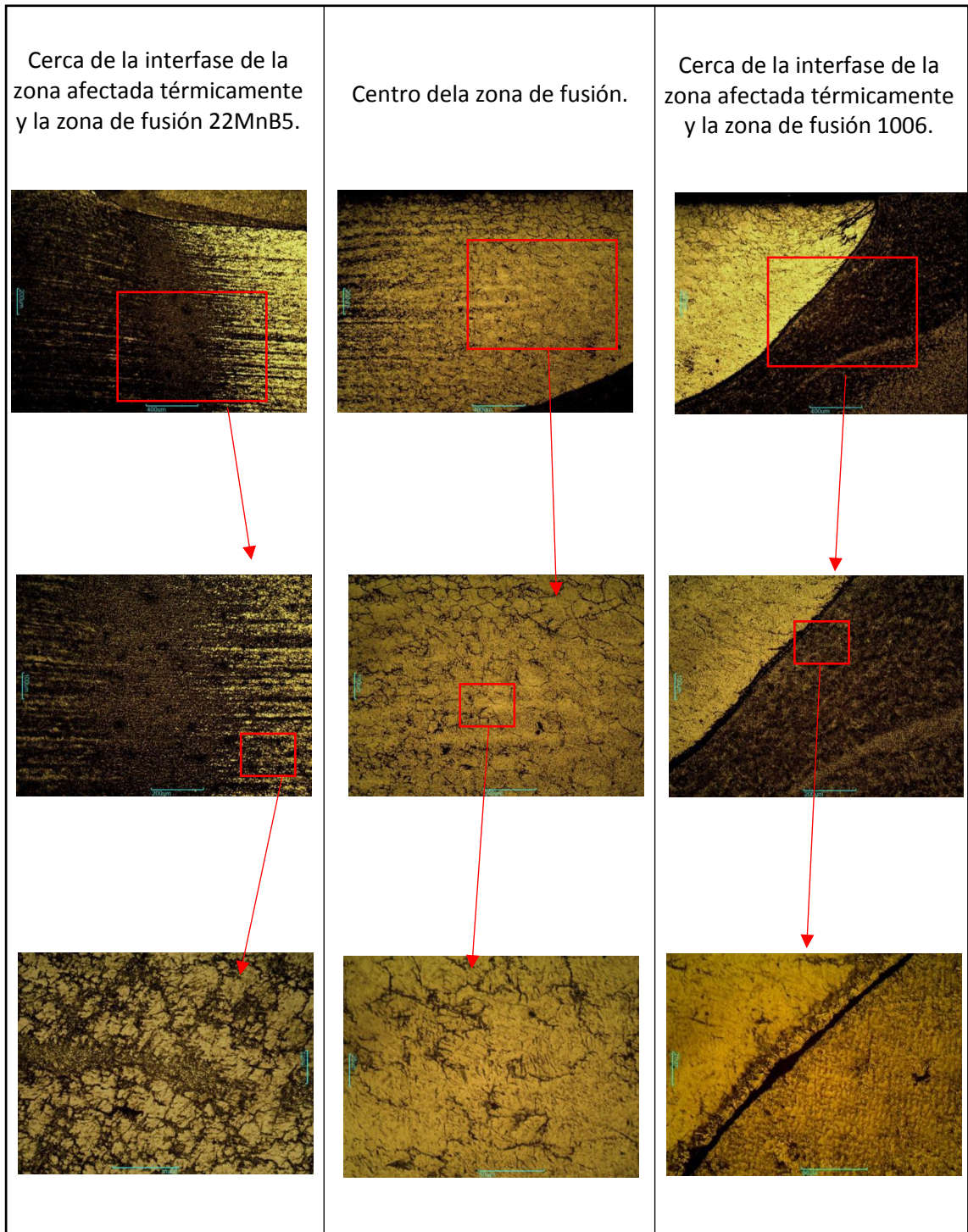


Figura 6. 25. Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 4).

Para la unión 22MnB5-1006, la Figura 6.21, muestra que la mayoría de las condiciones tuvieron una geometría irregular y presentó regiones sin soldar y fisuras entre los aceros. El diámetro de la condición 3, presentó un mayor diámetro que el resto de las condiciones.

En la Figuras 6.22 a 6.25 se observa que la microestructura de la zona de fusión está compuesta de martensita y bainita laminar a circular.

En la zona afectada térmicamente próxima al acero 22MnB5 se observa un refinamiento de ferrita de tamaño de grano muy parecido al 22MnB5. En cambio, cerca del 1006 carece de una soldadura completa, ya que en la mayoría de la zona de la línea de fusión no se observó un cambio de fase y por lo tanto no se tiene una zona afectada térmicamente, inclusive se muestran fisuras a lo largo del cambio de zona de fusión y del acero 1006, sólo se aprecia la aparición de posibles carburos.

De acuerdo a lo descrito en el Capítulo 3, en las primeras etapas de la soldadura surge la soldadura parcial por la aplicación de la presión y por las bajas temperaturas alcanzadas a esta etapa, lo que pudo haber pasado en todas las condiciones de las soldaduras disímiles 22MnB5-1006.

#### 6.2.9. Medición de la zona transversal del cordón de soldadura 22MnB5-1006.

De acuerdo a la norma AWS D8.1M, se observa que en ninguna condición cumple con el diámetro de fusión mínimo, pero la condición 3 es la que muestra un mejor tamaño de la zona de fusión como se observa en la Figura 6.26, esta misma condición es la que muestra un menor tamaño de zona afectada térmicamente, en cambio las condiciones 1 y 2 tienen una mejor profundidad ver Figuras 6.27 y 6.28 respectivamente. De acuerdo a este criterio, ninguna de las soldaduras es aceptable

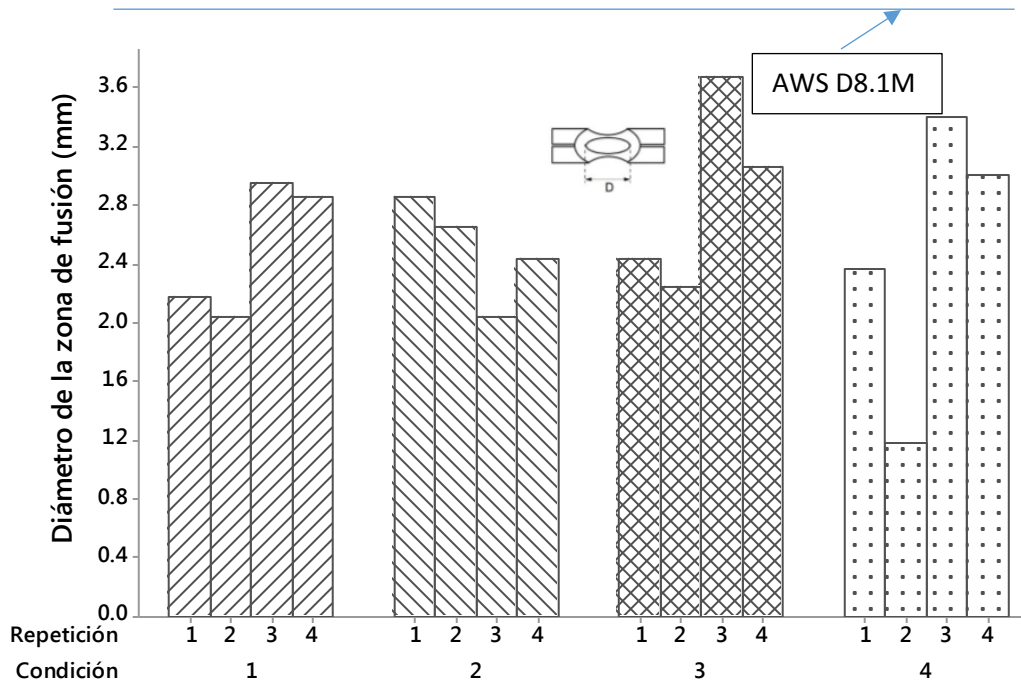


Figura 6. 26. Medición del diámetro de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para soldadura 22MnB5-1006.

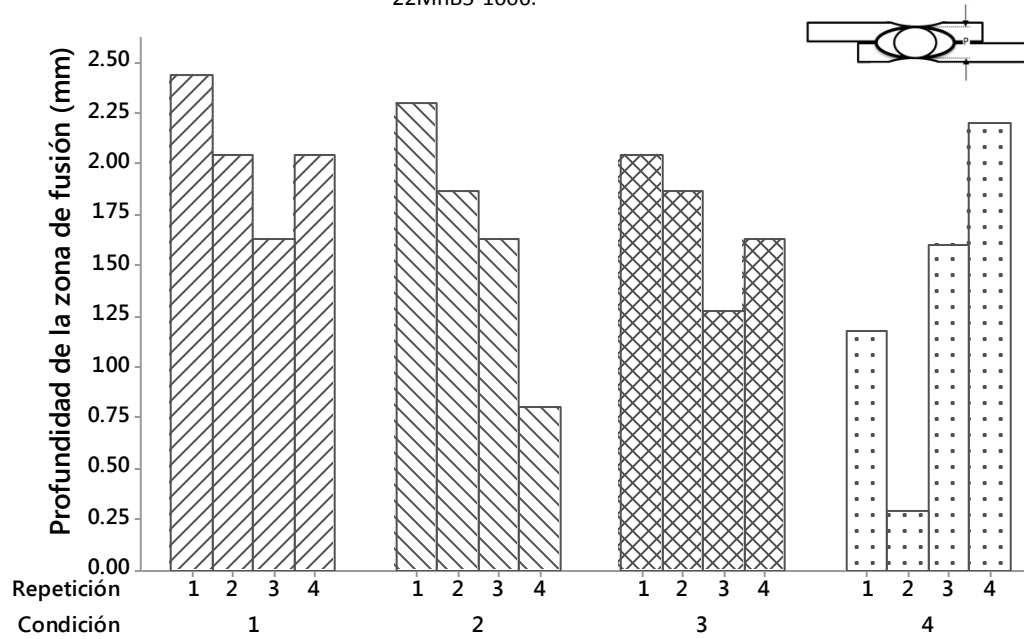


Figura 6. 27. Medición de la profundidad de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para soldadura 22MnB5-1006.

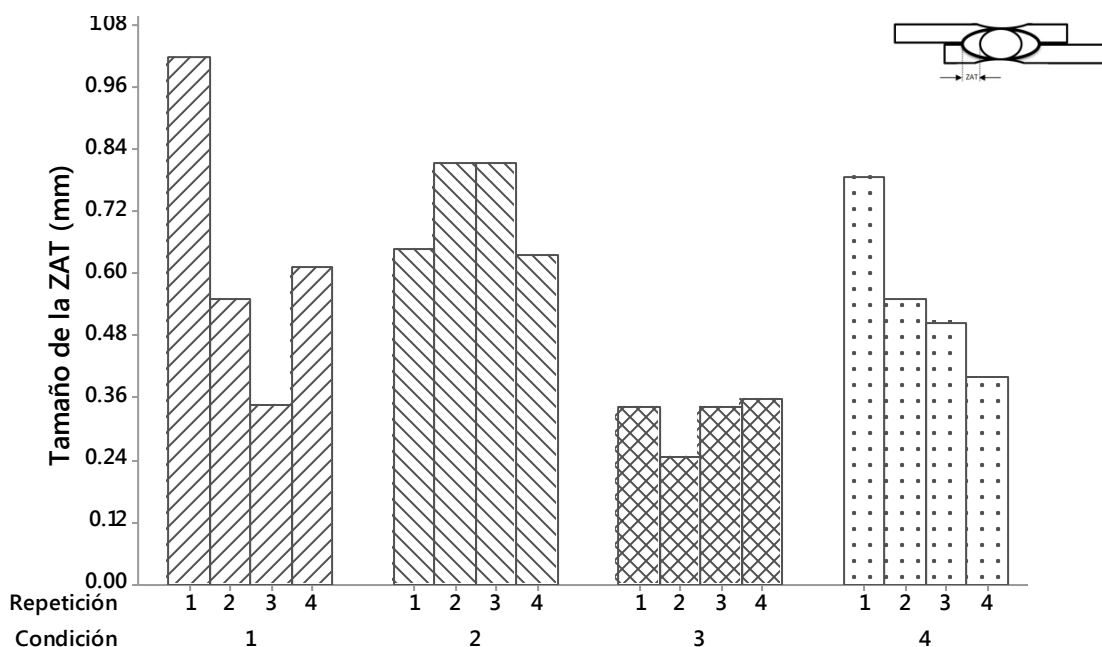


Figura 6. 28. Medición de la Zona afectada térmicamente (ZAT) de cada una de las corridas y condiciones para soldadura 22MnB5-1006.

#### 6.2.10. Microdureza 22MnB5-1006.

Se muestra que los valores más altos se encuentran en la zona de fusión. Los valores más bajos se encuentran en la zona afectada térmicamente, más precisamente cerca del metal base. A diferencia de la otra unión el cambio de dureza del 1006 hacia la zona centro de fusión se observa que fue de una forma más severa, esto confirma lo descrito en el análisis microestructural donde se menciona que no surge un cambio de fase aparente debido a la soldadura parcial que se llevó a cabo Figura 6.29 a 6.32. El incremento de la dureza fue de 200 HV a 550 HV para el 1006 y de 300 HV a 550 HV del 22MnB5.

En lo que respecta en la zona centro de fusión se observa que la condición 3 es la que muestra valores más homogéneos de microdureza comparados con las demás condiciones donde muestra una gran variedad entre repeticiones, Figura 6.33.

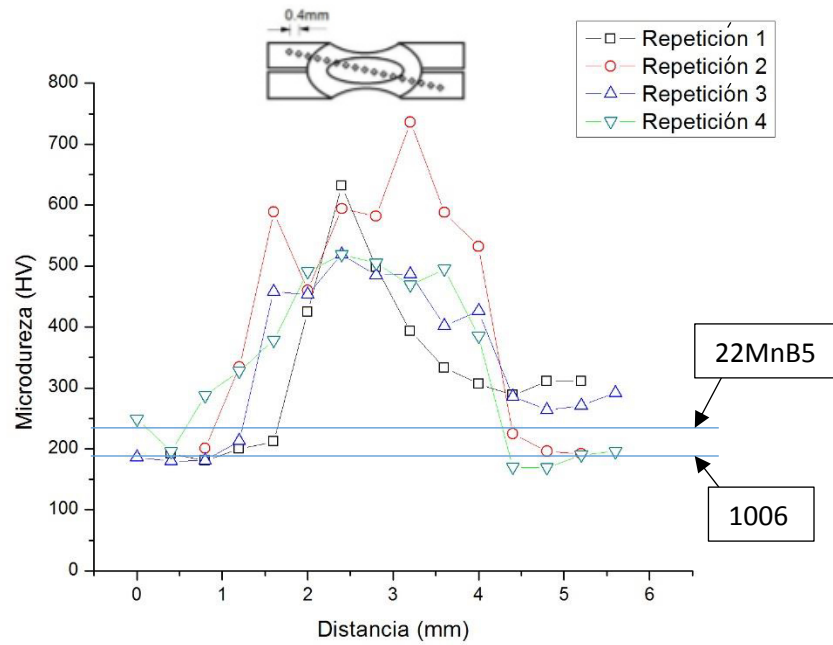


Figura 6.29. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 1.

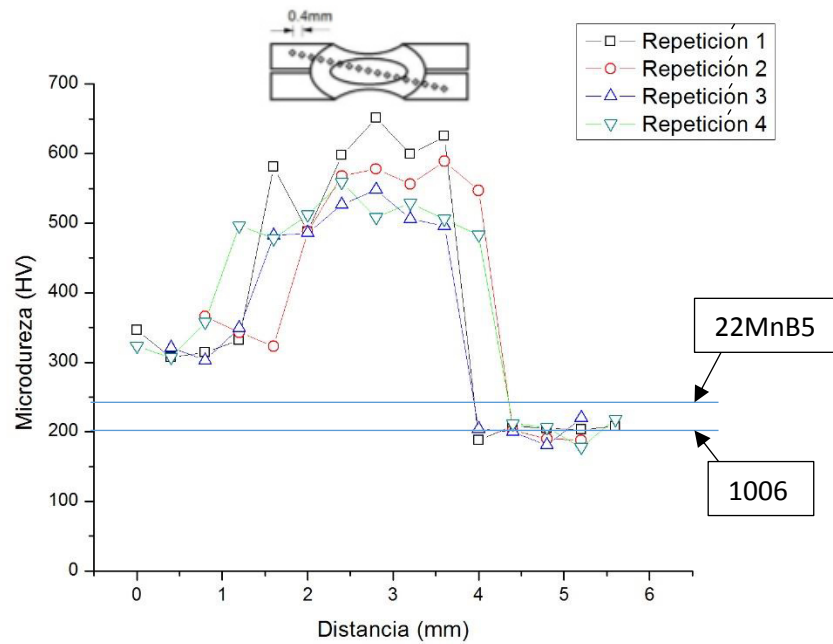


Figura 6. 30. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 2.

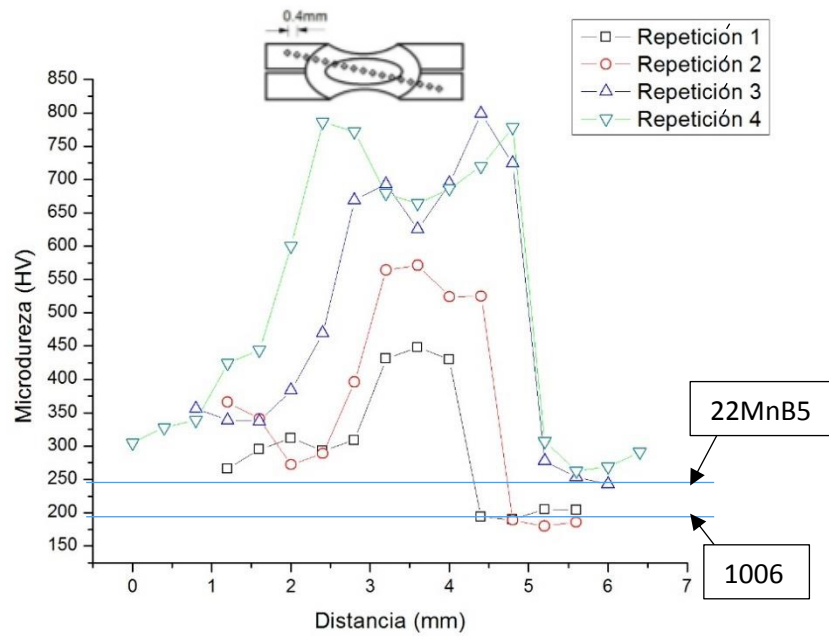


Figura 6. 31. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 3.

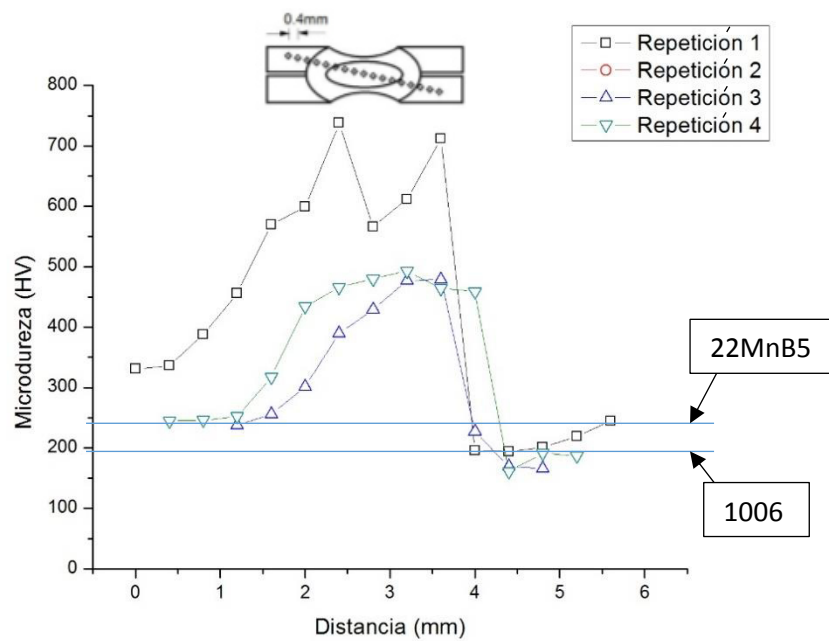


Figura 6. 32. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 4.

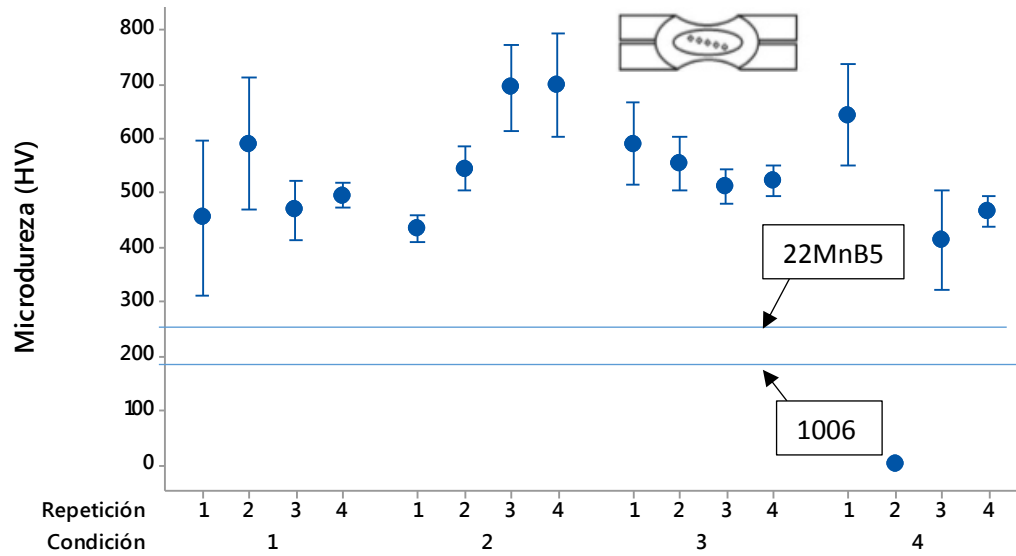


Figura 6. 33. Dureza Vickers en el centro de la zona de fusión en 22MnB5-1006 para cada condición y replica.

#### 6.2.11. Esfuerzo máximo 22MnB5-1006.

Se observa que en las condiciones 3 y 4, corriente de 26.2 y 26.8 KA, respectivamente, con una presión constante de 2200 N, Figura 6.34 y 6.36, presenta mayor resistencia a la tensión, también se observa que se obtuvo una resistencia mayor a la del metal base del 1006 lo que confirma la soldadura parcial a lo largo de la zona de fusión, donde hay partes sin soldar, pero lo suficiente para alcanzar ese esfuerzo [73].

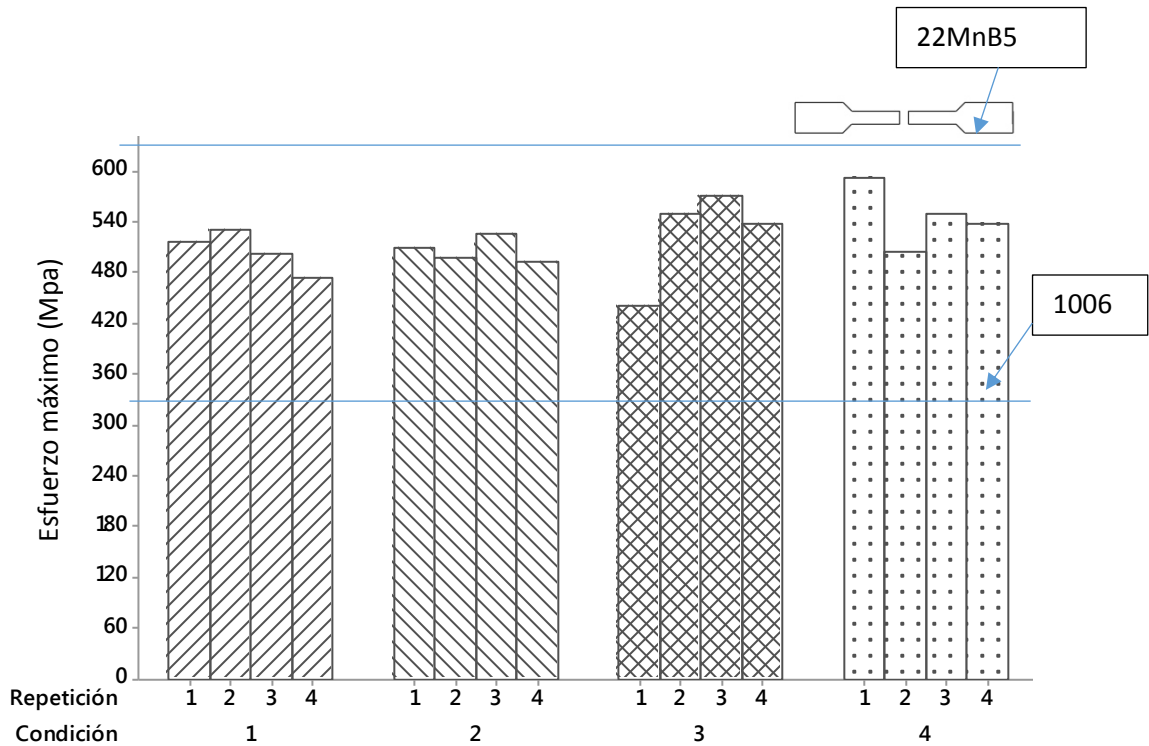


Figura 6. 34. Esfuerzo máximo de los ensayos de tensión para la unión entre 22MnB5-1006.

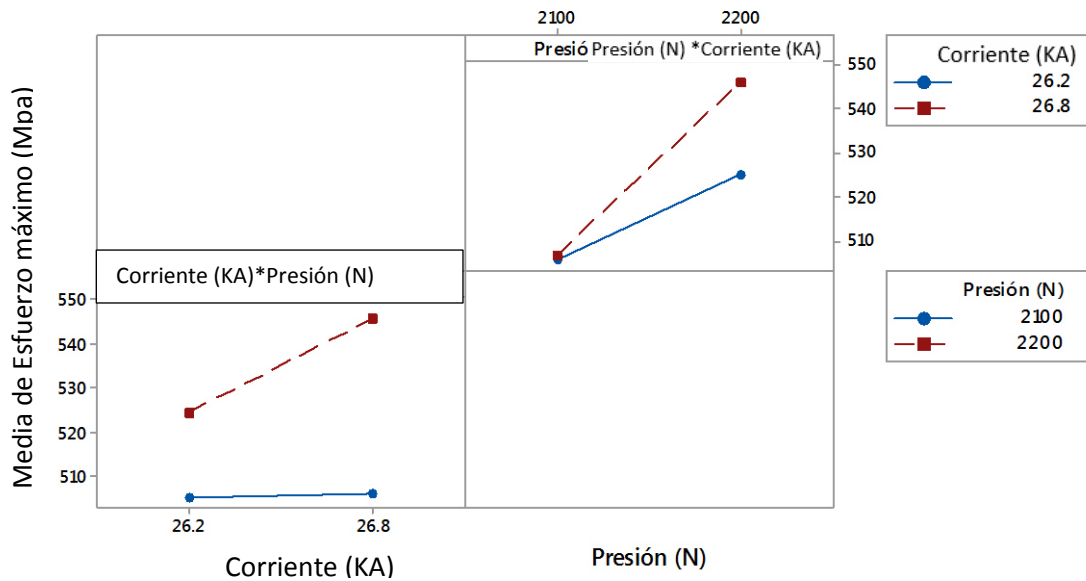


Figura 6. 35. Gráfica de interacción para esfuerzo Máximo para 22MnB5-1006.

Los resultados de la Figura 6.35 muestran que la aplicación de mayor presión resultara en una mayor resistencia, así mismo resulta conveniente utilizar alta corriente. Quizá para obtener soldaduras disimiles satisfactorias sea más conveniente emplear



mayor presión y sobre todo mayor corriente de soldadura, para el caso particular de la soldadura disímil 22MnB5-1006.

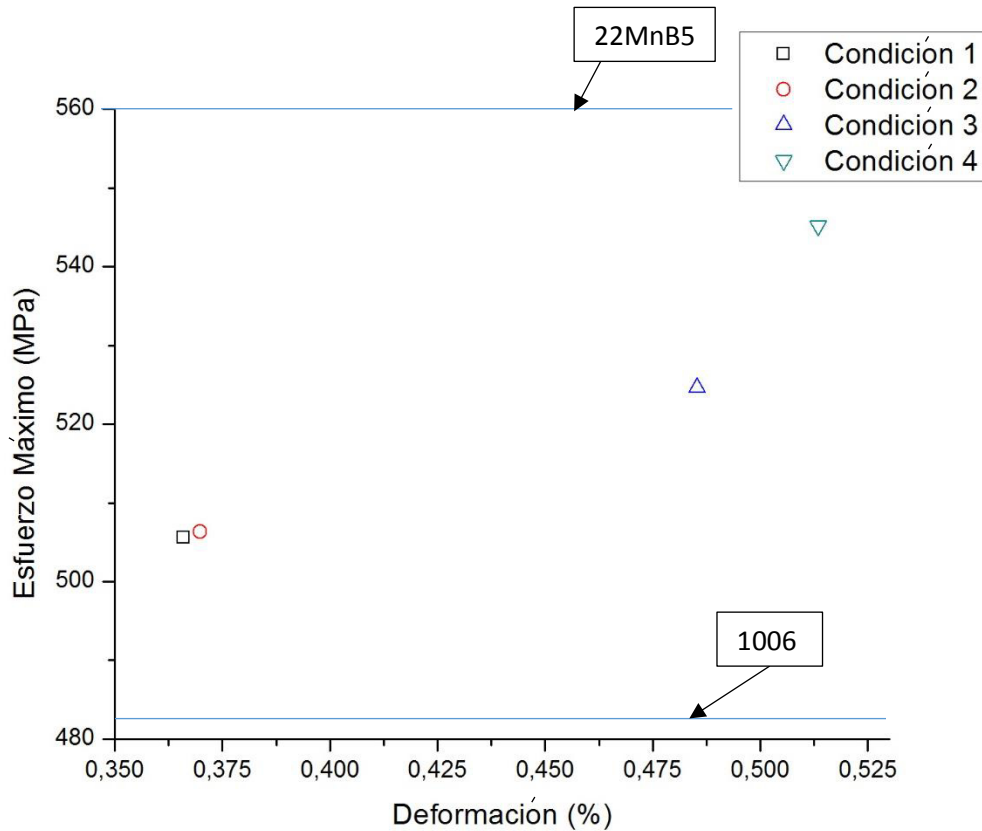


Figura 6. 36. Gráfica esfuerzo deformación para cada condición para 22MnB5-1006.

#### 6.4. Modelo estadístico 22MnB5-22MnB5.

Diámetro de la zona de fusión: En la Figura 6.37 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.3 se muestra el resumen de éste.

Profundidad de la zona de fusión: En la Figura 6.39 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.6 se muestra el resumen del experimento para éste.

Zona afectada térmicamente: En la Figura 6.41 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.9 se muestra el resumen del experimento para éste.

Microdureza: En la Figura 6.42 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.11 se muestra el resumen del experimento para éste.

Esfuerzo Máximo: En la Figura 6.47 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.14 se muestra el resumen del experimento para éste.

#### 6.4.1. Calidad de la zona transversal del cordón 22MnB5-22MnB5.

De acuerdo a las mediciones que se tomaron en la zona de fusión, profundidad y zona afectada térmicamente y analizando el efecto de los términos, Tabla 6.4, 6.7 y 6.10, y los valores “p” obtenidos del ANOVA que se muestra en las Tablas 6.5, 6.8 y 6.11 respectivamente, se puede observar que en la zona de fusión la interacción de los parámetros presión y corriente en valores bajos son los que influyen en el tamaño de éste, se confirma en la Figura 6.38. En la profundidad influye la corriente en su valor bajo, 26.1 KA, ver Figura 6.40 y el tamaño de la zona afectada térmicamente la presión de 2100 N es el parámetro que influye a mayor medida en el tamaño de éste, cabe destacar que carece de valor estadísticamente significativo como se muestra en la Figura 6.42.

6.4.1.1 *Diámetro* de la zona de fusión 22MnB5-22MnB5.

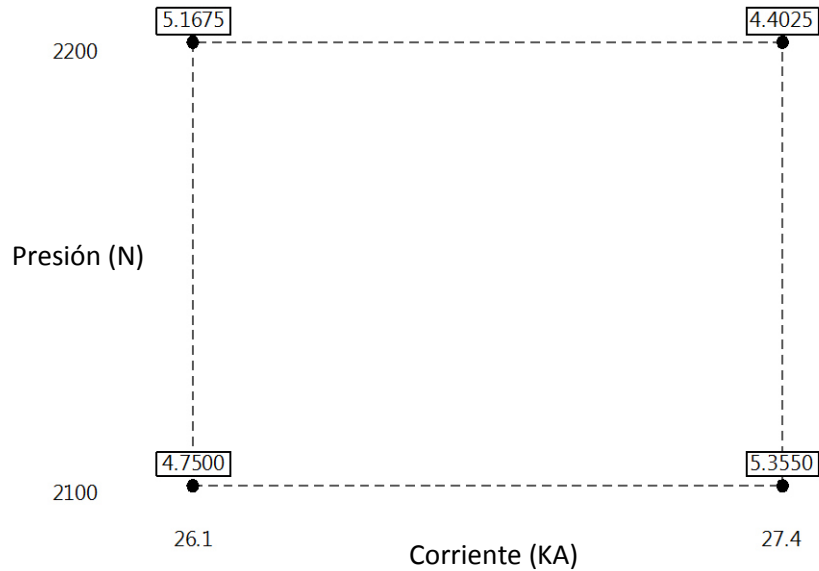


Figura 6. 37 Grafica de cubos de medias ajustada para el Diámetro de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-22MnB5.

Tabla 6. 3 Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el Diámetro de la zona de fusión en la unión 22MnB5-22MnB5

Condición	Replica Diámetro de zona de fusión (mm)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	4.33	4.06	5.20	5.41	4.7500
Alta, baja (2)	4.80	5.20	5.71	5.71	5.3550
Baja, alta (3)	5.20	4.92	5.05	5.50	5.1675
Alta, alta (4)	4.48	4.93	4.40	3.80	4.4025

Tabla 6. 4.Efectos de los términos en la Zona centro de fusión para 22MnB5-22MnB5.

Término	Efecto	Coeficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		4.919	0.119	41.41	
Corriente	-0.080	-0.040	0.119	-0.34	1
Presión	-0.268	-0.134	0.119	-1.13	1
Corriente*Presión	-0.685	-0.343	0.119	-2.88	1

Tabla 6. 5. ANOVA del Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5.

Fuente	GL	SC. Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	2.18873	0.72958	3.23	0.061
Lineal	2	0.31182	0.15591	0.69	0.520
Corriente (KA)	1	0.02560	0.02560	0.11	0.742
Presión (N)	1	0.28623	0.28623	1.27	0.282
Interacción de dos términos	1	1.87690	1.87690	8.32	0.014
Corriente (KA)* Presión (N)	1	1.87690	1.87690	8.32	0.014
Error	12	2.70865	0.22572		
Total	15	4.89738			

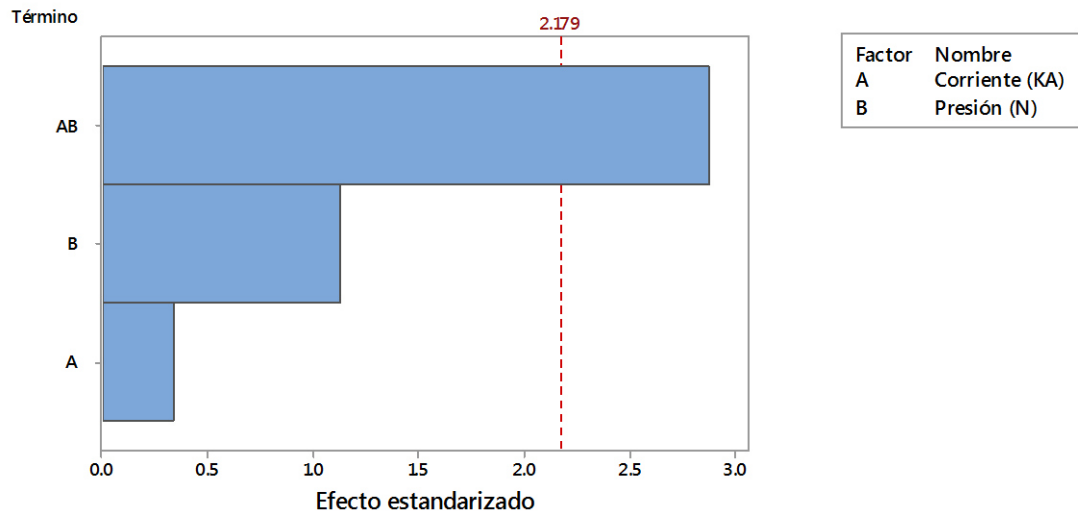


Figura 6. 38. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5.

6.4.1.2. Profundidad de la zona de fusión 22MnB5-22MnB5.

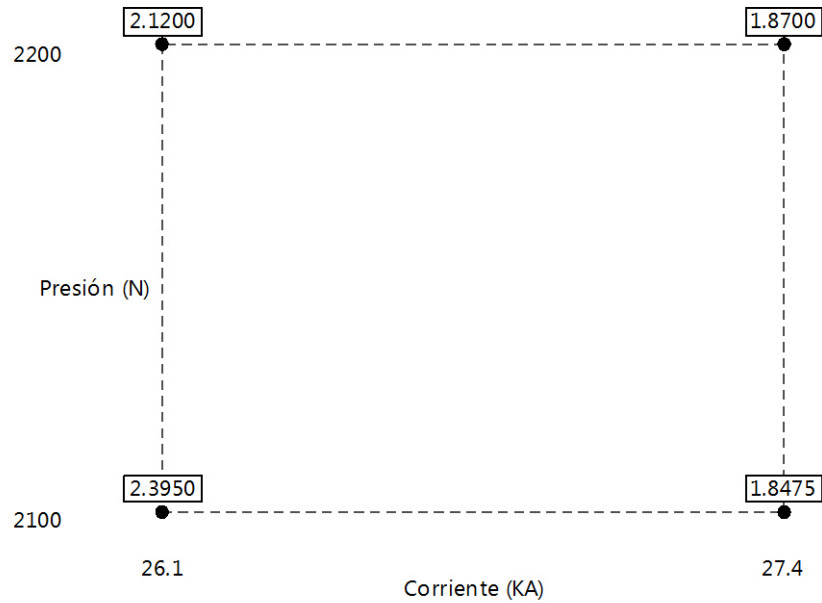


Figura 6. 39 Gráfica de cubos de medias ajustada para la profundidad de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-22MnB5.

Tabla 6. 6. Tabla de diseño factorial  $2^2$  para el análisis de profundidad de la zona de fusión en la unión 22MnB5-22MnB5.

Condición	Replica Profundidad de zona de fusión (mm)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	2.08	2.08	2.50	2.70	2.3950
Alta, baja (2)	2.40	1.34	1.73	2.24	1.8475
Baja, alta (3)	2.20	2.10	2.00	2.40	2.1200
Alta, alta (4)	2.08	2.18	1.50	1.40	1.8700

Tabla 6. 7. Tabla de efectos para la profundidad para 22MnB5-22MnB5.

Término	Efecto	Coeficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		2.0581	0.0883	23.32	
Corriente	-0.3987	-0.1994	0.0883	-2.26	1
Presión	-0.1262	-0.0631	0.0883	-0.72	1
Corriente*Presión	0.1487	0.0744	0.0883	0.84	1

Tabla 6. 8. ANOVA de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5.

Fuente	GL	Sc. Ajust.	MC. ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	0.78827	0.26276	2.11	0.153
Lineal	2	0.69976	0.34988	2.81	0.100
Corriente (KA)	1	0.63601	0.63601	5.10	0.043
Presión (N)	1	0.06376	0.06376	0.51	0.488
Interacciones de 2 términos	1	0.08851	0.08851	0.71	0.416
Corriente (KA)* Presión (N)	1	0.08851	0.08851	0.71	0.416
Error	12	1.49538	0.12461		
Total	15	2.28364			

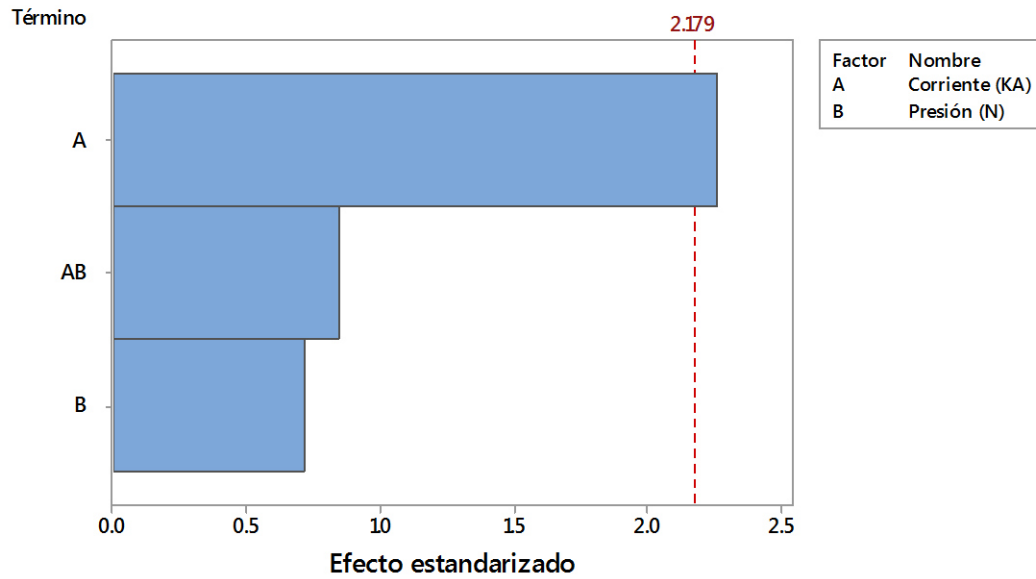


Figura 6. 40. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5.

6.4.1.3. Zona afectada térmicamente 22MnB5-22MnB5.

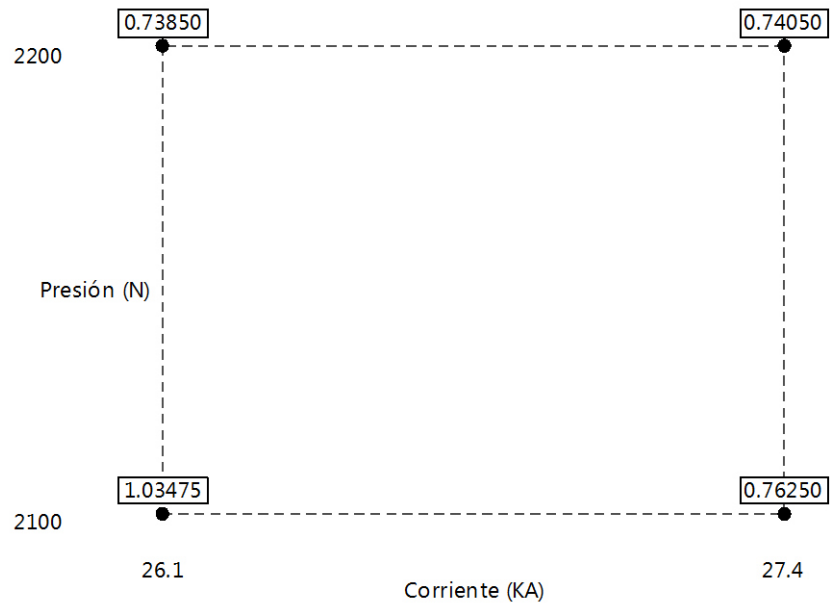


Figura 6. 41. Gráfica de cubos de medias ajustada para la zona afectada térmicamente (mm) en la unión 22MnB5-22MnB5.

Tabla 6. 9. Tabla de diseño factorial  $2^2$  para el análisis de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-22MnB5.

Condición	Replica ZAT (mm)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	0.812	0.789	0.751	0.682	1.03475
Alta, baja (2)	0.800	0.600	1.420	1.030	0.76250
Baja, alta (3)	0.841	0.744	0.787	0.762	0.73850
Alta, alta (4)	0.714	0.693	0.780	0.900	0.74050

Tabla 6. 10. Tabla de efectos de la zona afectada térmicamente para 22MnB5-22MnB5.

Término	Efecto	Coficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		0.8191	0.0378	21.67	
Corriente	-0.1351	-0.0676	0.0378	-1.79	1
Presión	-0.1591	-0.0796	0.0378	-2.11	1
Corriente*Presión	0.1371	0.0686	0.0378	1.81	1

Tabla 6. 11. ANOVA de la zona afectada térmicamente para la unión 22MnB5-22MnB5.

Fuente	GL	Sc. Ajust.	MC. ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	0.24953	0.08318	3.64	0.045
Lineal	2	0.17432	0.08716	3.81	0.052
Corriente (KA)	1	0.07304	0.7304	3.20	0.099
Presión (N)	1	0.10128	0.10128	4.43	0.057
Interacciones de 2 términos	1	0.07521	0.07521	3.29	0.095
Corriente (KA)* Presión (N)	1	0.07521	0.07521	3.29	0.095
Error	12	0.27422	0.02285		
Total	15	0.52375			

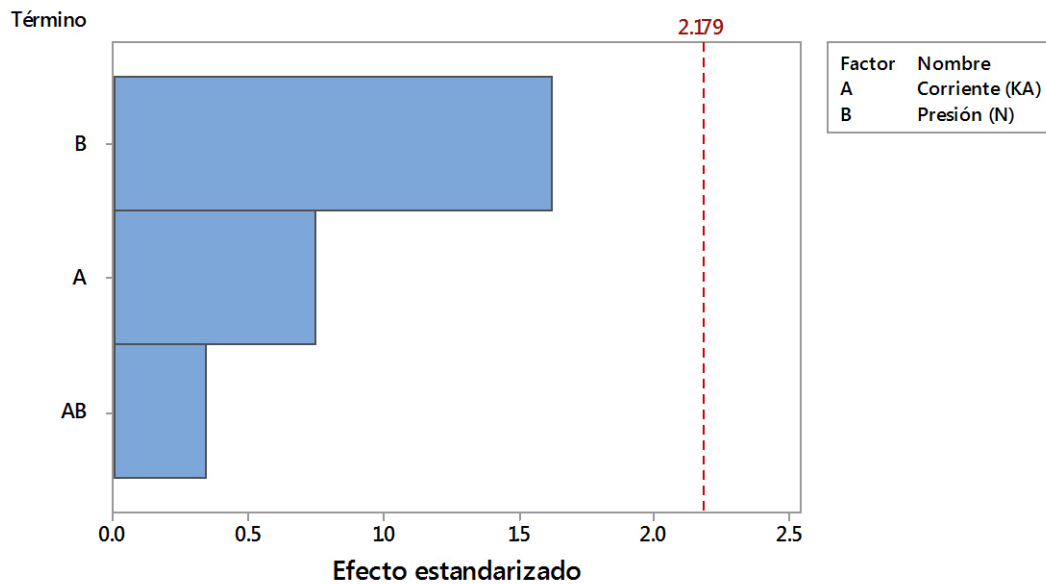


Figura 6. 42. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la zona afectada térmicamente para la unión 22MnB5-22MnB5.

#### 6.4.2. Calidad de la Soldadura.

De acuerdo a los valores obtenidos de microdureza en la zona centro de fusión, y analizando los efectos de cada término que se muestra en la Tabla 6.13 y el valor “p” que se muestra en la Tabla 6.14, se observa que el efecto de los términos carece de valor estadísticamente significativo, pero el efecto de la interacción de los dos términos, Presión y corriente en su valor alto, 27.4 KA y 2200 N, afecta directamente en la microdureza en la zona centro de fusión, ver Figura 6.44. Con lo que respecta al esfuerzo



máximo, donde se muestra los efectos en la Tabla 6.16 y del valor “p”, Tabla 6.17, el valor de 2200 N influye en el esfuerzo máximo, como se confirma en la Figura .6.46.

6.4.2.1. Microdureza 22MnB5-22MnB5.

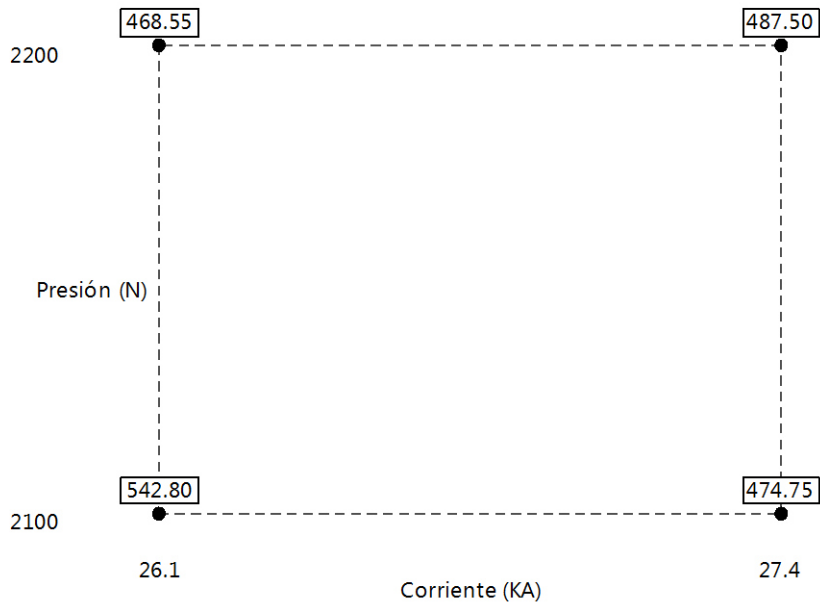


Figura 6. 43. Gráfica de cubos de las medias ajustadas de los valores de la microdureza (HV) en la unión 22MnB5-22MnB5.

Condición	Replica Microdureza (HV)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	612.2	603.6	482.4	473.0	542.8
Alta, baja (2)	440.6	444.6	414.8	599.0	475.75
Baja, alta (3)	436.0	483.6	476.6	478.0	468.55
Alta, alta (4)	474.6	472.0	484.6	518.8	487.5

Tabla 6. 12. Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el análisis de microdureza en la unión 22MnB5-22MnB5.

Tabla 6. 13. Efecto de los términos en la microdureza para 22MnB5-22MnB5

Término	Efecto	Coficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		493.4	14.6	33.77	
Corriente	-24.6	-12.3	14.6	-0.84	1
Presión	-30.8	-15.4	14.6	-1.05	1
Corriente*Presión	43.5	21.7	14.6	1.49	1

Tabla 6. 14. ANOVA de la microdureza para la unión 22MnB5-22MnB5.

Fuente	GL	SC Ajust.	Mc Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	13762	4587	1.34	0.307
Lineal	2	6193	3097	0.91	0.430
Corriente (KA)	1	2411	2411	0.71	0.417
Presión	1	3782	3782	1.11	0.313
Interacción de 2 términos	1	7569	7569	2.22	0.162
Corriente (KA)* Presión (N)	1	7569	7569	2.22	0.162
Error	12	40975	3415		
Total	15	54737			

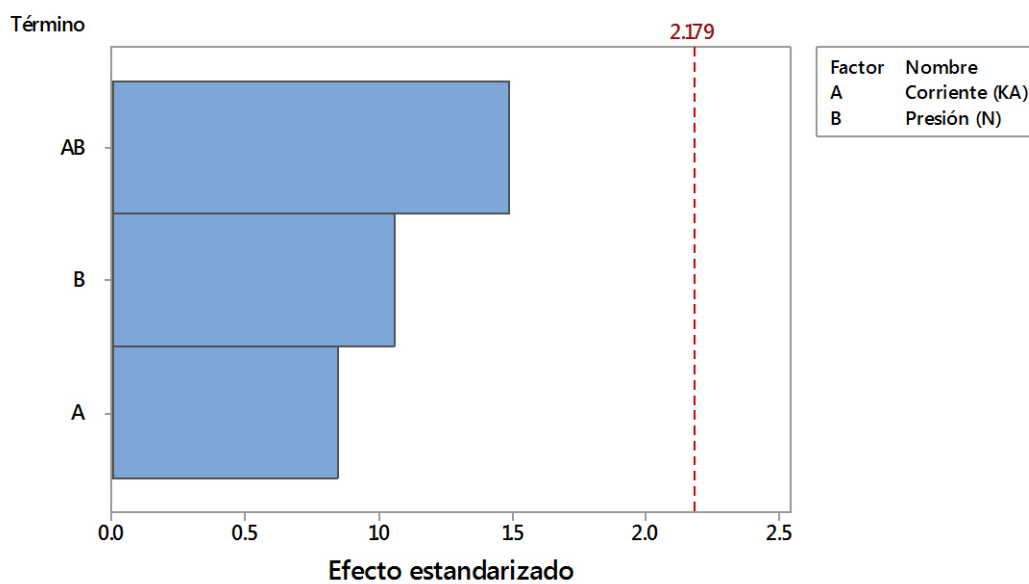


Figura 6. 44. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de microdureza para la unión 22MnB5-22MnB5.

6.4.2.2. Esfuerzo máximo 22MnB5-22MnB5.

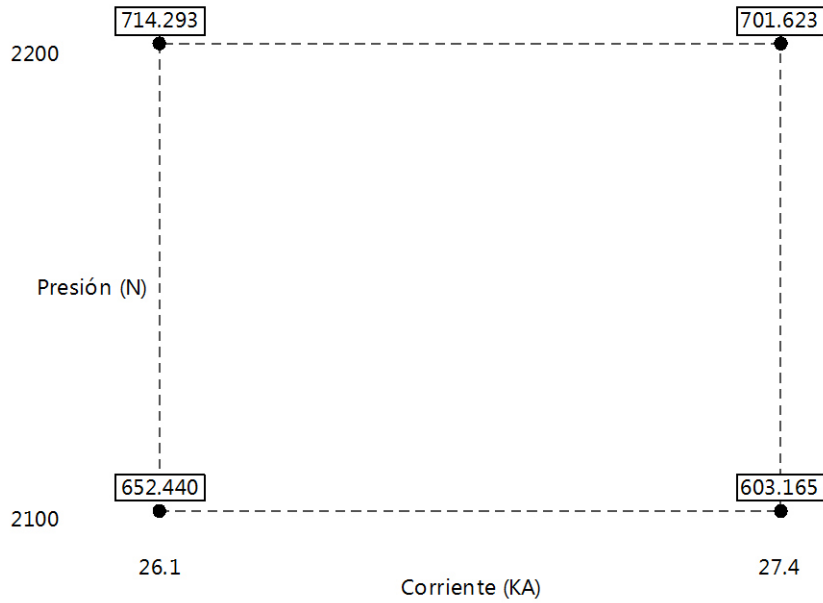


Figura 6. 45. Gráfica de cubos de medias ajustada para el Esfuerzo máximo (MPa) en la unión 22MnB5-22MnB5.

Tabla 6. 15. Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el análisis de esfuerzos Máximos en la unión 22MnB5-22MnB5.

Condición	Replica Máximo esfuerzo (MPa)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	703.55	681.78	638.02	586.41	625.44
Alta, baja (2)	539.14	474.82	727.28	671.42	603.165
Baja, alta (3)	720.57	741.13	664.62	730.85	714.293
Alta, alta (4)	723.36	734.19	700.32	648.62	701.623

Tabla 6. 16. Efecto de los términos en el esfuerzo máximo para 22MnB5-22MnB5.

Término	Efecto	Coficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		667.9	17.2	38.93	
Corriente	-31.0	-15.5	17.2	-0.90	1
Presión	80.2	40.1	17.2	2.34	1
Corriente*Presión	18.33	9.2	17.2	0.53	1

Tabla 6. 17. ANOVA del esfuerzo máximo para la unión 22MnB5-22MnB5.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC. Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	30876	10292	2.19	0.143
Lineal	2	29536	14768	3.14	0.080
Corriente (KA)	1	3837	3837	0.81	0.385
Presión (N)	1	25699	25699	5.46	0.038
Interacción de 2 términos	1	1340	1340	0.28	0.604
Corriente (KA)* Presión (N)	1	1340	1340	0.28	0.604
Error	12	56521	4710		
Total	15	87398			

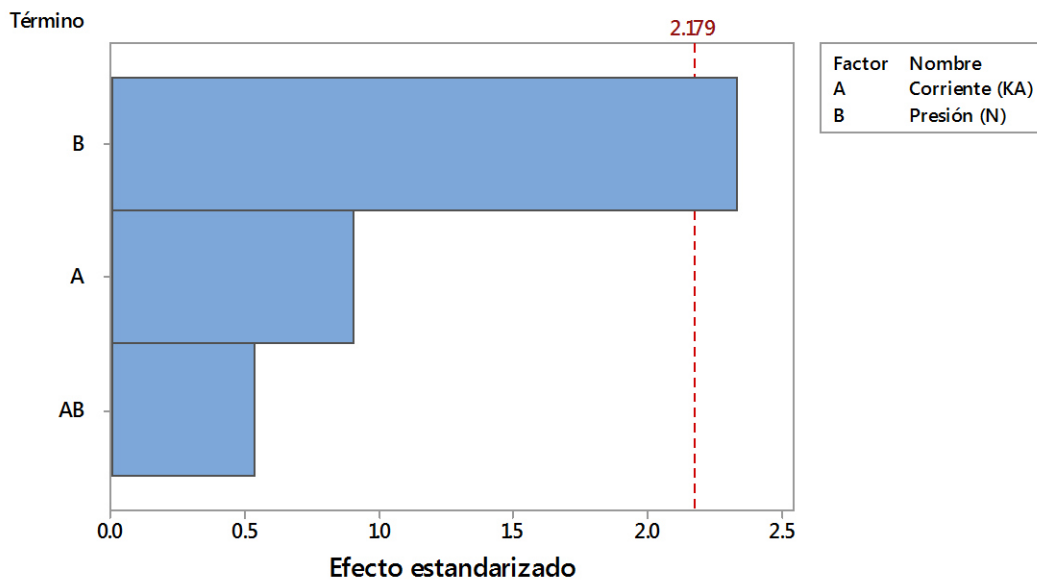


Figura 6. 46. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de esfuerzo máximo para la unión 22MnB5-22MnB5.

### 6.5. Modelo estadístico 22MnB5-1006.

**Díámetro de la zona de fusión:** En la Figura 6.47 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.18 se muestra el resumen de éste.

**Profundidad de la zona de fusión:** En la Figura 6.49 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.21 se muestra el resumen del experimento para éste.

**Zona afectada térmicamente:** En la Figura 6.52 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.24 se muestra el resumen del experimento para éste.

Microdureza: En la Figura 6.53 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.27 se muestra el resumen del experimento para éste.

Esfuerzo Máximo: En la Figura 6.55 se muestra la gráfica de cubos del experimento y en la Tabla 6.30 se muestra el resumen del experimento para éste.

#### 6.5.1. Calidad de la zona transversal del cordón de soldadura.

De acuerdo a las mediciones de la zona de fusión, profundidad y zona afectada térmicamente, se analizó el efecto de los términos, Tablas 6.19, 6.20 y 6.21, y el valor “p” que se muestran en el ANOVA en las Tablas 6.20, 6.23 y 6.26, respectivamente. Estos valores nos indican que carecen de valor estadísticamente significativo, la zona de fusión y el tamaño de la profundidad es afectado por la interacción de los dos términos, en sus niveles más bajos, 26.2 KA y 2100 N, para la zona centro de fusión y los valores altos 26.8 KA y 2200 N, para el tamaño de la profundidad. El tamaño de la zona afectada térmicamente la presión de 2100 N es el parámetro que influye directamente en el tamaño de éste, como se muestran en las Figuras 6.48, 6.50 y 6.52 respectivamente.

6.5.1.1. Diámetro de la zona de fusión 22MnB5-1006.

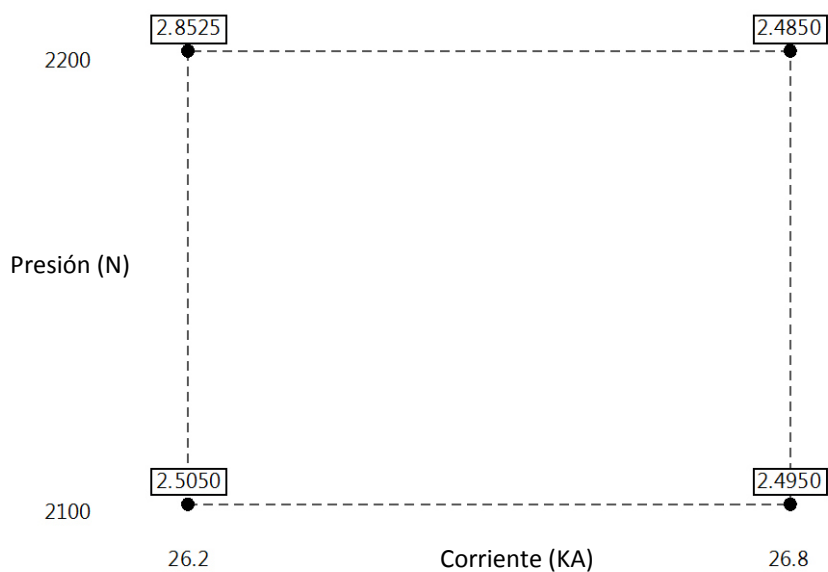


Figura 6. 47. Gráfica de cubos de medias ajustada para el Diámetro de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-1006

Tabla 6. 18. Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el Diámetro de la zona de fusión en la unión 22MnB5-1006.

Condición	Replica Diámetro de zona de fusión (mm)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	2.18	2.04	2.95	2.85	2.505
Alta, baja (2)	2.85	2.65	2.04	2.44	2.4950
Baja, alta (3)	2.44	2.24	3.67	3.06	2.8525
Alta, alta (4)	2.36	1.18	3.40	3.00	2.4850

Tabla 6. 19. Efecto de los términos en el diámetro de fusión para 22MnB5-1006.

Término	Efecto	Coficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		2.584	0.163	15.89	
Corriente	-0.189	-0.094	0.163	-0.58	1
Presión	0.169	0.084	0.163	0.52	1
Corriente*Presión	-0.179	-0.089	0.163	-0.55	1

Tabla 6. 20 ANOVA Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006.

Fuente	GL	Sc. Ajust.	Mc. Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	0.3842	0.1281	0.30	0.823
Lineal	2	0.2564	0.1282	0.30	0.744
Corriente (KA)	1	0.1425	0.1425	0.34	0.572
Presión (N)	1	0.1139	0.1139	0.27	0.613
Interacción de dos términos	1	0.1278	0.1278	0.30	0.593
Corriente*Presión	1	0.1278	0.1278	0.30	0.593
Error	12	5.0768	0.4231		
Total	15	5.4610			

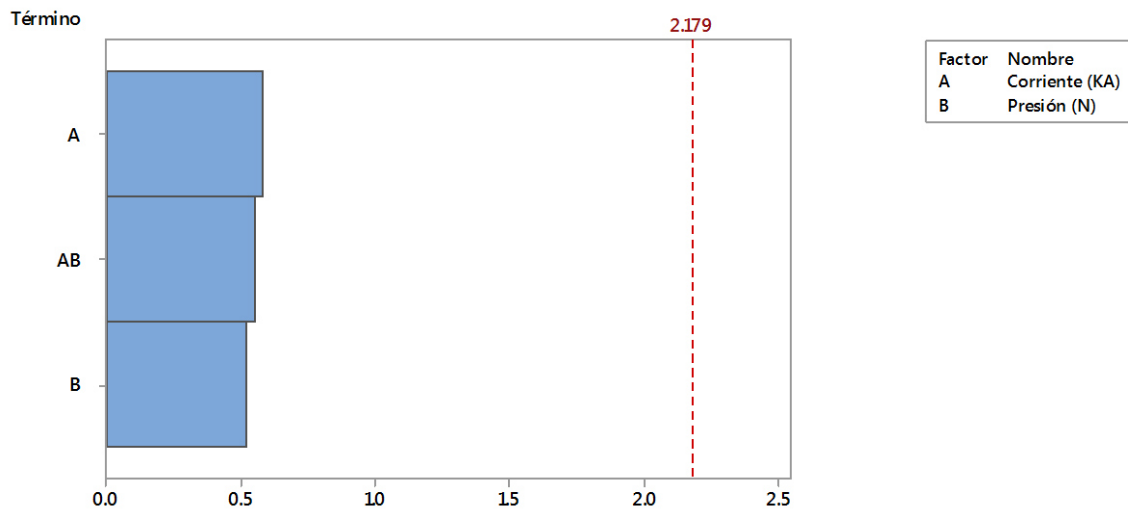


Figura 6. 48. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006.

6.5.1.2. Profundidad de la zona de fusión 22MnB5-1006.

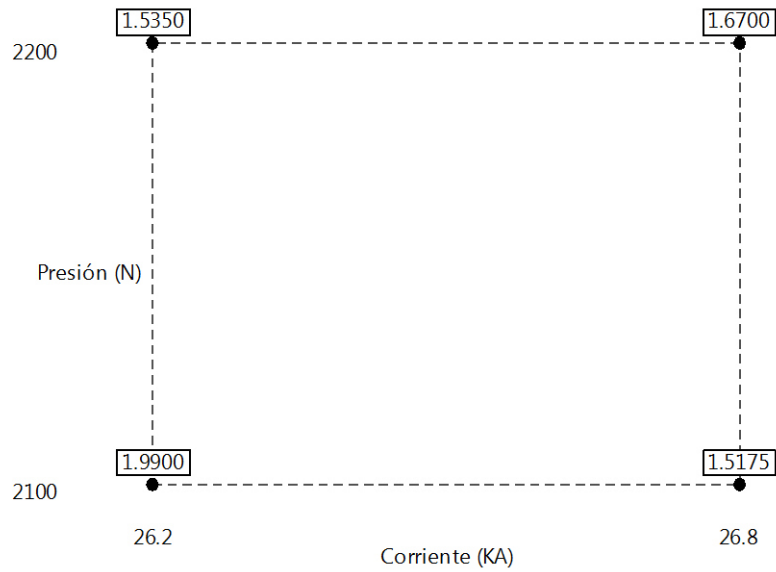


Figura 6. 49. Gráfica de cubos de medias ajustada para la profundidad de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-1006.

Tabla 6. 21. Tabla de diseño factorial  $2^2$  para el análisis de profundidad de la zona de fusión en la unión 22MnB5-1006.

Condición	Replica Profundidad de zona de fusión (mm)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	2.44	2.04	2.30	1.18	1.9900
Alta, baja (2)	2.04	1.87	1.87	0.29	1.5175
Baja, alta (3)	1.63	1.28	1.63	1.60	1.5350
Alta, alta (4)	2.04	1.63	0.81	2.20	1.6700

Tabla 6. 22. Efecto de los términos en la profundidad para 22MnB5-1006.

Término	Efecto	Coeficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		1.678	0.148	11.30	
Corriente	-0.169	-0.084	0.148	-0.57	1
Presión	-0.151	-0.076	0.148	-0.51	1
Corriente*Presión	0.304	0.152	0.148	1.02	1



Tabla 6. 23 ANOVA de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006.

Fuente	GL	Sc. Ajust.	MC. ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	0.57447	0.19149	0.54	0.662
Lineal	2	0.20541	0.10271	0.29	0.752
Corriente (KA)	1	0.11391	0.11391	0.32	0.580
Presión (N)	1	0.09151	0.09151	0.26	0.620
Interacciones de 2 términos	1	0.36906	0.36906	1.05	0.326
Corriente (KA)* Presión (N)	1	0.36906	0.36906	1.05	0.326
Error	12	4.23178	0.35265		
Total	15	4.80624			

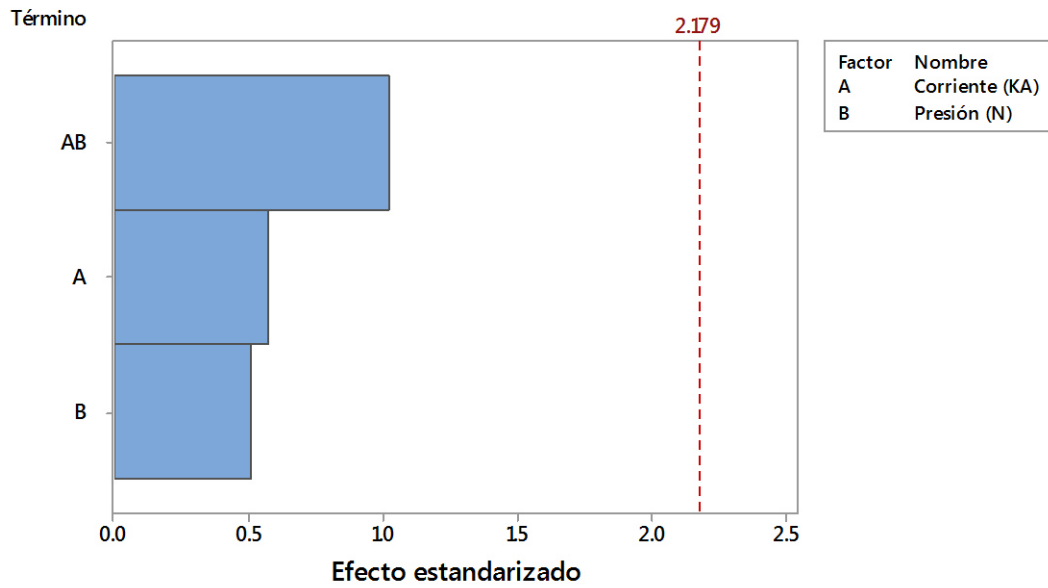


Figura 6. 50. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006.

6.5.1.3. Zona afectada térmicamente 22MnB5-1006.

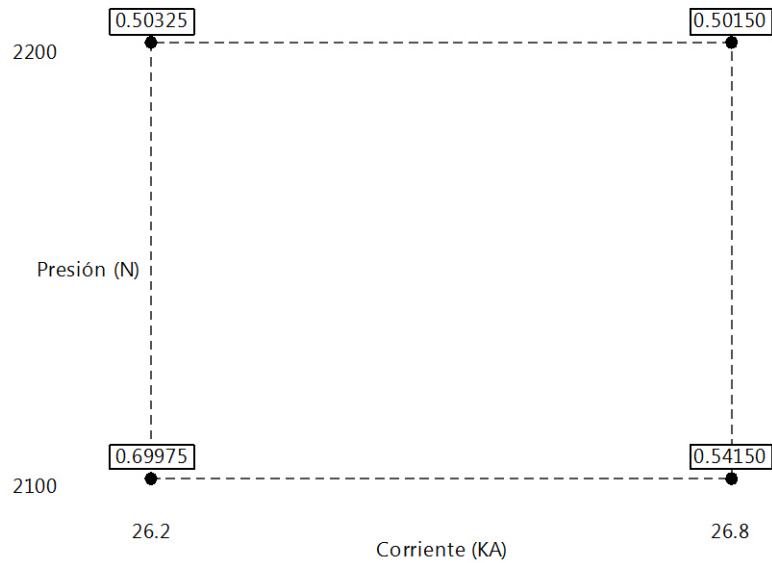


Figura 6. 51. Gráfica de cubos de medias ajustada para la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006.

Tabla 6. 24. Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el análisis de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006.

Condición	Replica Profundidad de zona de fusión (mm)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	1.020	0.650	0.342	0.787	0.69975
Alta, baja (2)	0.551	0.816	0.248	0.551	0.54150
Baja, alta (3)	0.346	0.816	0.345	0.506	0.50325
Alta, alta (4)	0.612	0.636	0.358	0.400	0.50150

Tabla 6. 25. Efecto de los términos en la zona afectada térmicamente para 22MnB5-1006.

Término	Efecto	Coeficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		0.5615	0.0564	9.95	
Corriente	-0.08	-0.0400	0.0564	-0.71	1
Presión	-0.1183	-0.0591	0.0564	-1.05	1
Corriente*Presión	0.0783	0.0391	0.0564	0.69	1

Tabla 6. 26. ANOVA de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006.

Fuente	GL	Sc. Ajust.	MC. ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	0.10602	0.03534	0.69	0.573
Lineal	2	0.08153	0.04077	0.80	0.472
Corriente (KA)	1	0.02560	0.02560	0.50	0.492
Presión (N)	1	0.05593	0.05593	1.10	0.315
Interacciones de 2 términos	1	0.02449	0.02449	0.48	0.501
Corriente (KA)* Presión (N)	1	0.02449	0.02449	0.48	0.501
Error	12	0.61109	0.05092		
Total	15	0.71712			

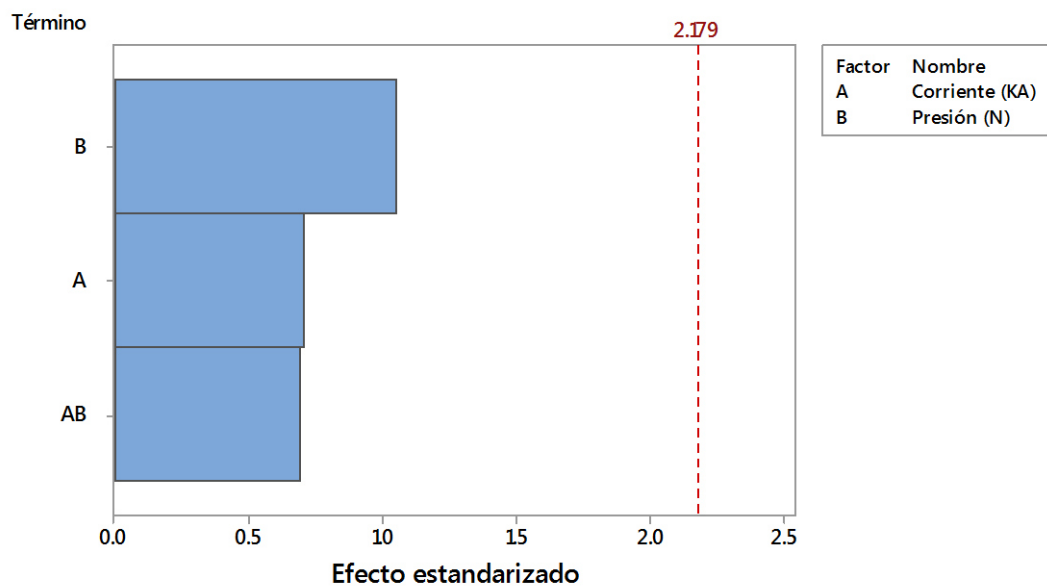


Figura 6. 52. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006.

### 6.5.2. Calidad de la soldadura 22MnB5-1006.

De acuerdo a lo valores obtenidos de microdureza en la zona centro de fusión, y analizando los efectos de cada término que se muestra en la Tabla 6.28 y el valor “p” que se muestra en la Tabla 6.29, se observa que el efecto de los términos carece de valor estadísticamente significativo, pero el efecto de la interacción de los dos términos, Presión y corriente en su valor alto, 24.8 KA y 2200 N, afecta directamente en la microdureza en la zona centro de fusión, ver Figura 6.56. Con lo que respecta al esfuerzo máximo, donde se muestra los efectos en la Tabla 6.31 y del valor “p”, Tabla 6.32,

también se observa que carece de valor estadísticamente significativo, pero se observa que el valor de 2200 N influye en el esfuerzo máximo, como se confirma en la Figura .6.56.

6.5.2.1. Microdureza 22MnB5-1006.

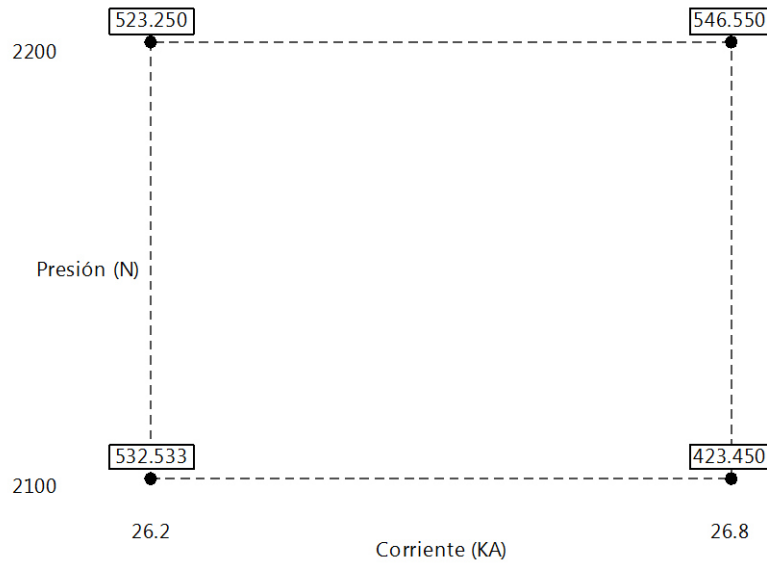


Figura 6. 53. Gráfica de cubos de las medias ajustadas de los valores de la microdureza (HV) en la unión 22MnB5-1006.

Tabla 6. 27. Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el análisis de microdureza en la unión 22MnB5-1006.

Condición	Replica Microdureza (HV)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	456.2	436.33	592.2	645.4	532.53
Alta, baja (2)	592	546	555.8	0	423.45
Baja, alta (3)	469.2	696	512.6	415.2	523.25
Alta, alta (4)	495.8	700.2	522.8	467.4	546.55

Tabla 6. 28. Efecto de los términos en la microdureza para 22MnB5-1006.

Término	Efecto	Coficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		506.4	42.6	11.88	
Corriente	-42.9	-21.4	42.6	-0.50	1
Presión	56.9	28.5	42.6	0.67	1
Corriente*Presión	66.2	33.1	42.6	0.78	1

Tabla 6. 29. ANOVA de la microdureza para la unión 22MnB5-1006.

Fuente	GL	Sc. Ajust.	Mc Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	37838	12613	0.43	0.733
Lineal	2	20313	10157	0.35	0.712
Corriente (KA)	1	7359	7359	0.25	0.624
Presión (N)	1	12954	12954	0.45	0.517
Interacción de 2 términos	1	17525	17525	0.60	0.453
Corriente (KA)* Presión (N)	1	17525	17525	0.60	0.453
Error	12	349200	29100		
Total	15	387038			

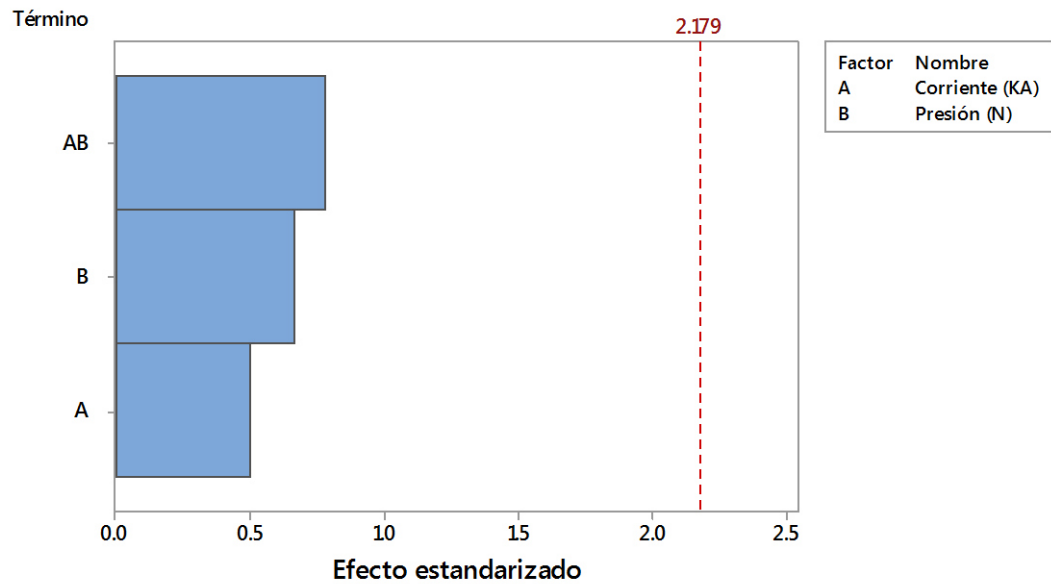


Figura 6. 54. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de microdureza para la unión 22MnB5-1006.

6.5.2.2. Esfuerzo máximo 22MnB5-1006.

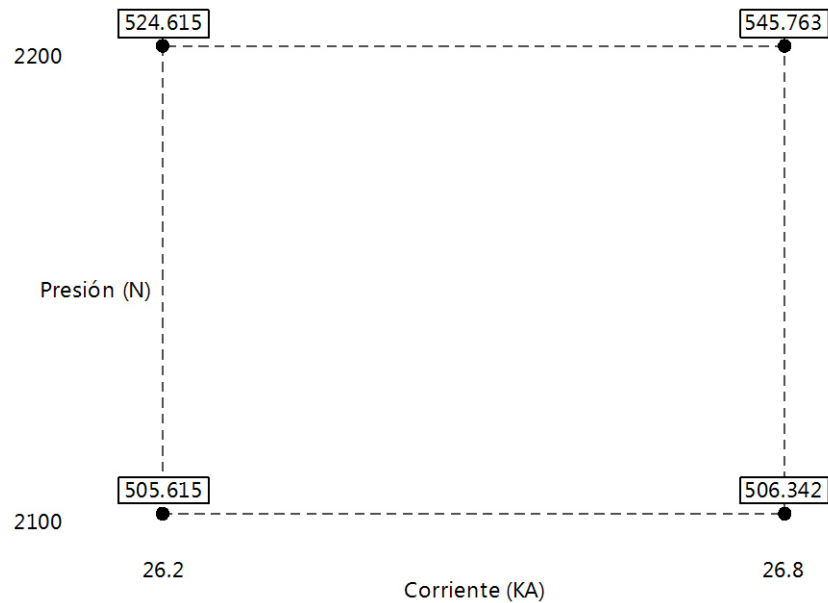


Figura 6. 55. Gráfica de cubos de medias ajustada para el Esfuerzo máximo (MPa) en la unión 22MnB5-1006.

Tabla 6. 30. Tabla de diseño factorial 2<sup>2</sup> para el análisis del esfuerzo Máximo en la unión 22MnB5-1006.

Condición	Replica Máximo esfuerzo (MPa)				MEDIA
	I	II	III	IV	
Baja, baja (1)	516.93	530.27	501.19	474.07	505.615
Alta, baja (2)	508.86	496.29	526.73	493.49	506.342
Baja, alta (3)	441.64	548.43	570.54	537.85	524.615
Alta, alta (4)	590.97	504.00	550.21	537.87	545.763

Tabla 6. 31. Efecto de los términos en el esfuerzo máximo para 22MnB5-1006.

Término	Efecto	Coficiente	EE del coeficiente.	Valor T	VIF
Constante		520.58	9.14	56.95	
Corriente	10.94	5.47	9.14	0.60	1
Presión	29.21	14.61	9.14	1.60	1
Corriente*Presión	10.21	5.10	9.14	0.56	1

Tabla 6. 32. ANOVA del esfuerzo máximo para la unión 22MnB5-1006.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	3	4308.4	1436.1	1.07	0.397
Lineal	2	3891.4	1945.7	1.46	0.272
Corriente (KA)	1	478.5	478.5	0.36	0.561
Presión (N)	1	3412.9	3412.9	2.55	0.136
Interacciones de 2 términos	1	417.0	417.0	0.31	0.587
corriente (KA)*Presión (N)	1	417.0	417.0	0.31	0.587
Error	12	160450	1337.1		
Total	15	20353.4			

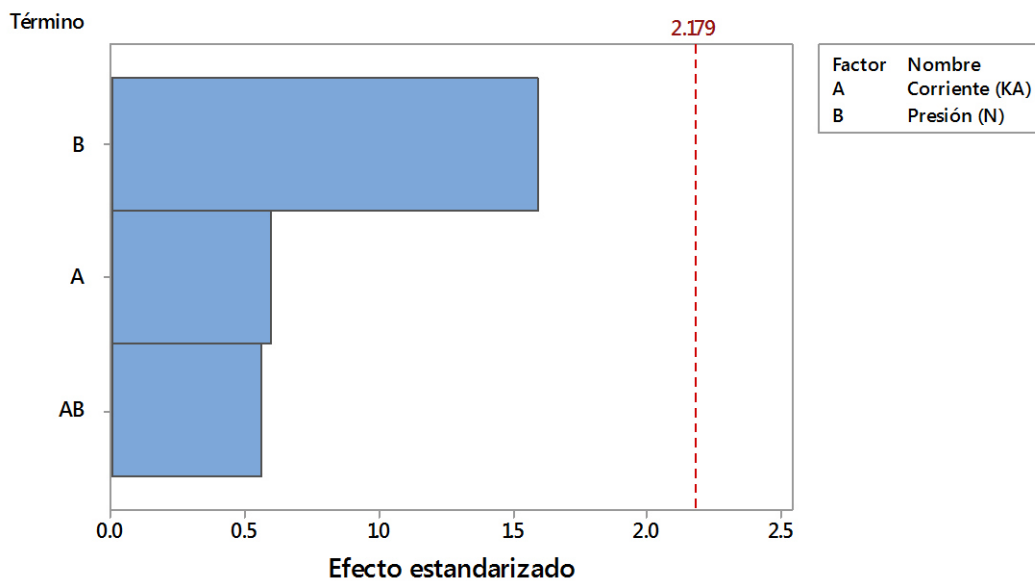


Figura 6. 56. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un  $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de esfuerzos máximos para la unión 22MnB5-1006.

## 6.6. Predicción.

Empleando las ecuaciones descrita en el Capítulo 4, fue posible encontrar ecuaciones de predicción que se podrán emplear en futuros trabajos para partir y seleccionar un rango de parámetros, donde se esperen resultados con un rango de error. En la Tabla 6.33 y 6.34, se muestran las ecuaciones obtenidas, así como el error estándar y el valor ajustado obtenidos para cada condición antes mencionada para cada tipo de unión.

Tabla 6. 33.Predicción de respuestas para la unión 22MnB5-22MnB5.

Predicción	Ecuación	Error estándar	Valor ajustado para la Condición			
			1	2	3	4
Microdureza	$HV = 126885 - 485I - 57.9P + 2.1IP$	29.2174	612.2 HV	440.6 HV	436.0 HV	474.6 HV
Máximo esfuerzo.	$\sigma_{Máx} = 15776 - 629I - 6.7P + 0.282IP$	34.3151	703.55 MPa	539.14 MPa	720.57 MPa	723.36MPa
Diámetro de la zona de fusión	$ZCC = -594 + 22.60I + 0.2792P - 0.01054 IP$	0.237550	4.7500 mm	5.1675 mm	5.3550 mm	4.4025 mm
Profundidad de la zona de fusión	$aZCC = 145 - 5.23I - 0.0625 P + 0.00229IP$	0.176504	2.3950 mm	2.3950 mm	2.1200 mm	1.8700 mm
Zona afectada térmicamente	$ZAT = 128.3 - 4.64I - 0.0580 P + 0.00211 IP$	0.0755838	0.7405 mm	0.7385 mm	0.7625 mm	1.0347 mm



Tabla 6. 34. Predicción de respuestas para la unión 22MnB5-1006.

Predicción	Ecuación	Error estándar	Valor ajustado para la Condición			
			1	2	3	4
Microdureza	$HV = 126885 - 485I - 57.9P + 2.1IP$	85.2936	532.533 HV	423.450 HV	523.250 HV	546.550 HV
Máximo Esfuerzo	$\sigma_{M\acute{a}x} = 18800 - 713I - 8.7P + 0.340IP$	18.2831	516.93 MPa	508.86 MPa	441.64 MPa	590.97 MPa
Diámetro de la zona de fusión	$ZCC = -332 + 12.5I + 0.160P - 0.0060IP$	0.325217	2.5050 mm	2.4950 mm	2.8525 mm	2.4850 mm
Profundidad de la zona de fusión	$aZCC = 589 - 22.0I - 0.27P + 0.01012IP$	0.296921	1.9900 mm	1.5175 mm	1.5350 mm	1.6700 mm
Zona afectada térmicamente	$ZAT = 155 - 5.74I - 0.0703P + 0.00261IP$	0.112832	0.6997 mm	0.5415 mm	0.5032 mm	0.5015 mm

Dónde:

HV= microdureza (HV)

$\sigma_{M\acute{a}x}$ = Esfuerzo máximo (MPa)

ZCC= Diámetro de la zona de fusión (mm).

Azcc= Profundidad de la zona de fusión (mm)

ZAT= Zona afectada térmicamente (mm)

I=corriente (KA)

P=Presión (N)

## Capítulo VII.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Los experimentos de soldaduras que se realizaron en el presente estudio demuestran que la química de los materiales a soldar es el factor que determina los parámetros de soldadura.

La microestructura de la zona de fusión depende directamente de la composición química y de la correcta aplicación de los parámetros de soldadura. Se observa que en las dos uniones, tanto 22MnB5-22MnB5 y 22MnB5-1006, la zona centro de fusión está conformada por una combinación de martensita y bainita, lo cual lo confirma los valores de la microdureza en esta zona.

La microestructura de la zona afectada térmicamente, la unión 22MnB5-22MnB5 en específico la zona supercrítica de grano fino está conformado por perlita y una zona parcial de bainita, por otro lado, la zona de grano gruesa está conformado por bainita y martensita con pequeñas islas de perlita. Para la unión 22MnB5-1006, no se observa una zona afectada térmicamente, por lo que podría hablarse de una soldadura parcial. En el caso del 22MnB5 las velocidades de enfriamiento fueron las correctas al no presentar fisuración en la zona afectada térmicamente, aunque el %CE (0.4645%) estuvo por encima del 0.30% CE permitido, para el 1006 no presentaba ninguna dificultad.

El diámetro de la zona de fusión de la unión 22MnB5-22MnB5 resultó cumplir el mínimo requerido por la norma AWS D8.1M, cabe destacar que la condición que utilizó una presión de electrodos de 2200 N junto con una corriente de 26.1 KA (condición 3) obtuvo la mejor geometría. La unión 22MnB5-1006 no cumplió con lo requerido por la norma AWS D8.1M, sin embargo, al utilizar una presión de electrodos de 2200 N junto a una corriente de 26.2 KA resultó tener la mejor geometría en esta unión. Concluimos

que al utilizar presiones altas junto a corrientes bajas obtendremos una buena geometría.

Se observa que hay una relación directa entre presión y esfuerzo máximo, cuando se utilizó una presión de 2100 N, el esfuerzo máximo fue menor, en cambio cuando se utilizó 2200 N el esfuerzo máximo fue mayor, esto se cumple tanto para la unión 22MnB5-22MnB5 como para la unión 22MnB5-1006; cabe destacar que a pesar de que en la unión 22MnB5-1006 los valores de resistencia estuvieron por encima de los valores del 1006 pero por debajo de los valores de resistencias del 22MnB5, haciéndonos concluir que hubo una soldadura parcial en ésta.

Los modelos estadísticos empleados en la unión 22MnB5-22MnB5 dieron como resultados ser confiables y confirman lo antes mencionado ya que se obtuvo que la combinación de los parámetros presión y corriente son los que involucran en la geometría de la zona de fusión, con lo que respecta a las propiedades mecánicas también confirma la relación directa entre esfuerzo máximo y presión. Para la unión 22MnB5-1006 el modelo estadístico en su totalidad careció de valor estadísticamente significativo, ya que su nivel de confianza estuvo por debajo del 95%, aun así, confirma la relación entre esfuerzo máximo y presión.

#### 7.1. Recomendaciones.

Utilizar un rango mayor de corriente eléctrica, además de la utilización de velocidad de soldadura e impulsos de corrientes en diferentes frecuencias como parámetros, esto con fin de ampliar el área de experimentación

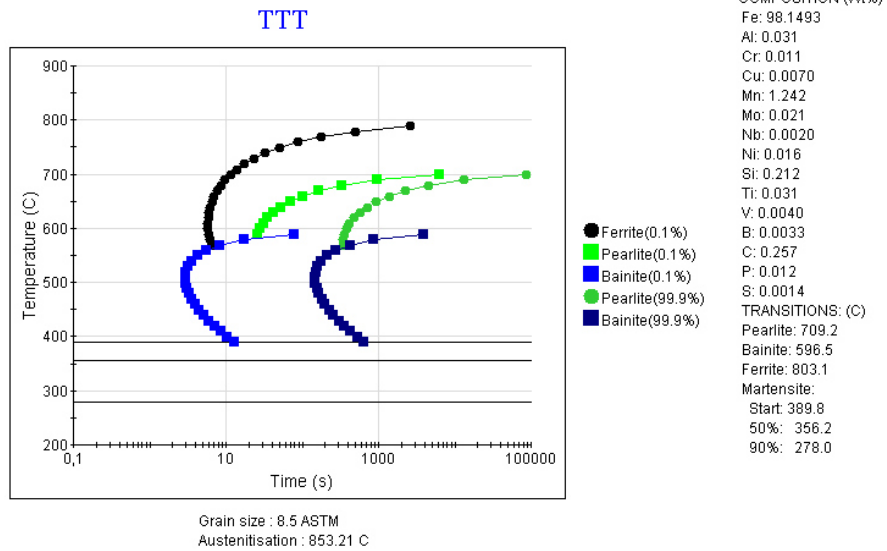
Soldar una vez más los aceros 22MnB5-1006 incrementado la presión y corriente eléctrica, el incrementar la presión sería con el fin de reducir la interfaz y la resistencia entre los metales, por lo que se emplearía una menor corriente, o se alcanzaría temperaturas altas en menor tiempo.

Emplear modelos matemáticos o simulaciones por elemento finito para simular las posibles temperaturas alcanzables, así mismo la validación de estas ya sea por termopar o cámara de calor, esto con el fin de evitar prueba y error.

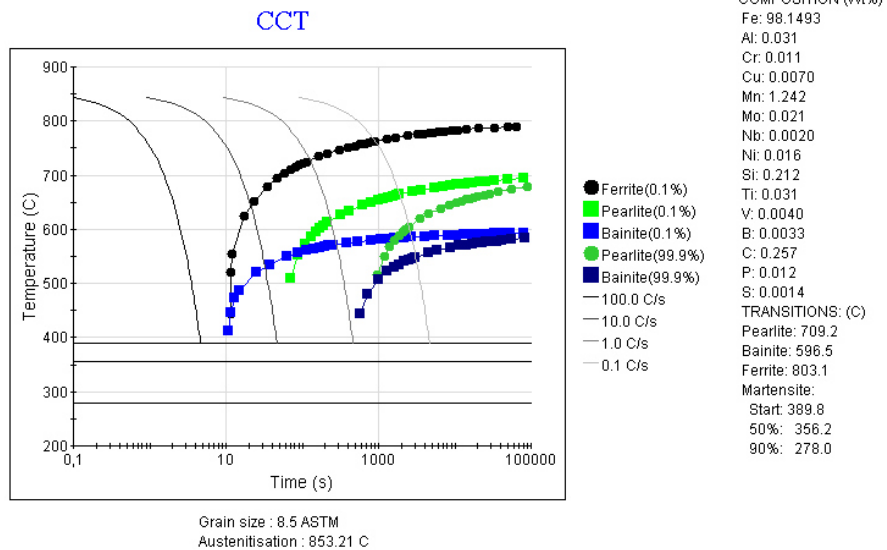
# Apéndice A

## Diagramas TTT y CCT.

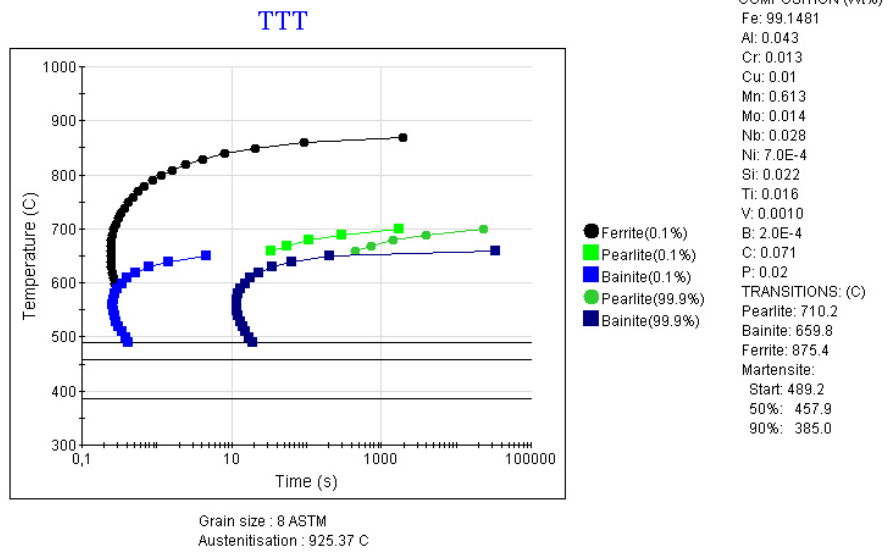
### A1. Diagrama TTT 22MnB5.



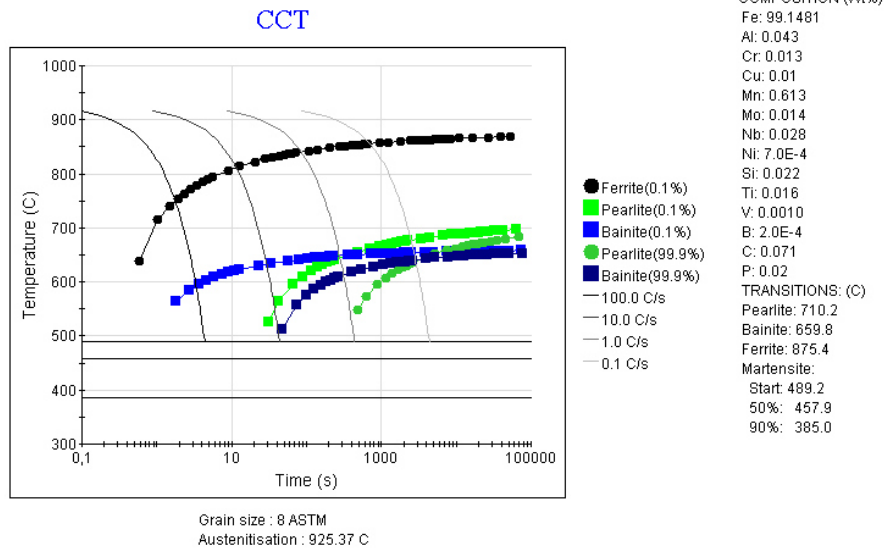
### A2. Diagrama CCT 22MnB5.



### A3. Diagrama TTT 1006.




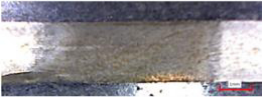






























### A4. Diagrama CCT 1006.



## Apéndice B.

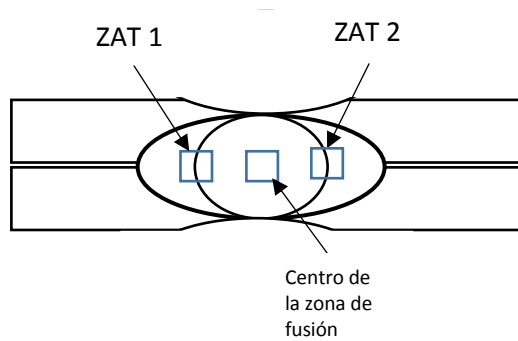
### Macrografías.

22MnB5-22MnB5			
Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
			
			
			
			
22MnB5-1006			
Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
			
			
			
			

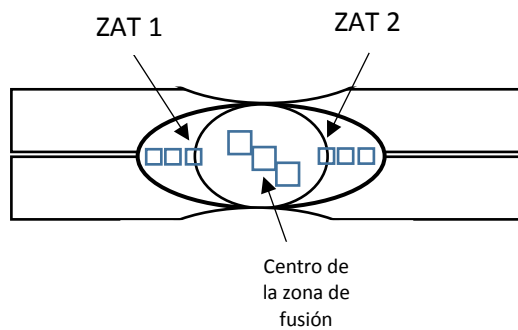
## Apéndice C

### Micrografías.

La micrografía que se tomaron en aumento de 50X y 100X se muestra en el diagrama de a continuación.

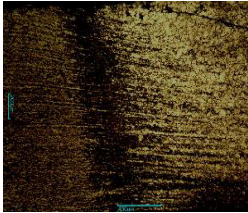
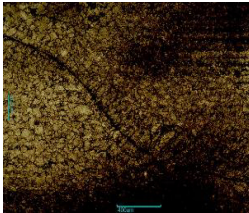
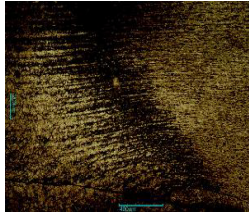


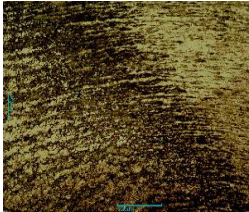
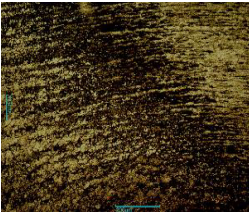
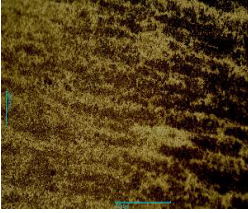
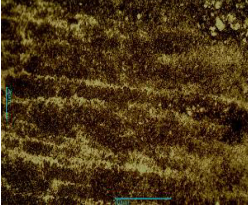

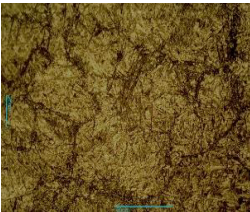
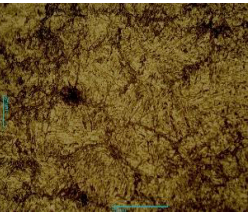
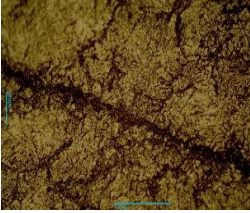
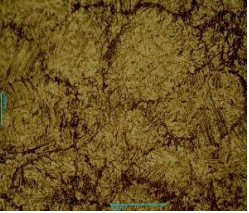
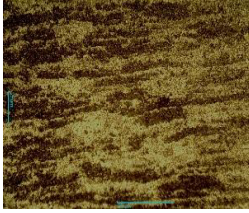
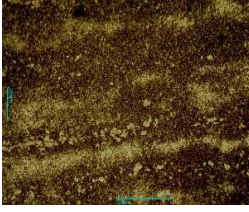



Para las micrografías tomadas en el aumento 500X se utilizó el diagrama de a continuación.

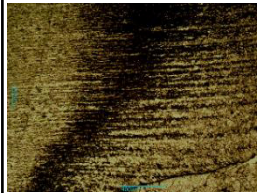

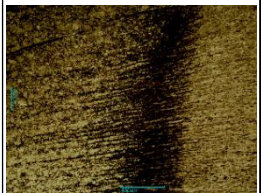
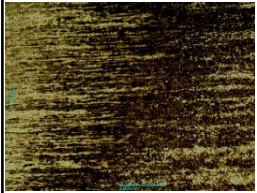
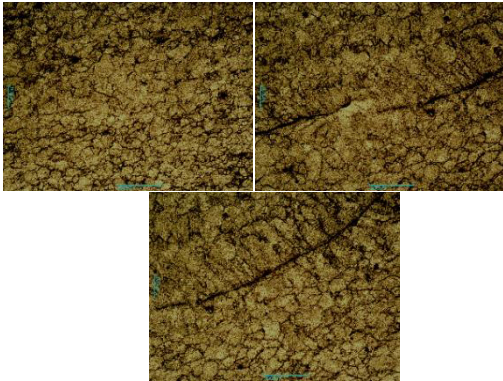
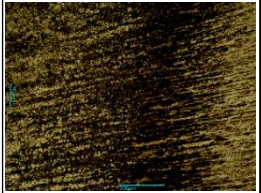

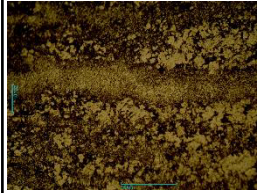
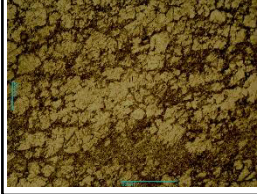
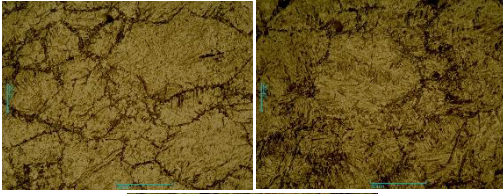
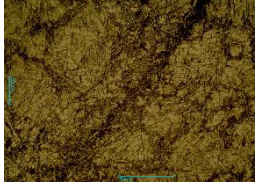
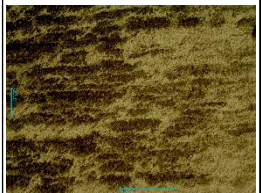
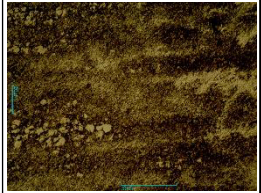





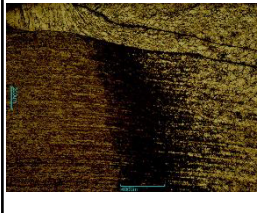
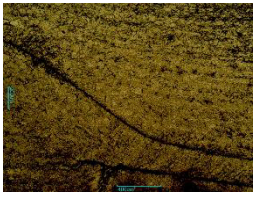

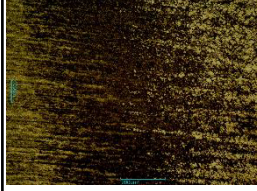
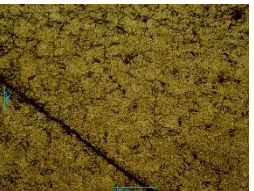
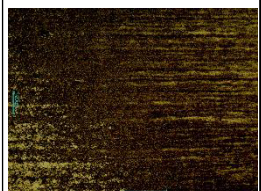

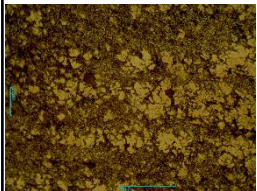
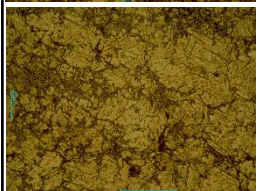
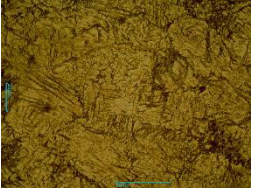
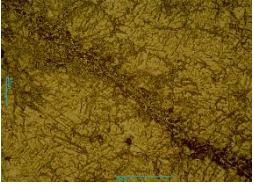



C1.1 Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro de fusión	ZAT 2
	<p data-bbox="834 432 885 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="834 716 885 741">100X</p> 	 
  	<p data-bbox="818 1142 868 1167">500X</p>    	  

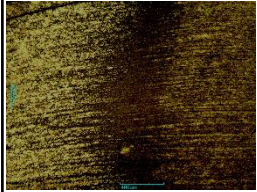


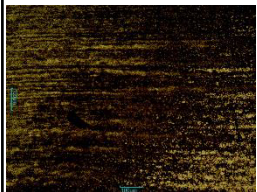
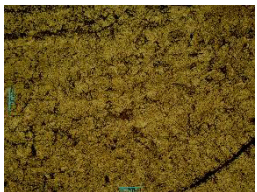
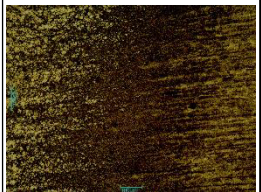
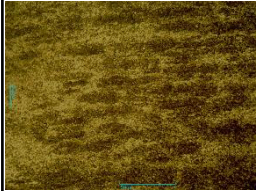
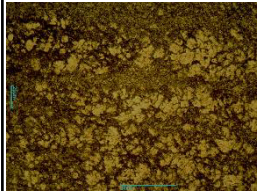
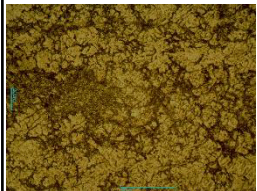
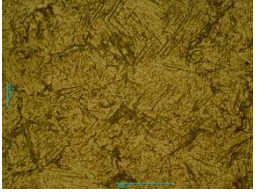
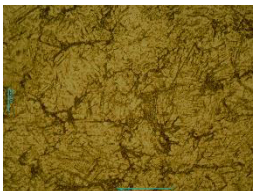

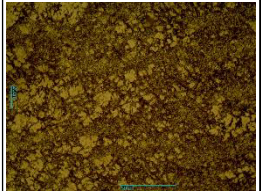
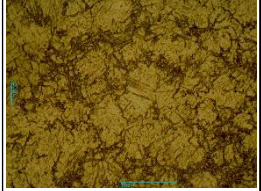
C1.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 709 894 739">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 886 1169">500X</p>  	  

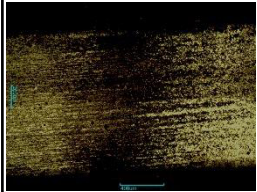

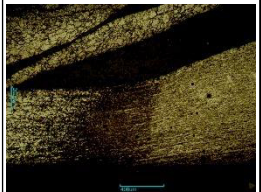
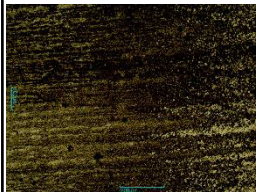

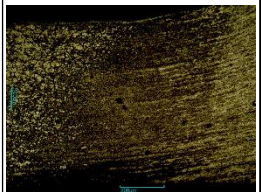
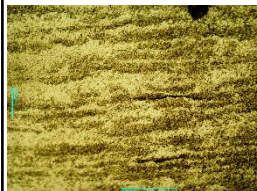

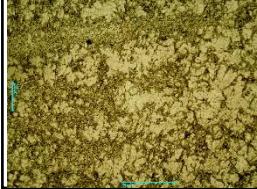
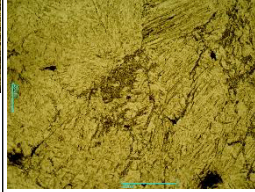





C1.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 3.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 889 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 889 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1136 865 1167">500X</p>  	  

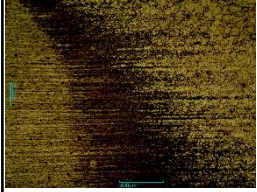

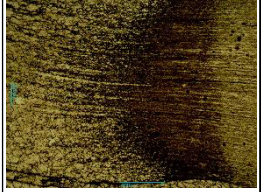
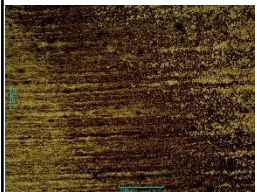

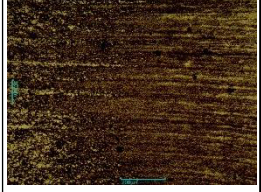








C1.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 1, Repetición 4.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="834 432 857 462">5</p> 	
	<p data-bbox="834 716 899 745">100X</p> 	
  	<p data-bbox="818 1136 883 1165">500X</p>  	  

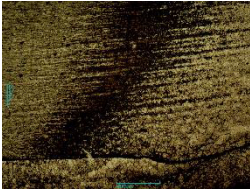

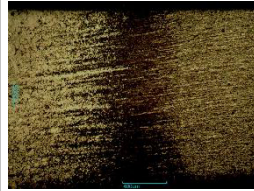
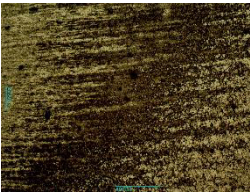

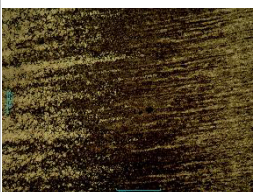
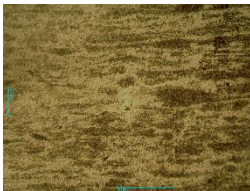
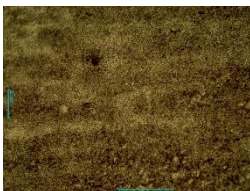




C2.1. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 745">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1142 878 1171">500X</p>   	  

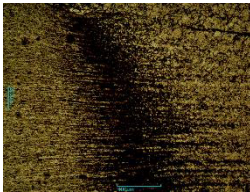


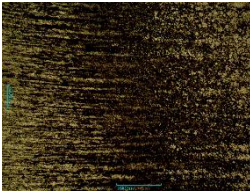
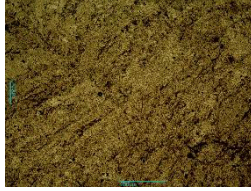


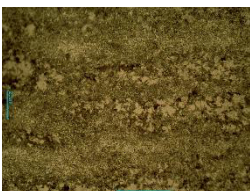
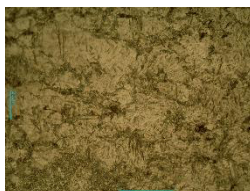
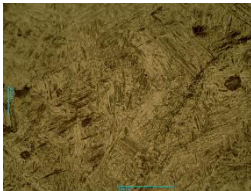


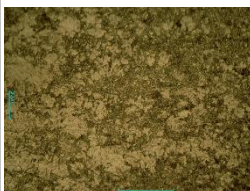
C2.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 886 1171">500X</p>  	  

C2.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 3.

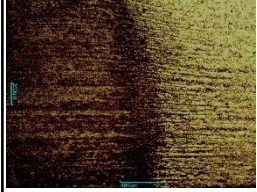


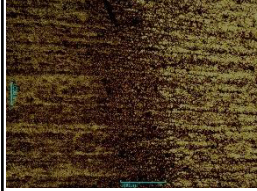
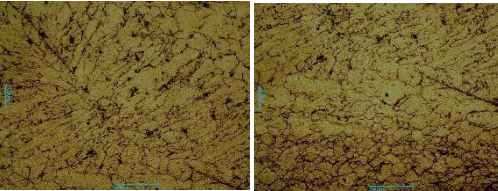
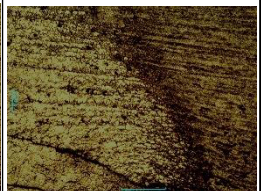

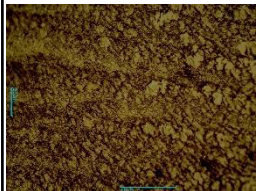
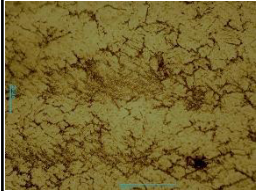
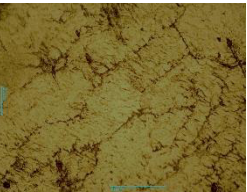
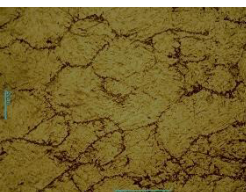
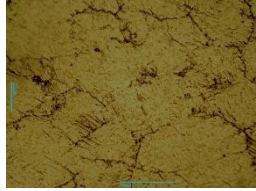


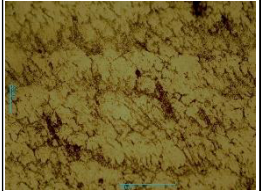
ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 886 1171">500X</p> 	 

C2.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 2, Repetición 4.



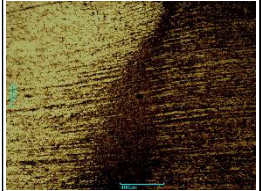

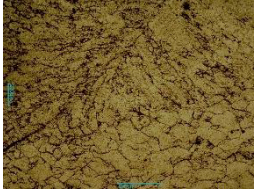


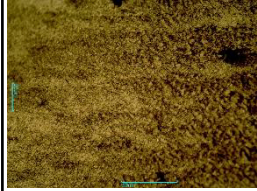

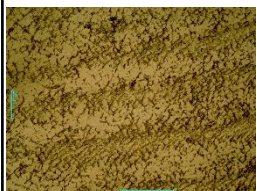

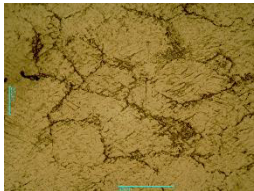





ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 720 894 751">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 878 1171">500X</p> 	  



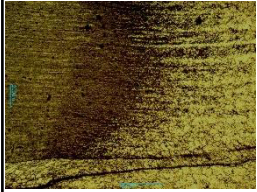

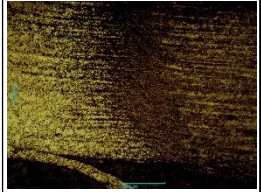


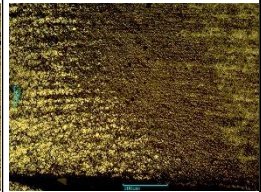


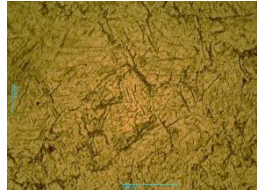
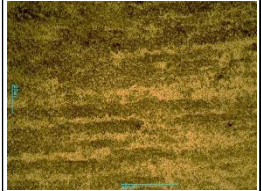

C3.1. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 889 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 718 889 743">100X</p> 	
  	<p data-bbox="815 1138 863 1163">500X</p>   	  




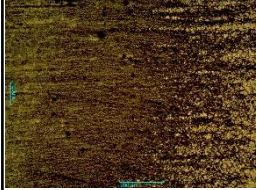
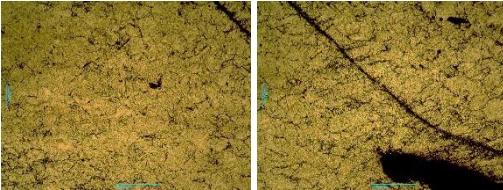
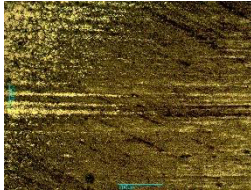


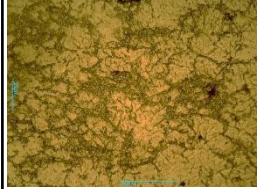

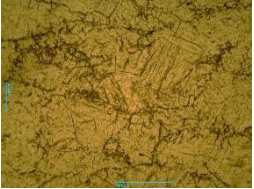
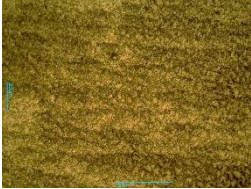

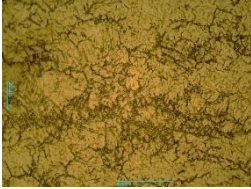
C3.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 747">100X</p>  	
  	<p data-bbox="816 1136 886 1167">500X</p>    	  



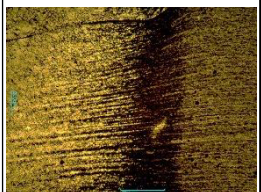
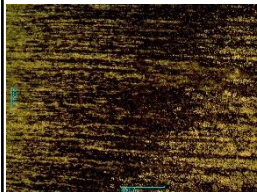

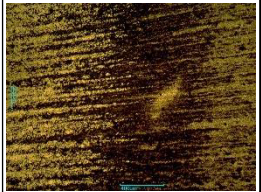

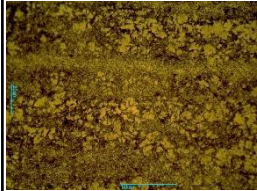



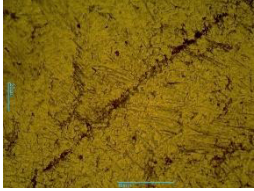
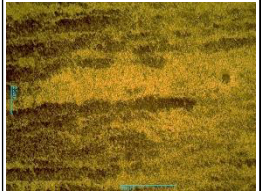
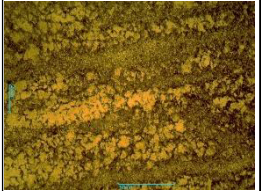

C3.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 3.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="834 432 885 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="821 716 885 741">100X</p>  	
 	<p data-bbox="802 1142 865 1167">500X</p> 	 

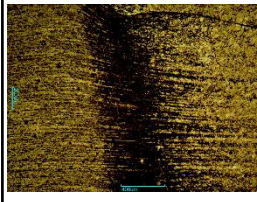
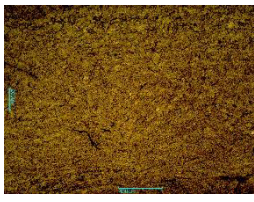
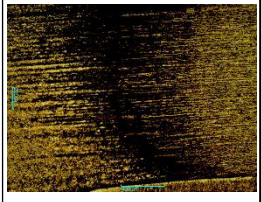
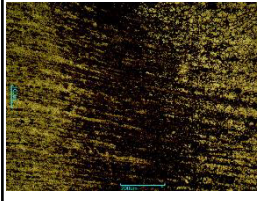

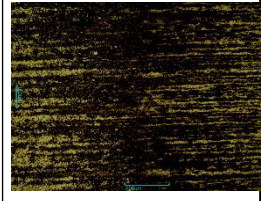

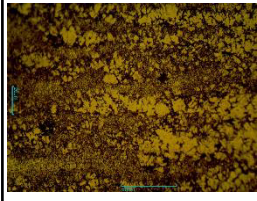


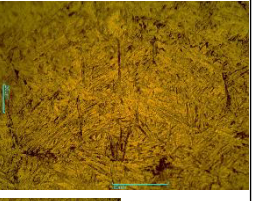

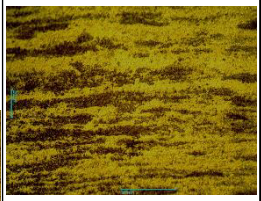

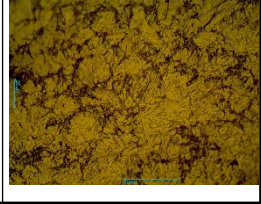
C3.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 3, Repetición 4.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 881 1171">500X</p>  	  



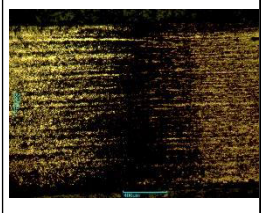

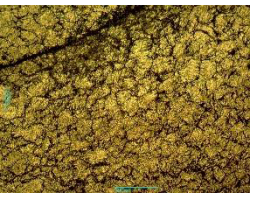
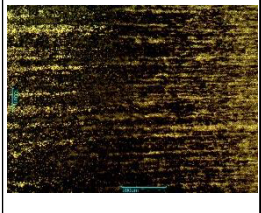

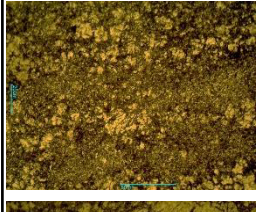
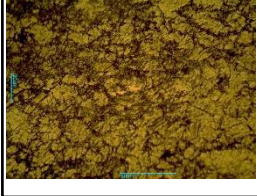

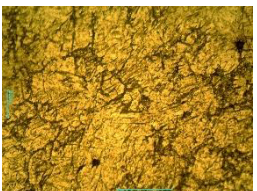
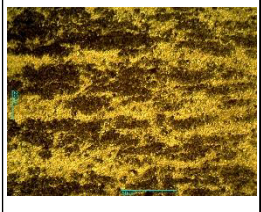
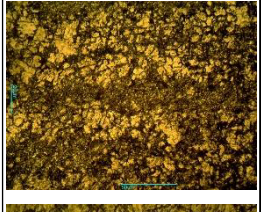
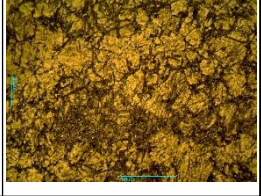
C4.1. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 889 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 889 741">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 865 1165">500X</p>   	  

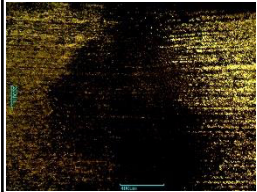

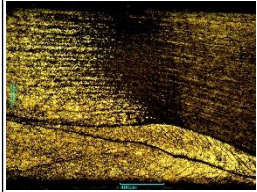



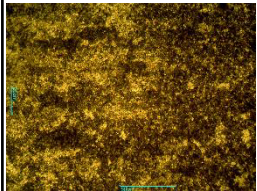
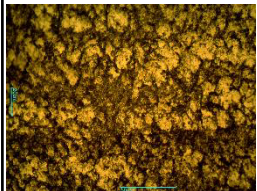
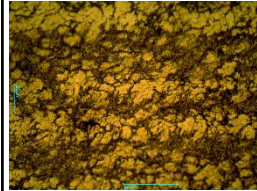
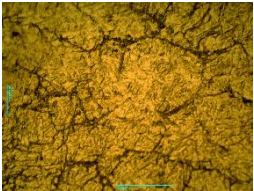
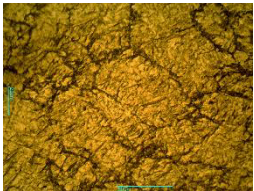
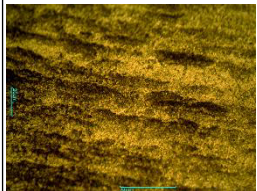

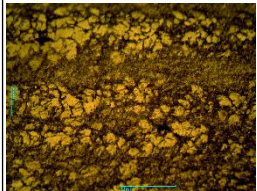
C4.2. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 745">100X</p> 	
  	<p data-bbox="818 1136 878 1165">500X</p>   	  

C4.3. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 3.




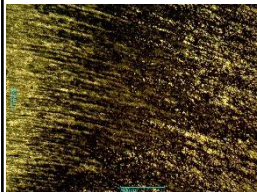
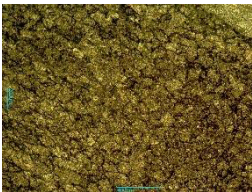
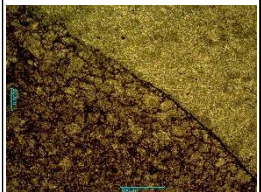

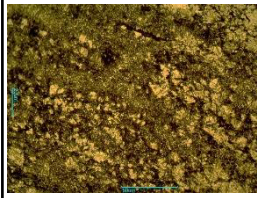

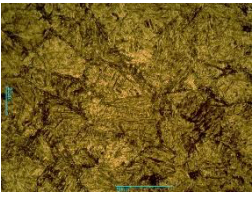
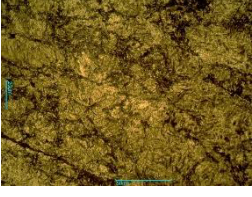

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 745">100X</p> 	
  	<p data-bbox="818 1136 878 1165">500X</p>  	  

C4.4. Micrografías 22MnB5-22MnB5 Condición 4, Repetición 4.



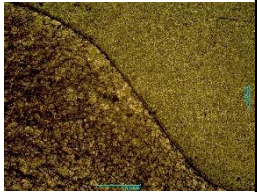
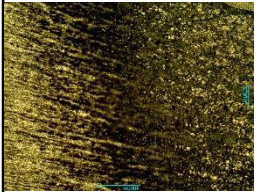

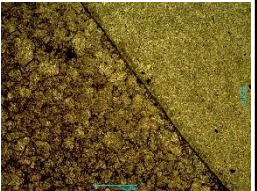
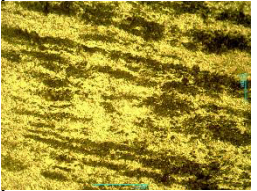
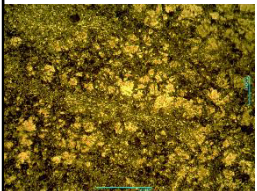

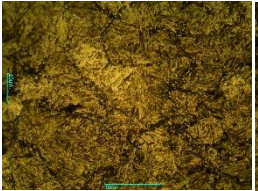

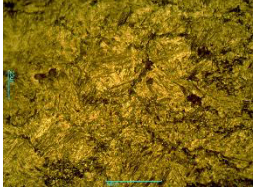
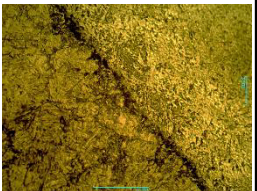
ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 889 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 889 741">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1136 865 1161">500X</p>  	  



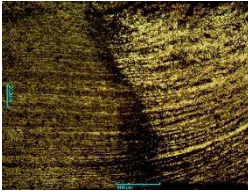


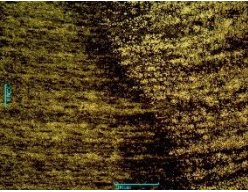


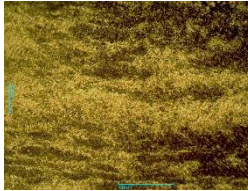
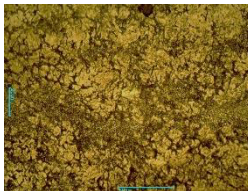

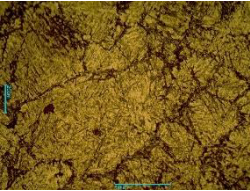

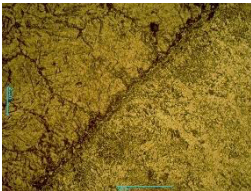
C5.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 745">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1136 886 1165">500X</p>  	

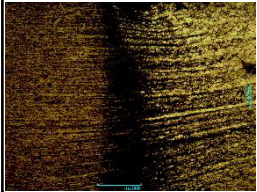
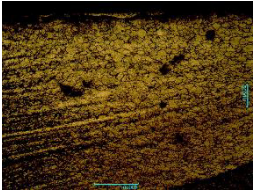
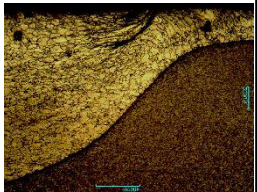
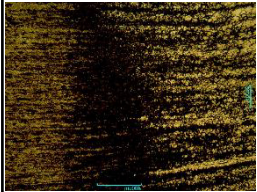

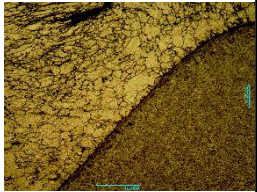

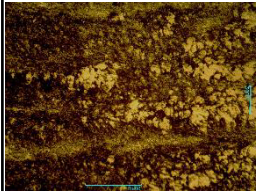
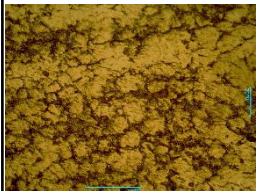
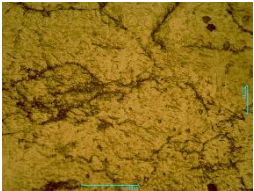
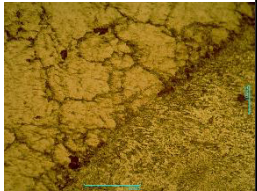
C5.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 893 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 893 741">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 868 1165">500X</p>   	

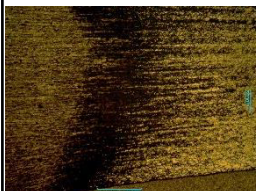

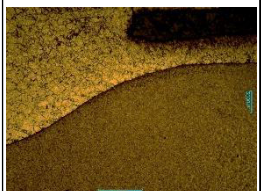
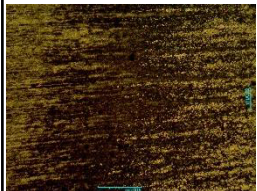



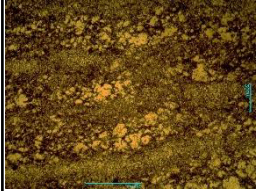
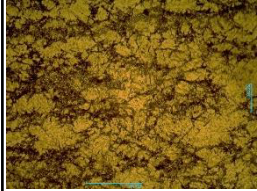
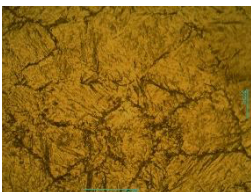


C5.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 3.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 430 889 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 714 889 741">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 865 1167">500X</p>  	

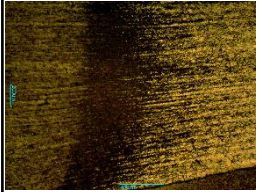
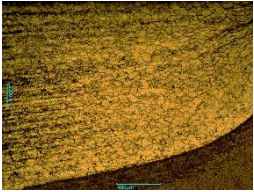
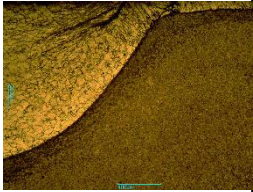
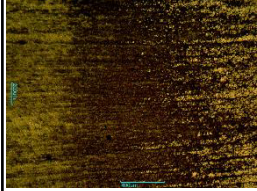

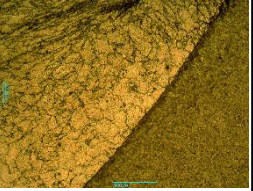
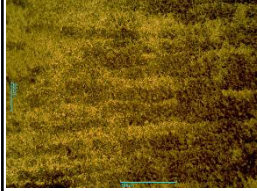
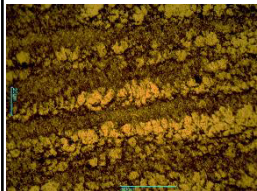


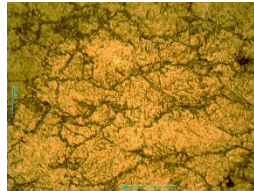
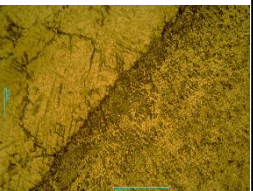
C5.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 1, Repetición 4.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1142 883 1173">500X</p> 	

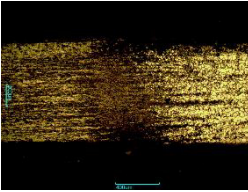


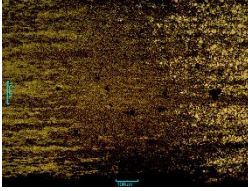
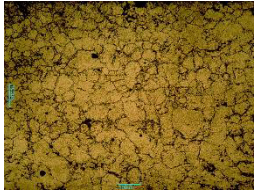
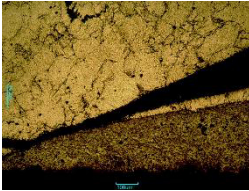
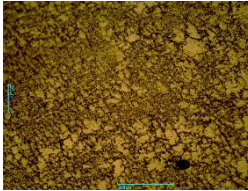
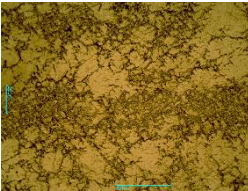

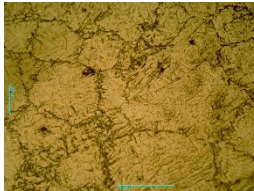
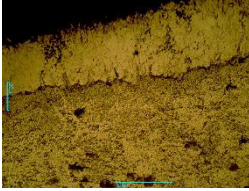
C6.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 705 894 735">100X</p> 	
  	<p data-bbox="818 1146 872 1176">500X</p>  	

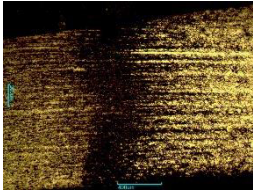
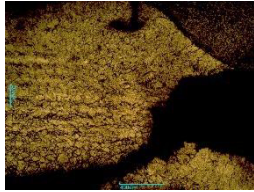

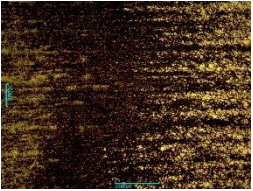






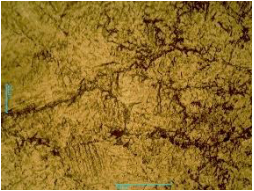
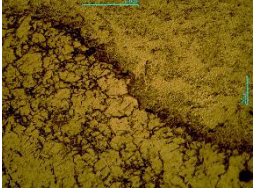
C6.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 889 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 889 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1136 865 1167">500X</p>  	

C6.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 3.

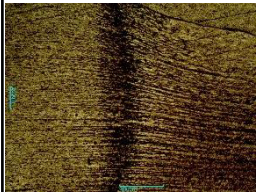
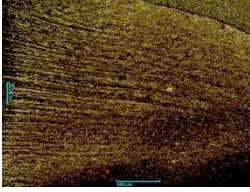



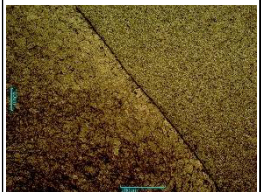
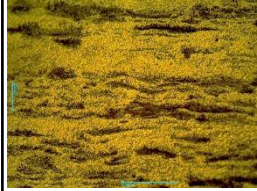






ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 430 889 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 889 743">100X</p> 	
 	<p data-bbox="816 1136 865 1163">500X</p>  	

C6.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 2, Repetición 4.

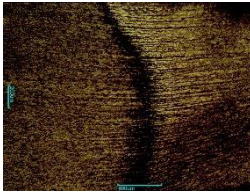
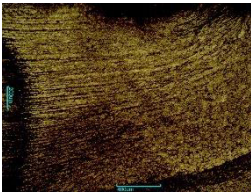
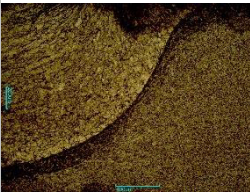
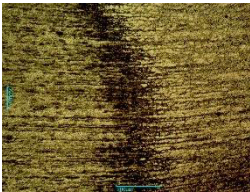





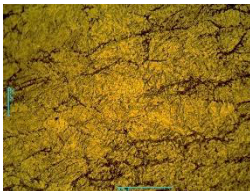

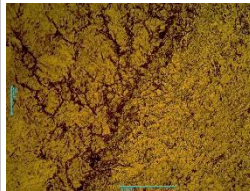
ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p style="text-align: center;">50X</p> 	
	<p style="text-align: center;">100X</p>  	
 	<p style="text-align: center;">500X</p>  	



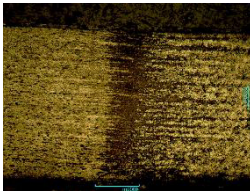

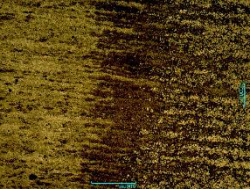
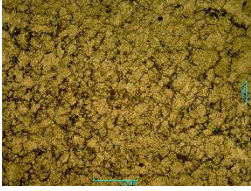

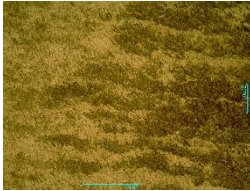
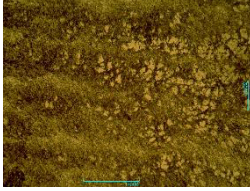
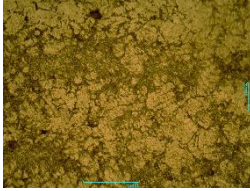
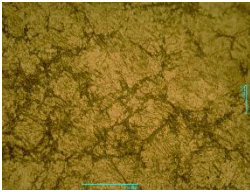
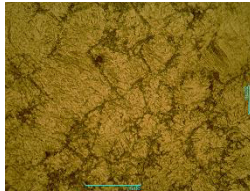
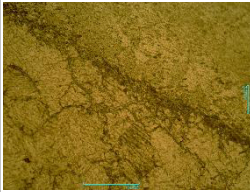

C7.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 705 894 735">100X</p> 	
  	<p data-bbox="818 1146 872 1176">500X</p>   	

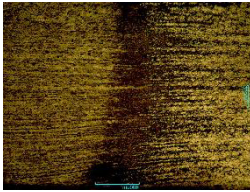
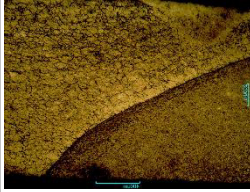
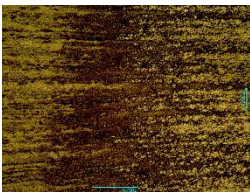
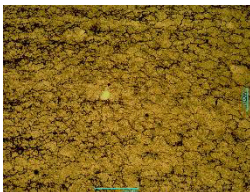


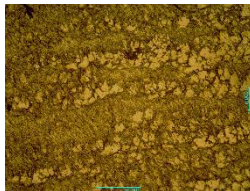
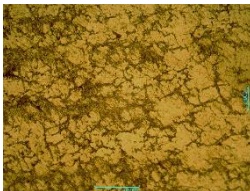
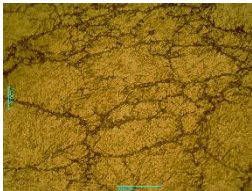


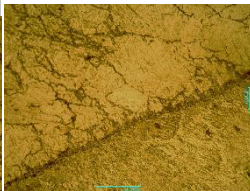
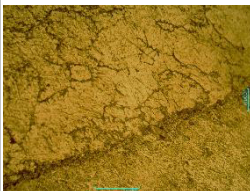
C7.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 741">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1140 881 1165">500X</p>  	

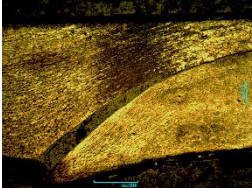
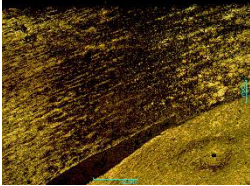
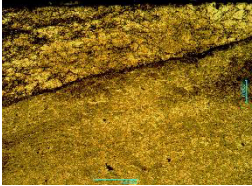

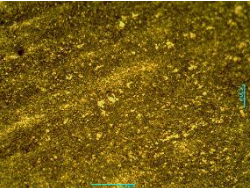


C7.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 3.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 428 894 457">50X</p>	
	<p data-bbox="834 716 901 745">100X</p> 	
  	<p data-bbox="818 1140 885 1169">500X</p>  	 

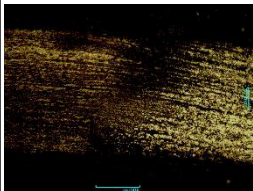
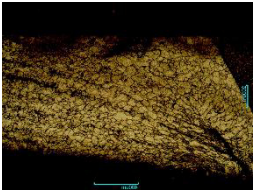
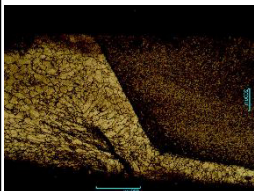
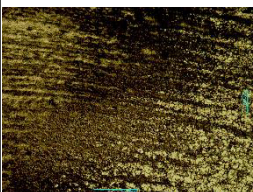
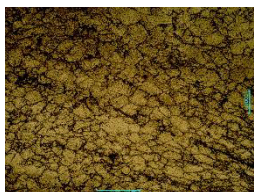
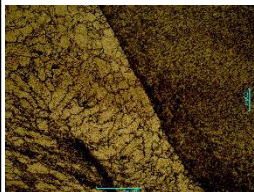
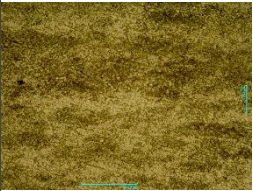
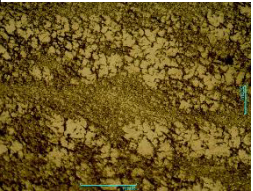
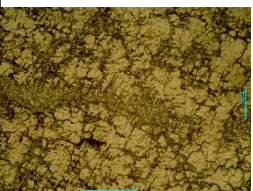
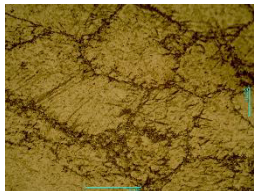
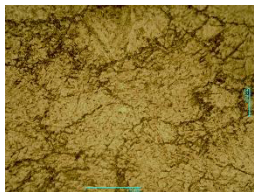
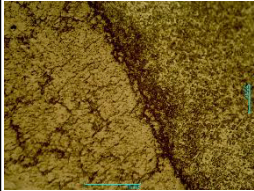
C7.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 3, Repetición 4.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p>50X</p>	
	<p>100X</p> 	
  	<p>500X</p>   	 

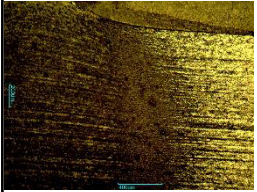
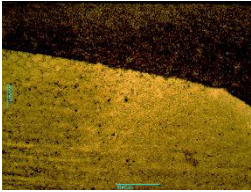
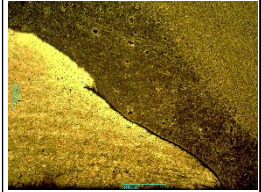
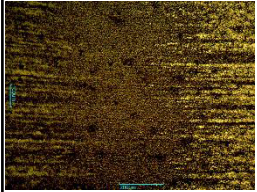
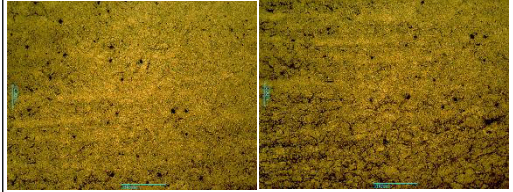
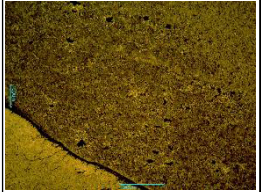
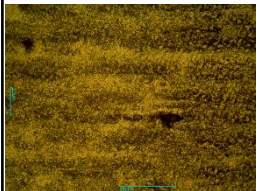
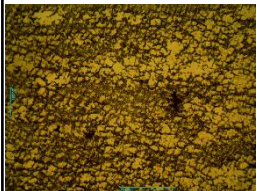




C8.1. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 1.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 889 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 889 741">100X</p> 	
 	<p data-bbox="816 1140 865 1165">500X</p> 	

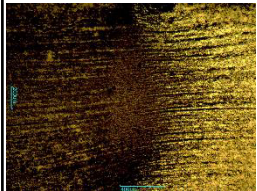
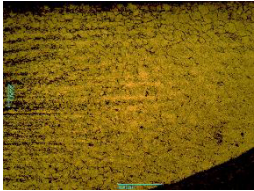
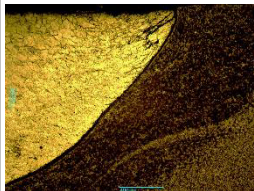
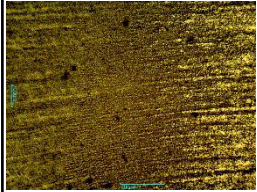


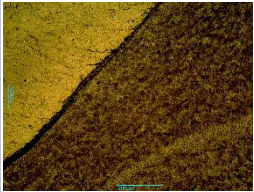

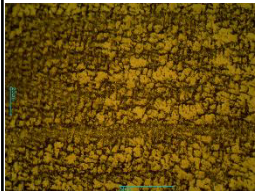





C8.2. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 2.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="792 411 831 441">50X</p> 	
	<p data-bbox="792 695 831 724">100X</p> 	
  	<p data-bbox="764 1119 826 1148">500X</p>  	

C8.3. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 3.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="841 432 894 464">50X</p> 	
	<p data-bbox="841 716 894 747">100X</p> 	
  	<p data-bbox="816 1136 878 1167">500X</p>  	

C8.4. Micrografías 22MnB5-1006 Condición 4, Repetición 4.

ZAT 1	Zona centro del cordón	ZAT 2
	<p data-bbox="834 428 885 457">50X</p> 	
	<p data-bbox="834 716 901 745">100X</p>  	
  	<p data-bbox="818 1142 885 1171">500X</p>   	



## Apéndice D

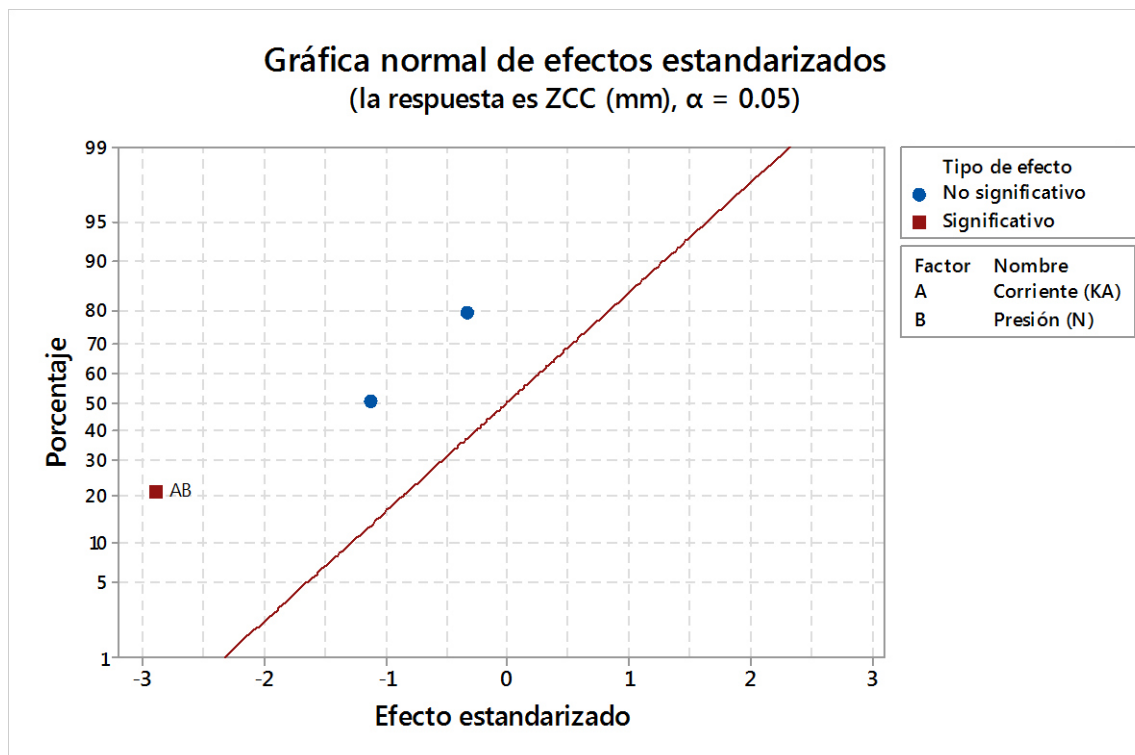
### Modelo estadístico.

Para mejor manejo de la información se abreviará los términos los cuales se expresan a continuación.

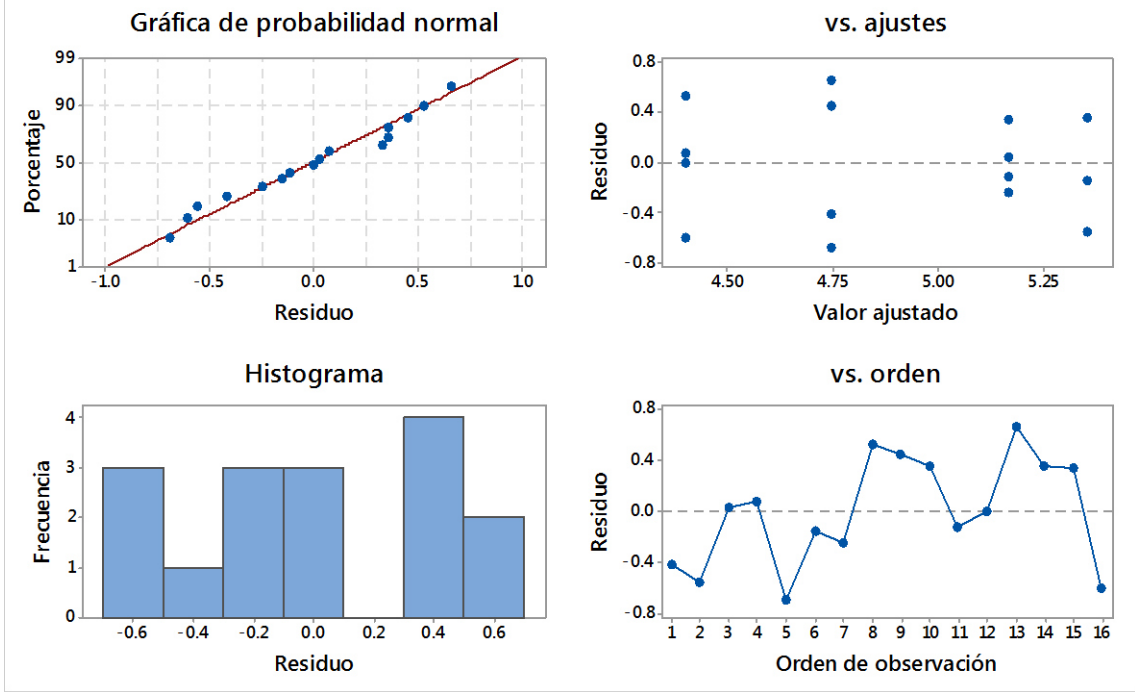
ZCC: Diámetro de la zona centro de fusión.

ZAT: Zona afecta térmicamente.

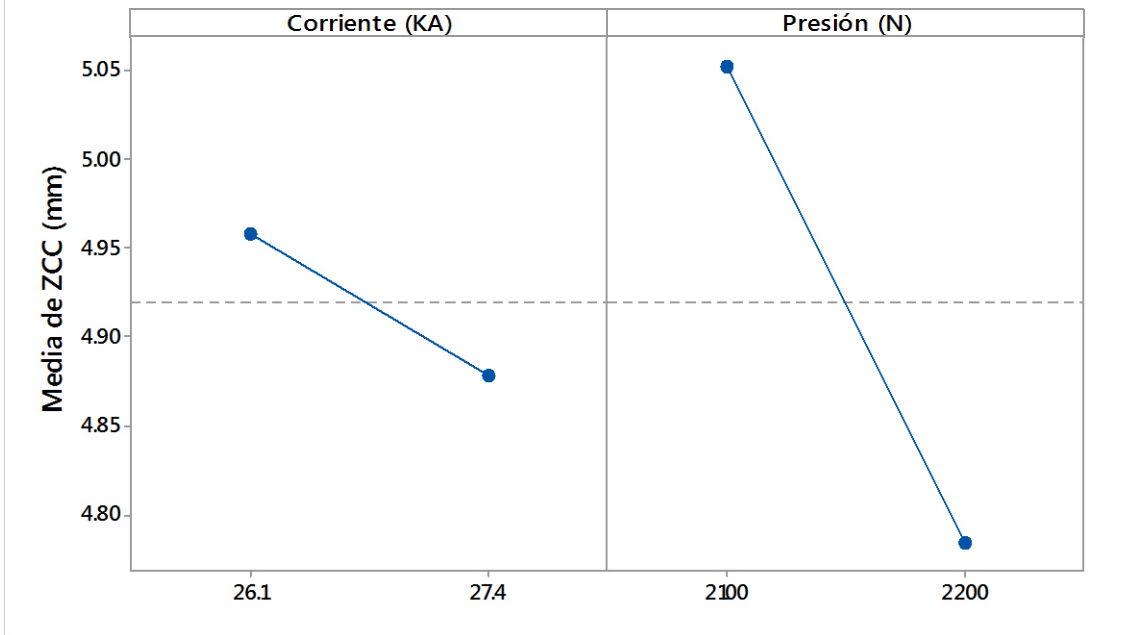
D1.1. Modelo estadístico para el diámetro de la zona de fusión 22MnB5.

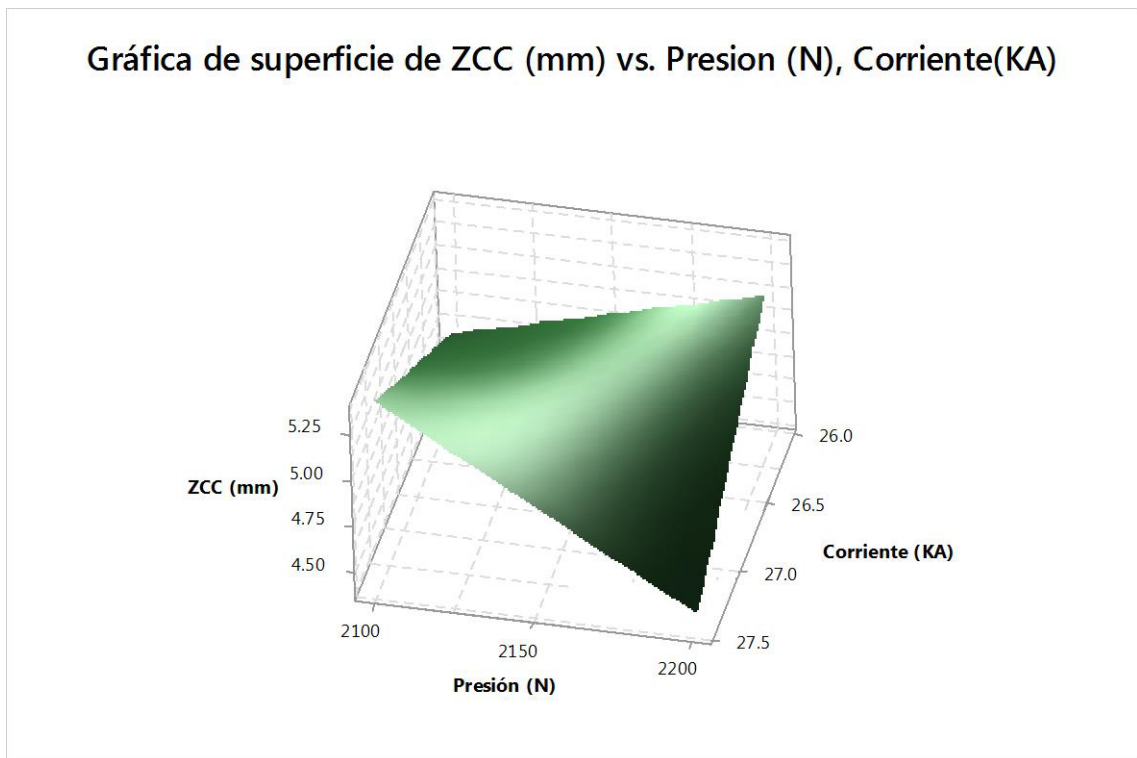
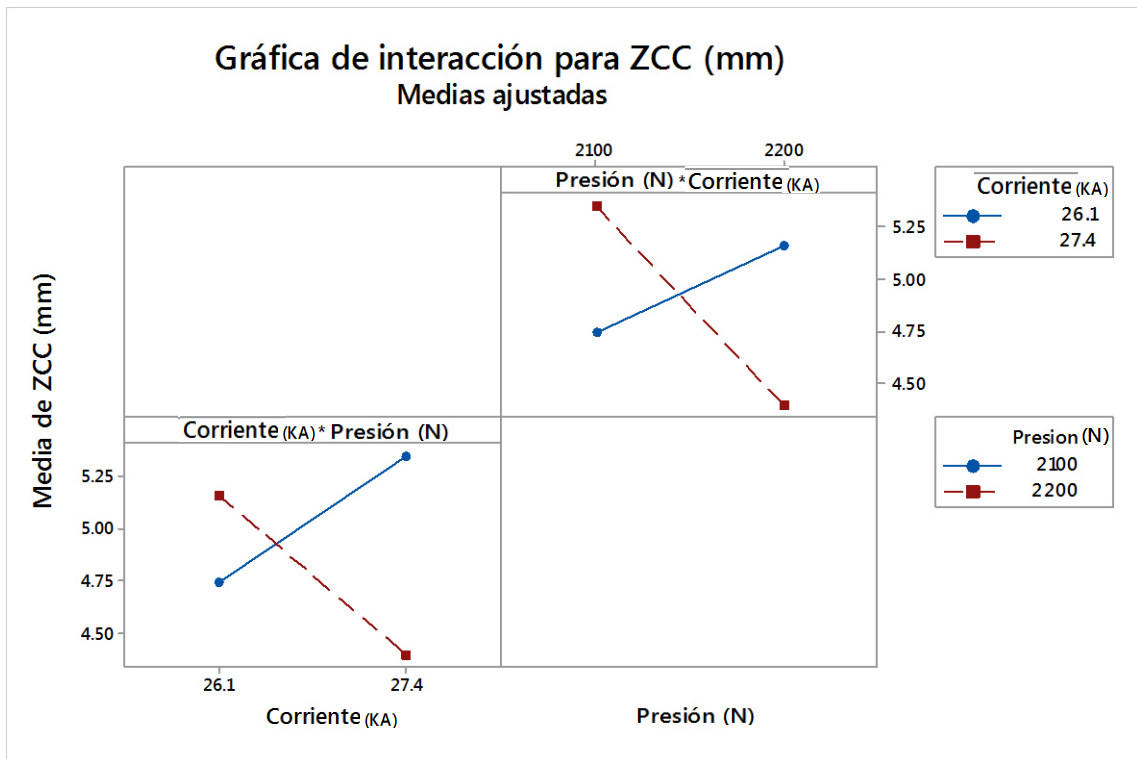


### Gráficas de residuos para ZCC (mm)

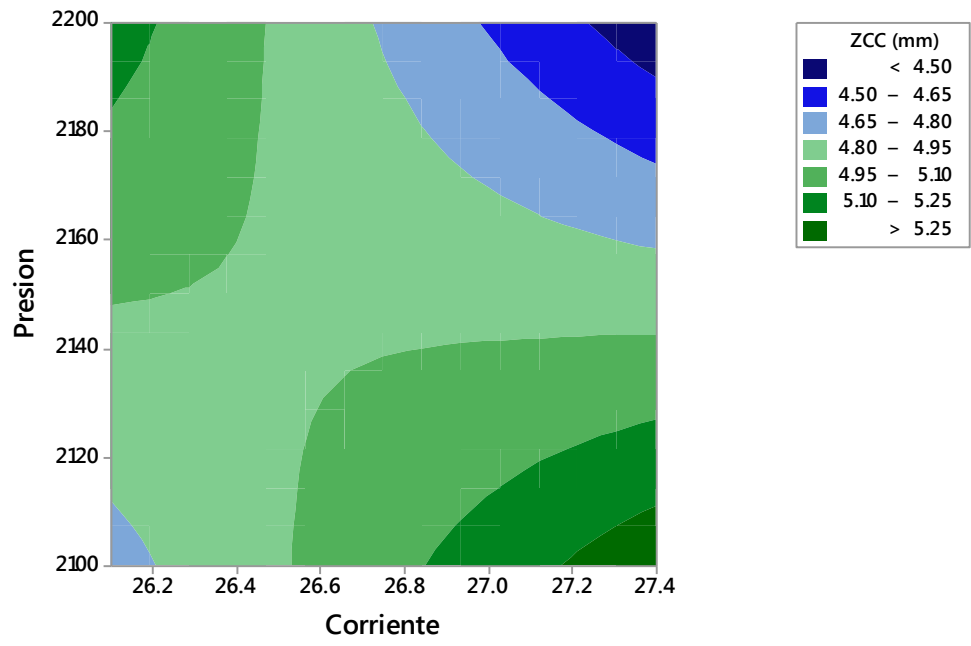


### Gráfica de efectos principales para ZCC (mm) Medias ajustadas

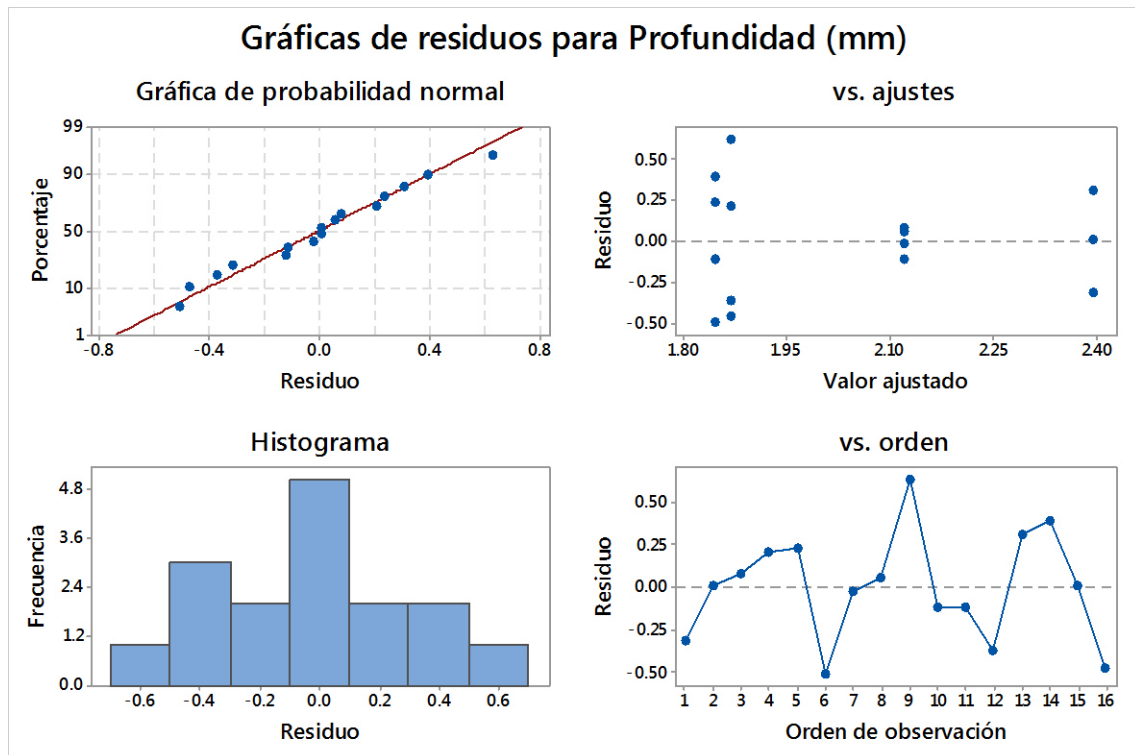
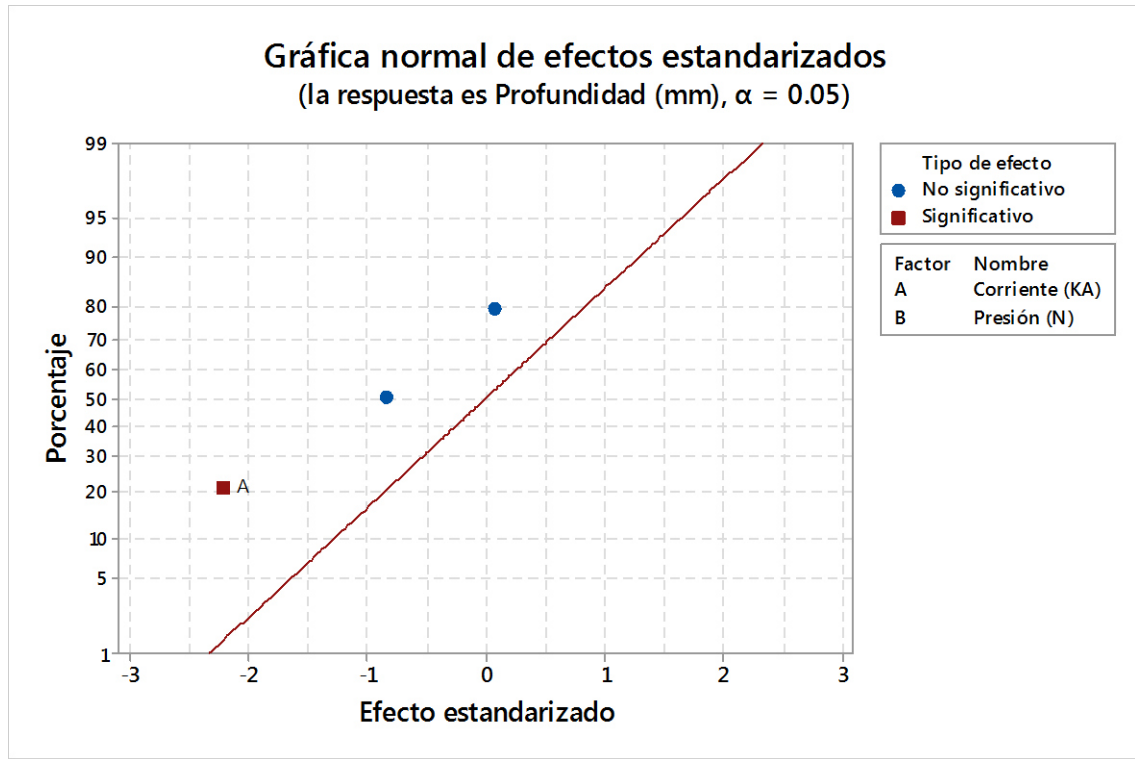




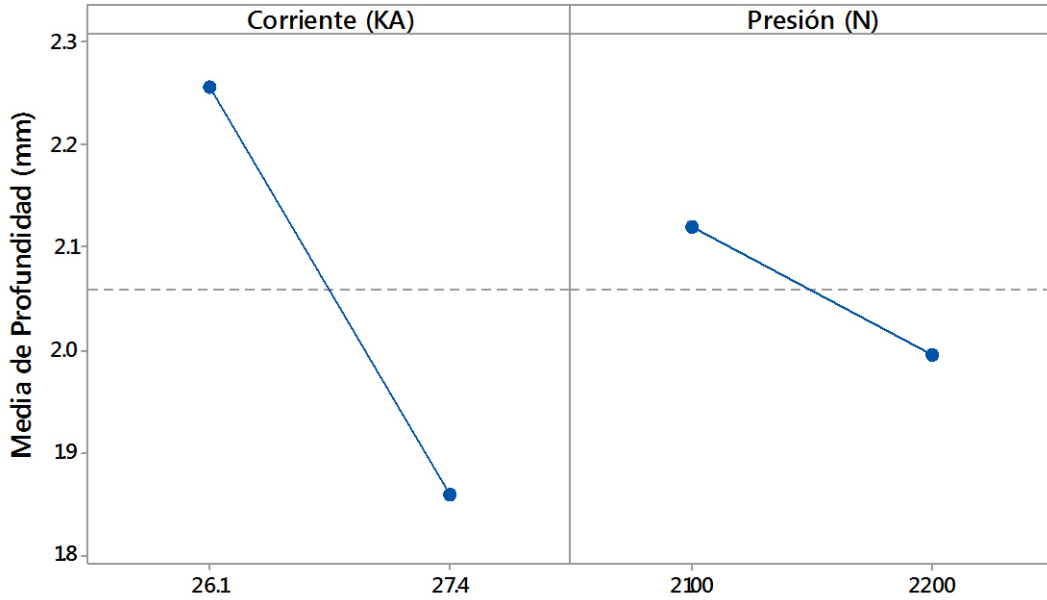
Gráfica de contorno de ZCC (mm) vs. Presion (N), Corriente (KA)



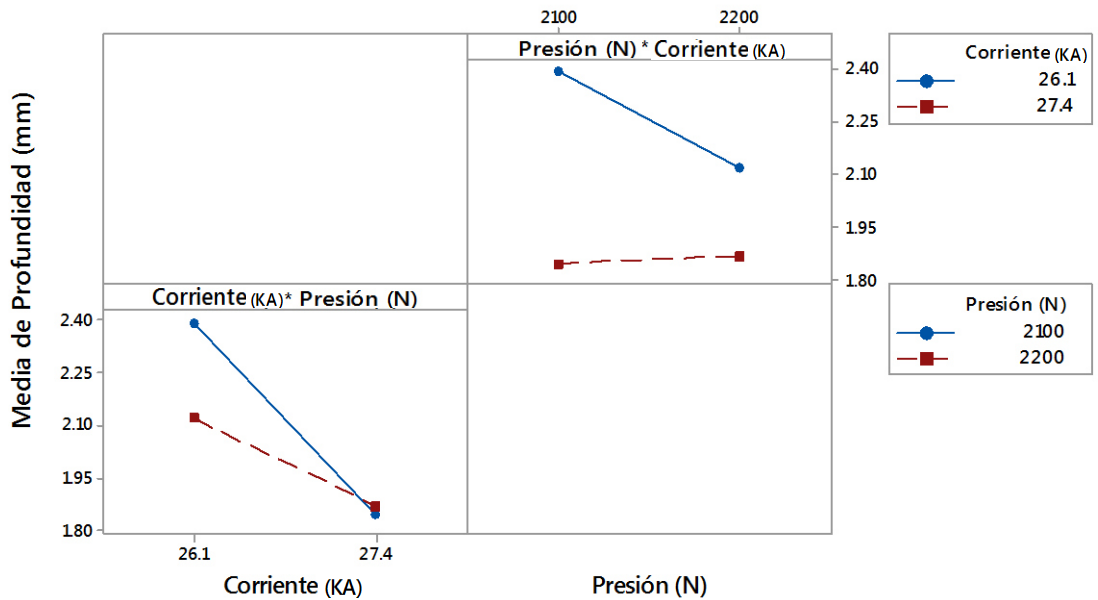
D1.2. Modelo estadístico para profundidad de la zona de fusión 22MnB5-22MnB5.



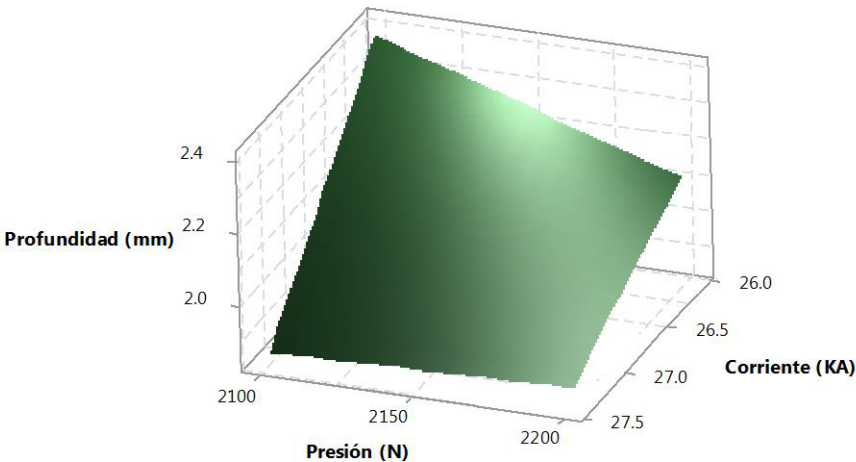
Gráfica de efectos principales para Profundidad (mm)  
Medias ajustadas



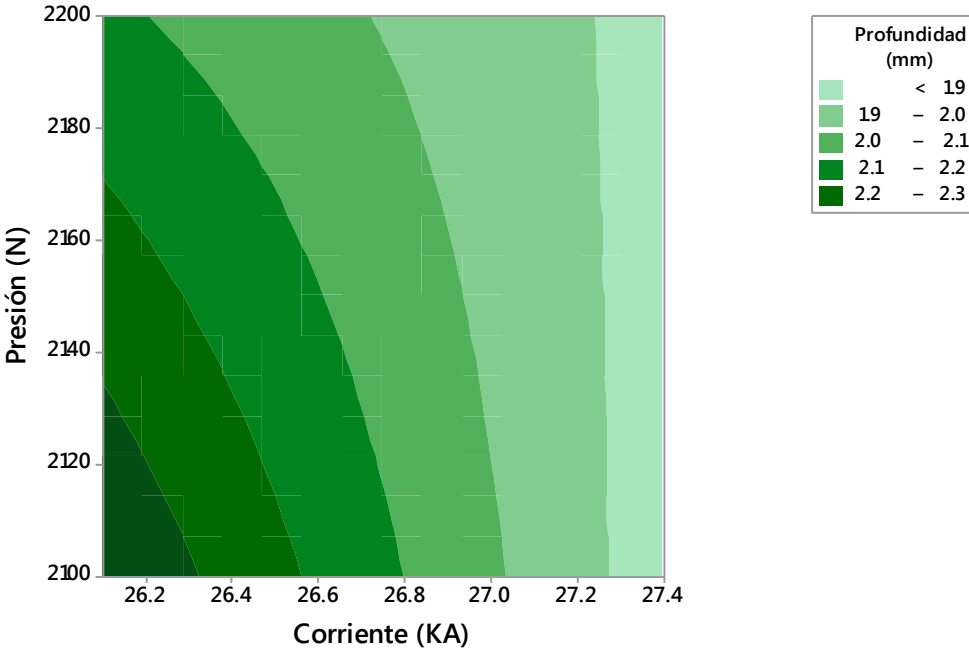
Gráfica de interacción para Profundidad (mm)  
Medias ajustadas



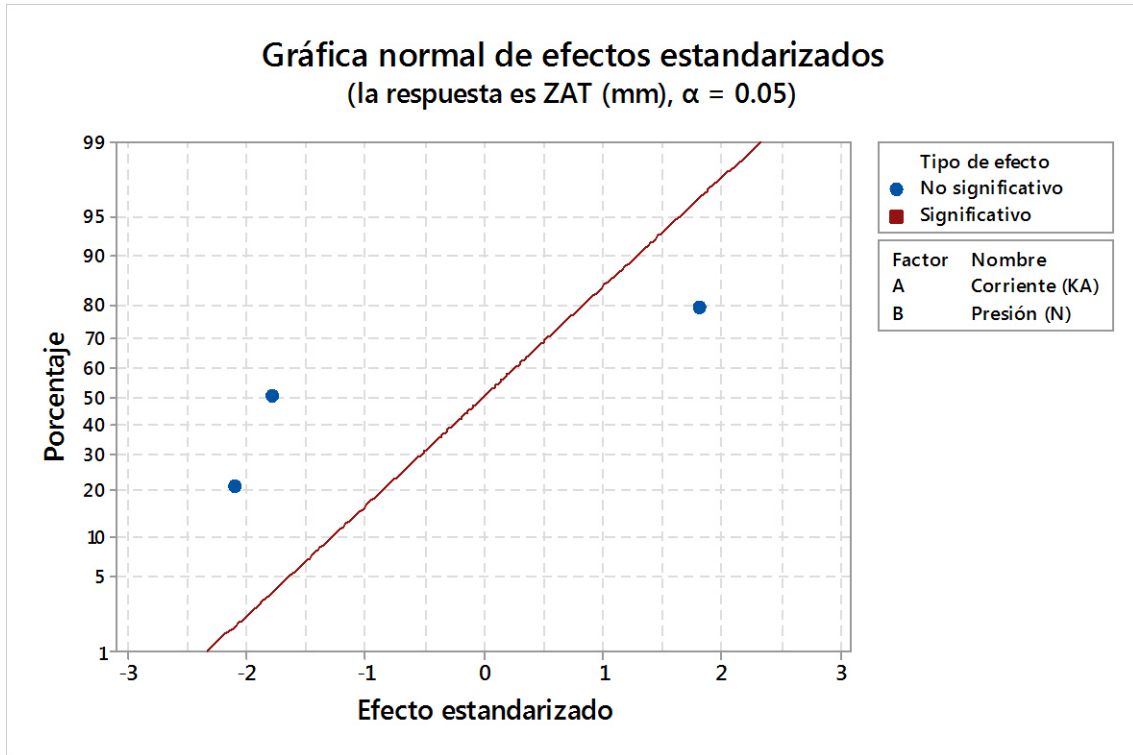
Gráfica de superficie de Profundidad (mm) vs. Presión (N), Corriente (KA)



Gráfica de contorno de Profundidad (mm) vs Presión (N), Corriente (KA)

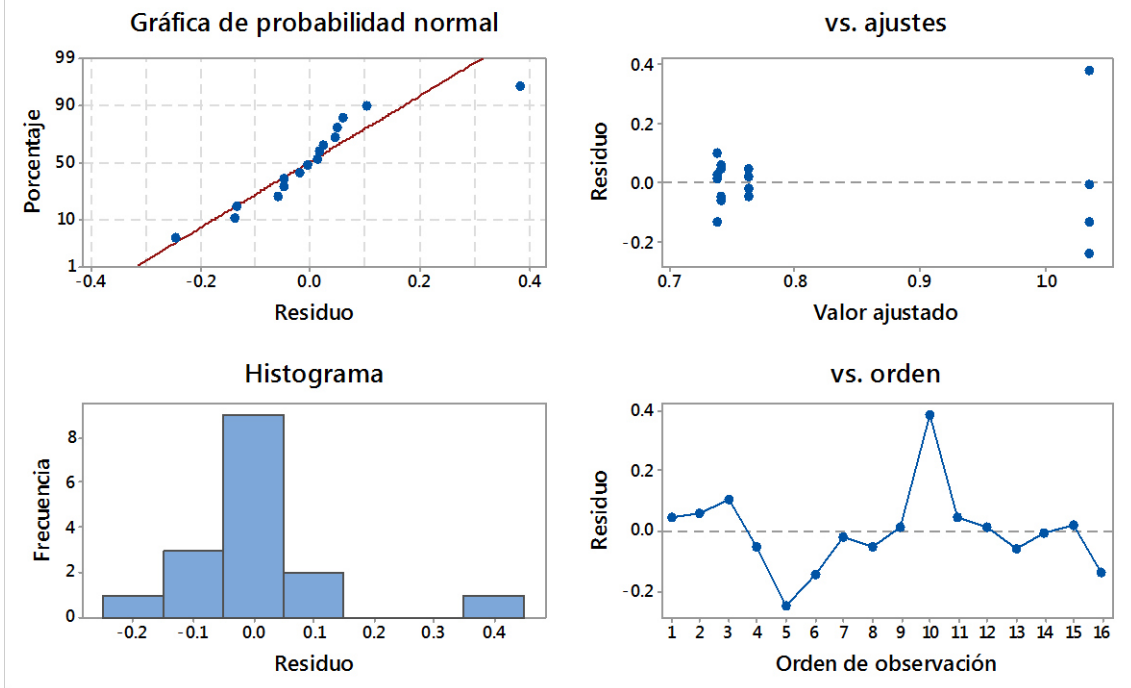


D1.3. Modelo estadístico para la zona afectada térmicamente 22MnB5-22MnB5.

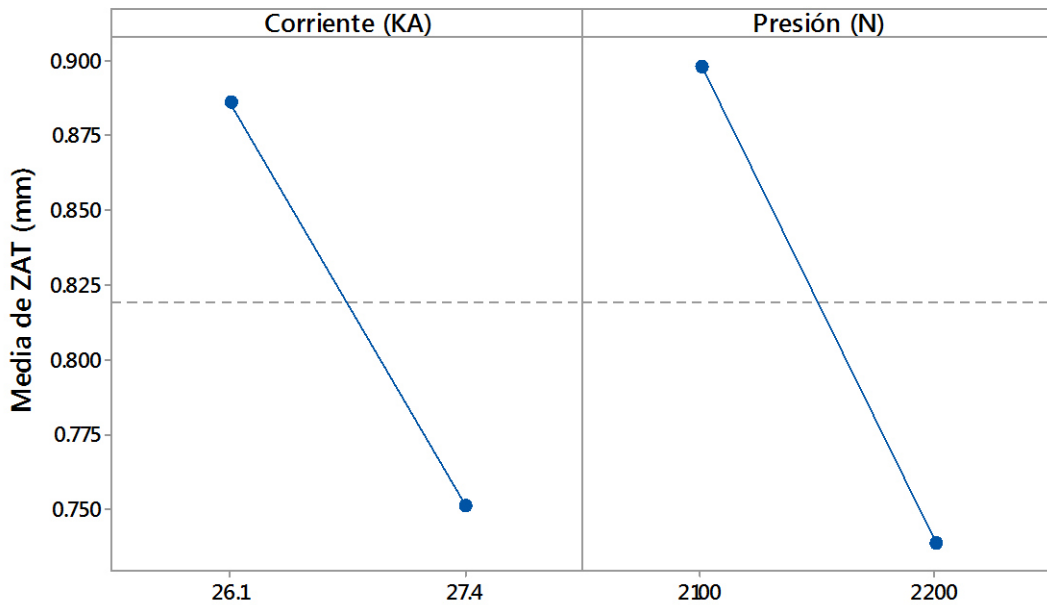




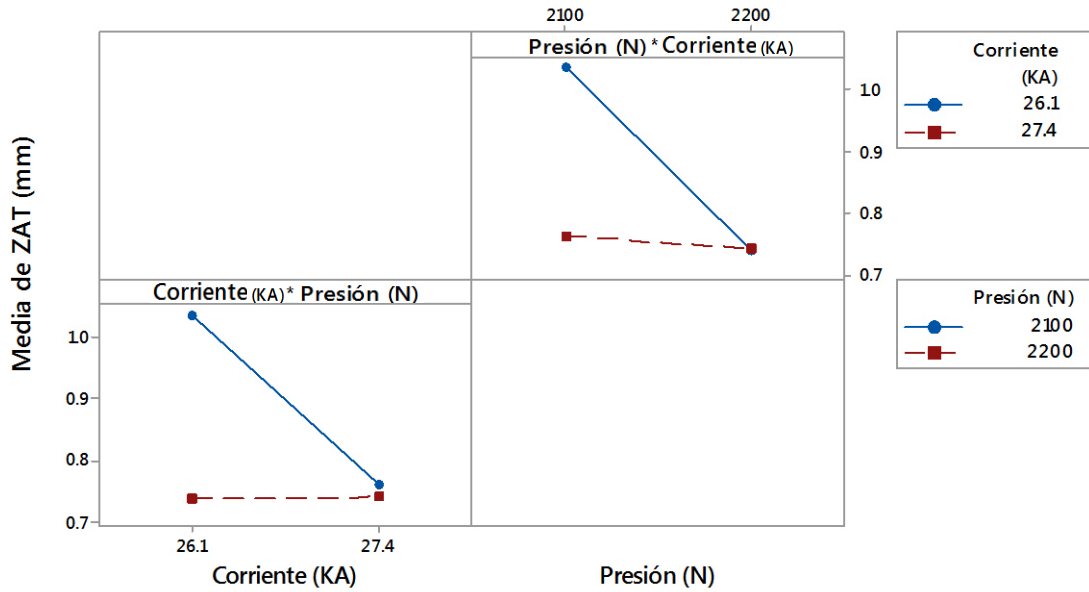
### Gráficas de residuos para ZAT (mm)



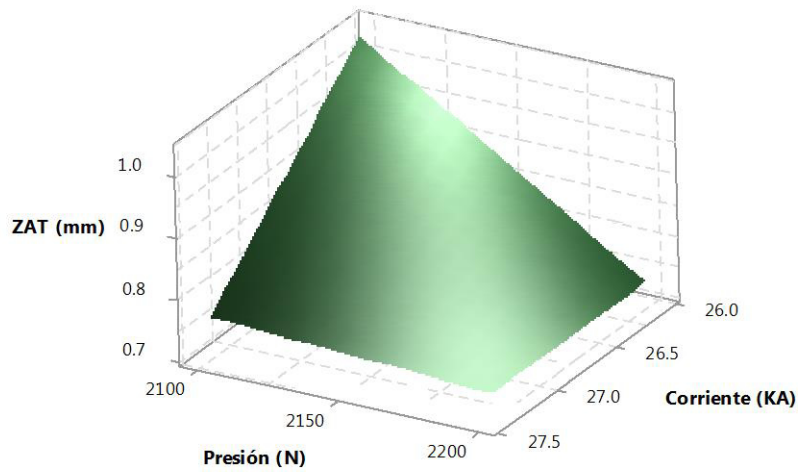
### Gráfica de efectos principales para ZAT (mm) Medias ajustadas



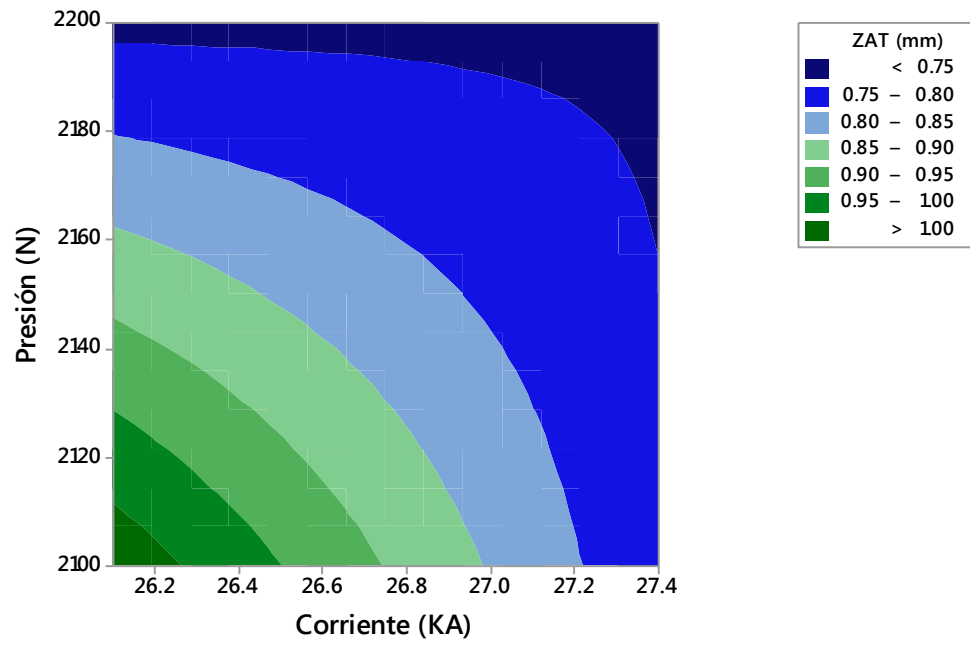
### Gráfica de interacción para ZAT (mm) Medias ajustadas



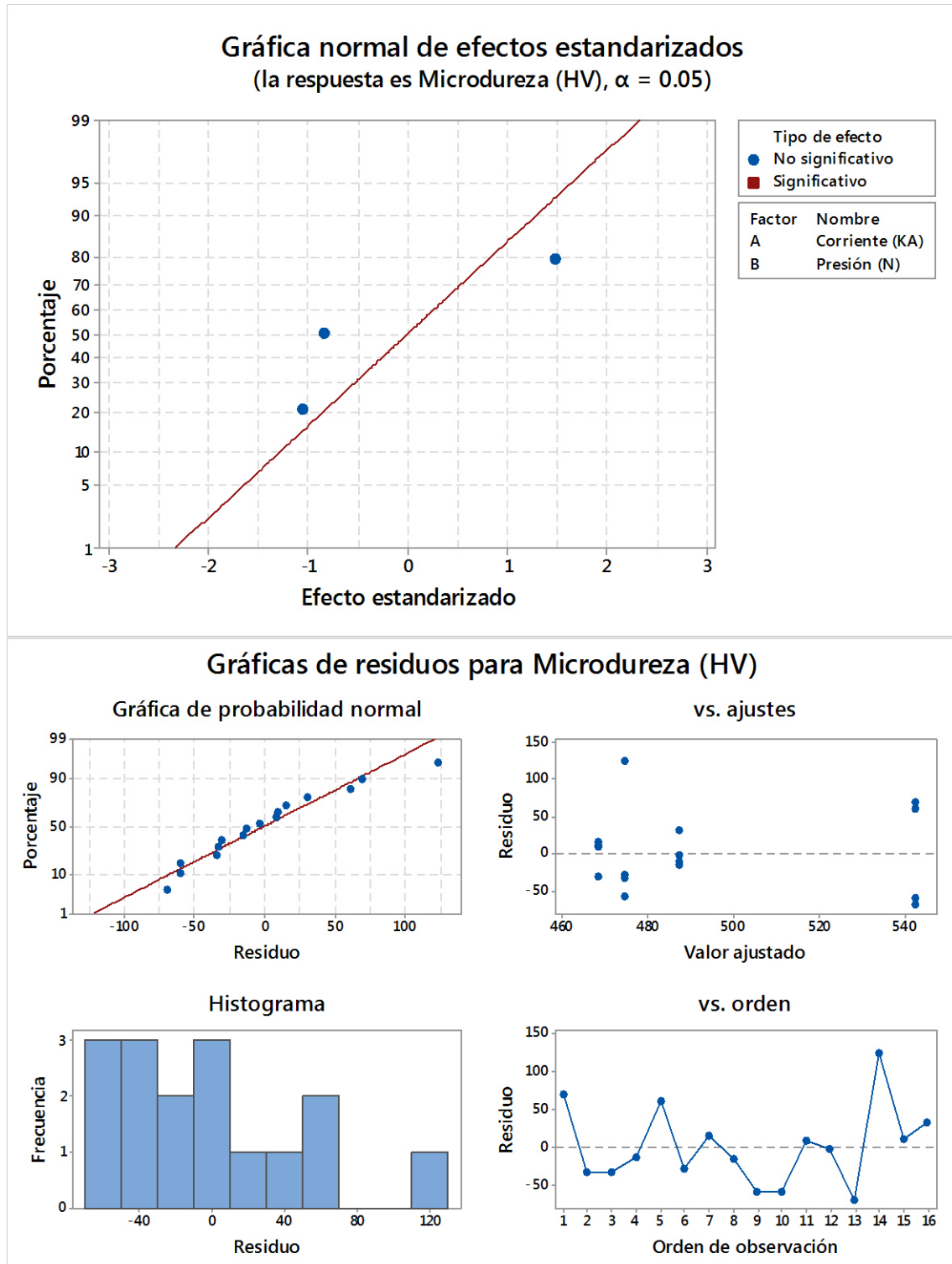
### Gráfica de superficie de ZAT (mm) vs. Presión (N), Corriente (KA)



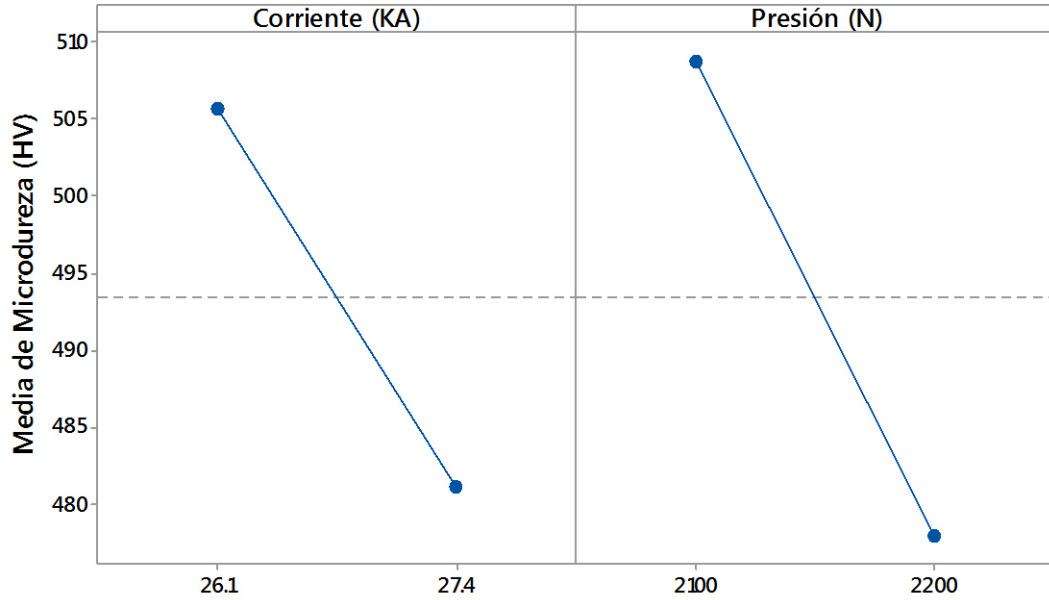
Gráfica de contorno de ZAT (mm) vs. Presión (N), Corriente (KA)



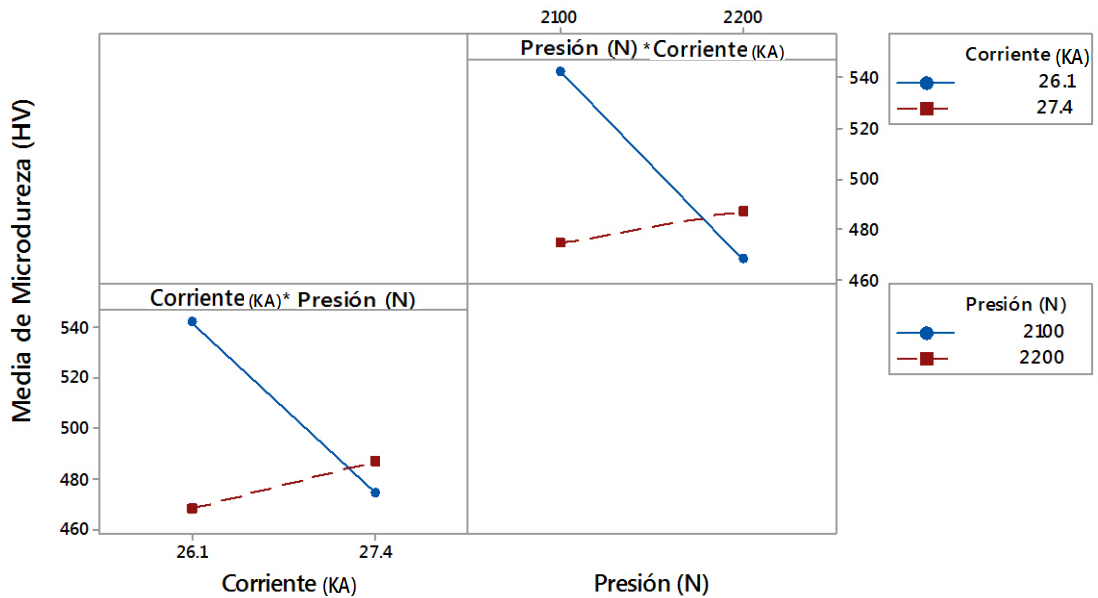
D1.4. Modelo estadístico microdureza 22MnB5-22MnB5.



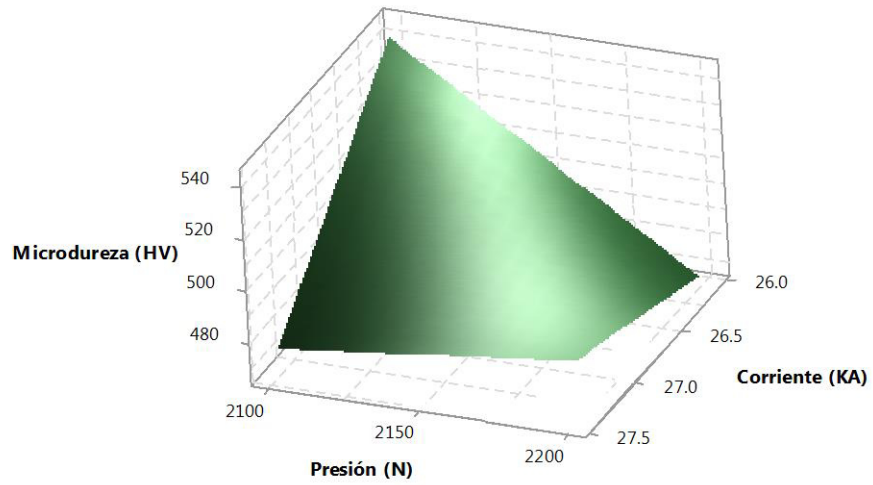
### Gráfica de efectos principales para Microdureza (HV) Medias ajustadas



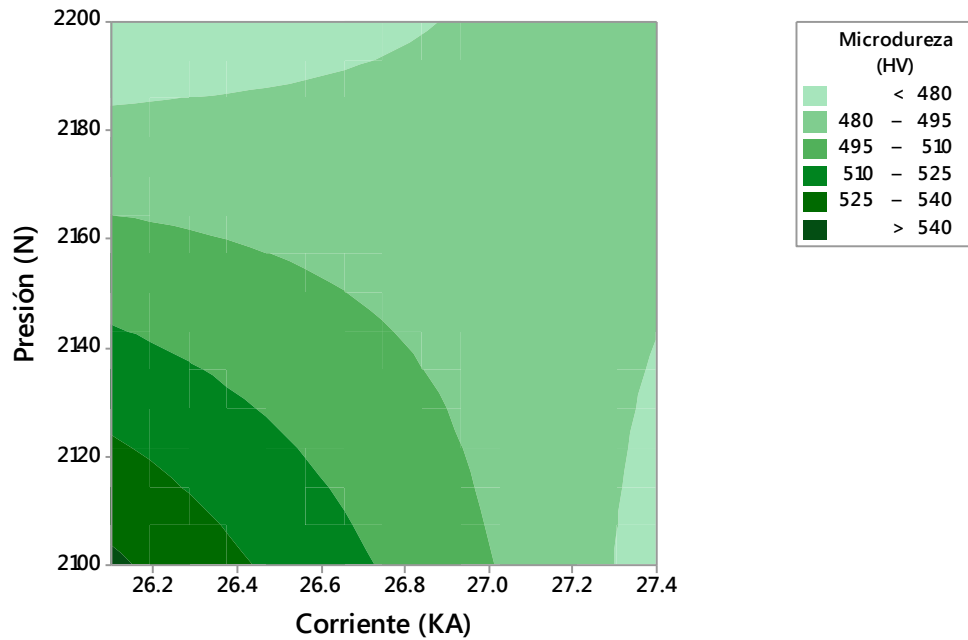
### Gráfica de interacción para Microdureza (HV) Medias ajustadas



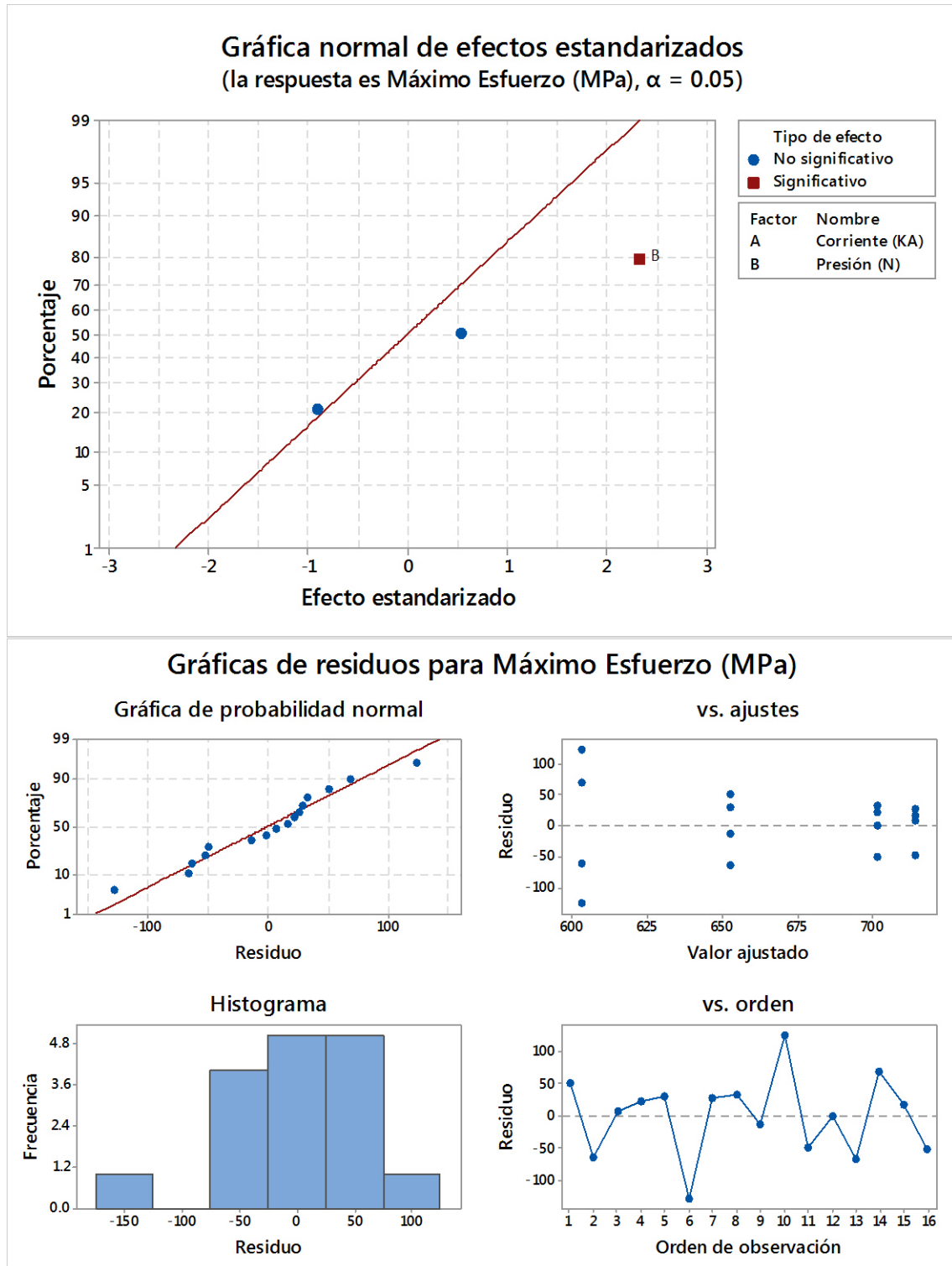
Gráfica de superficie de Microdureza (HV) vs. Presión (N), Corriente (KA)



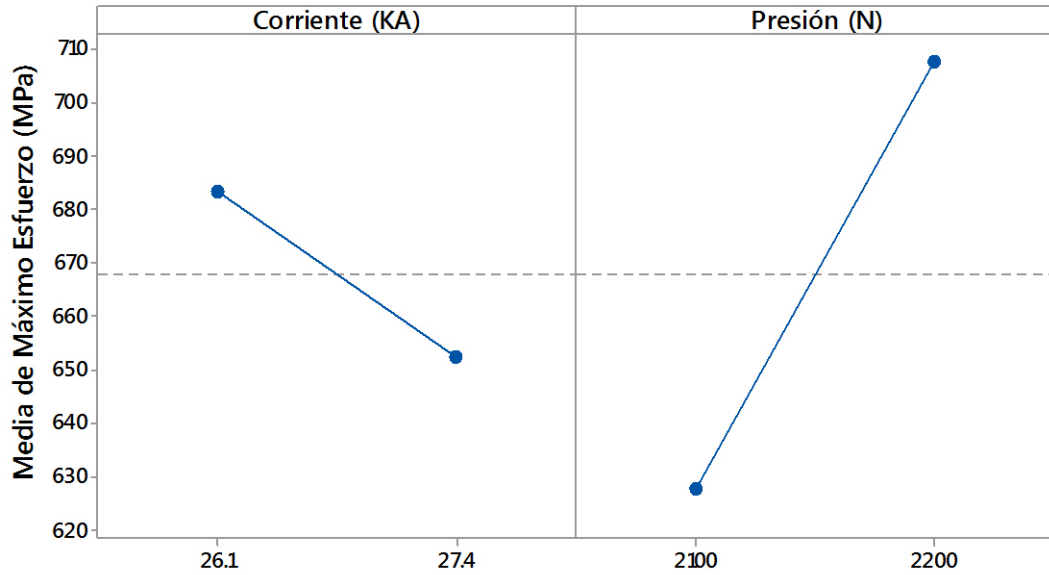
Gráfica de contorno de Microdureza vs. Presión (N), Corriente (KA)



D1.5. Modelo estadístico Esfuerzo máximo 22MnB5-22MnB5.

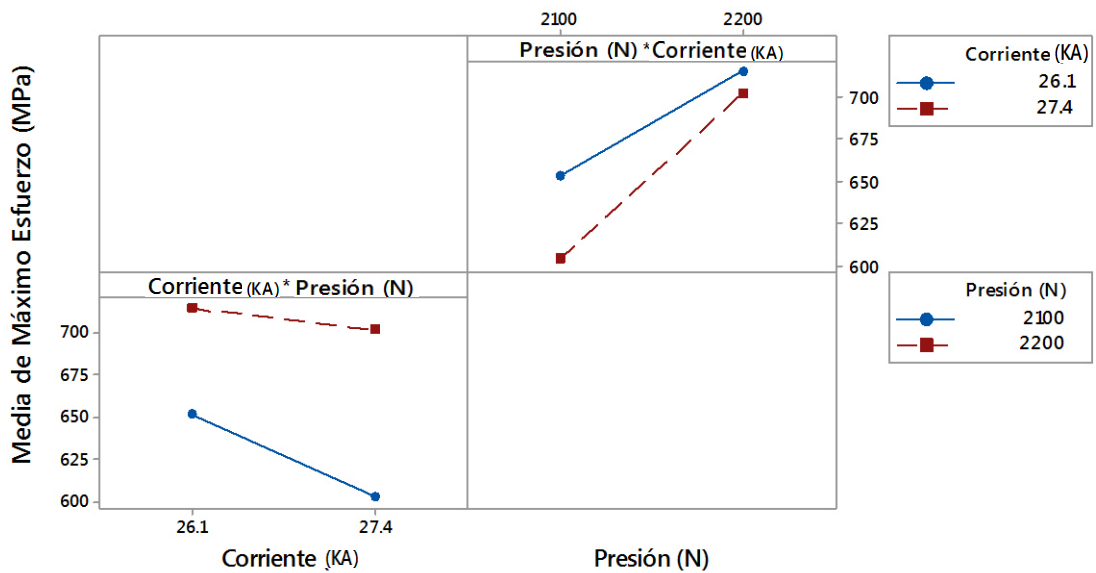


Gráfica de efectos principales para Máximo Esfuerzo (MPa)  
Medias ajustadas



Todos los términos que se muestran están en el modelo.

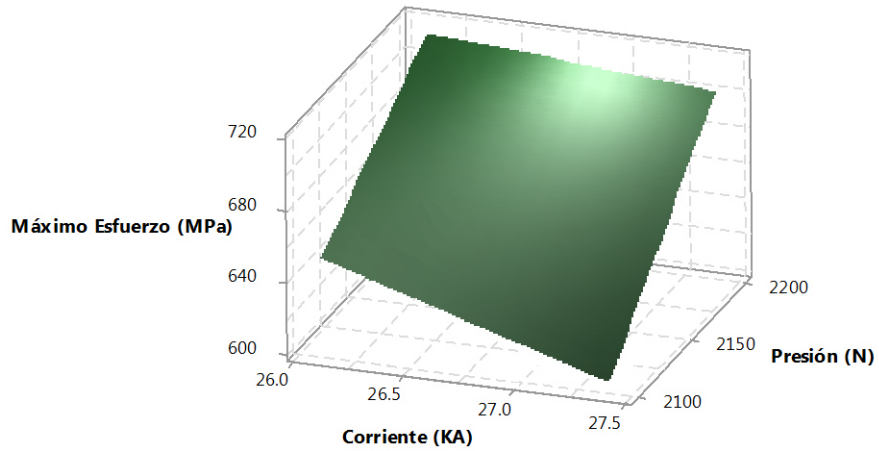
Gráfica de interacción para Máximo Esfuerzo (MPa)  
Medias ajustadas



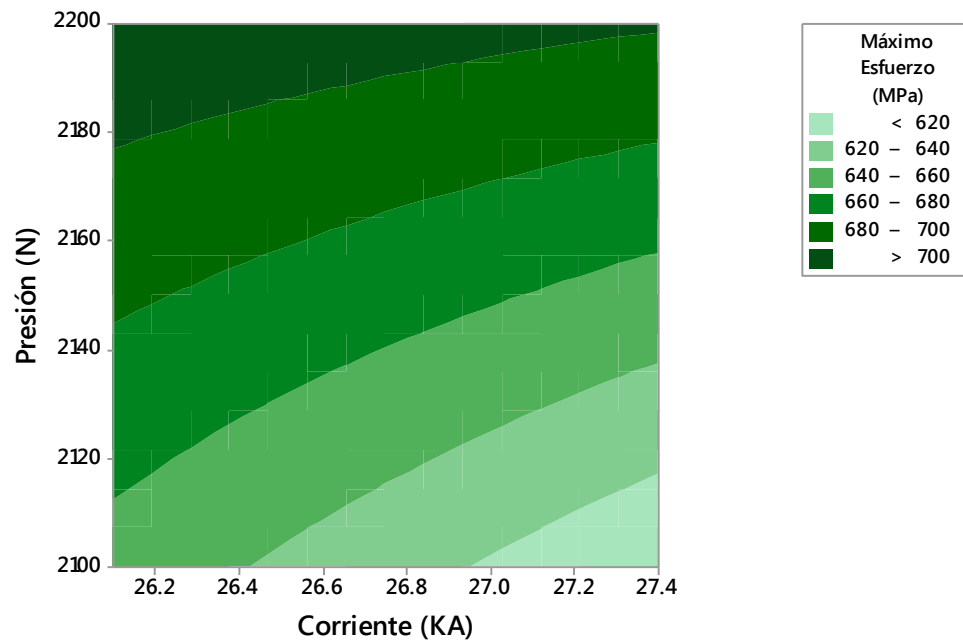
Todos los términos que se muestran están en el modelo.



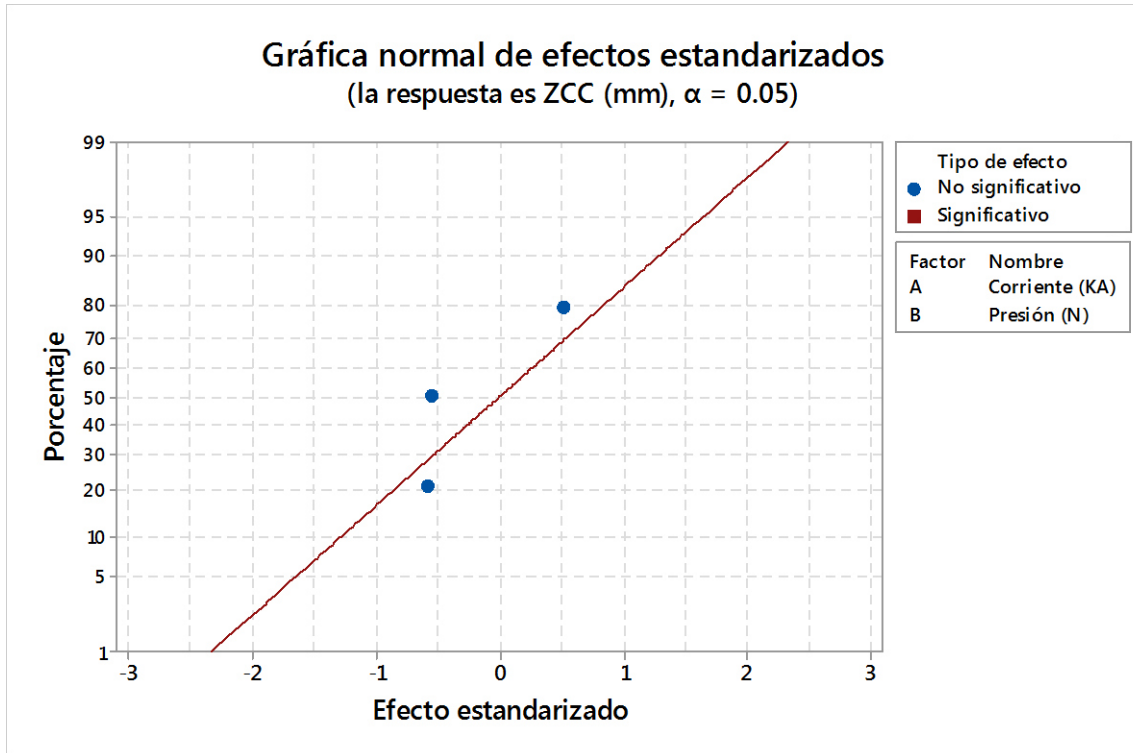
Gráfica de superficie de Máximo Esfuerzo (MPa) vs. Presión (N), Corriente (KA)



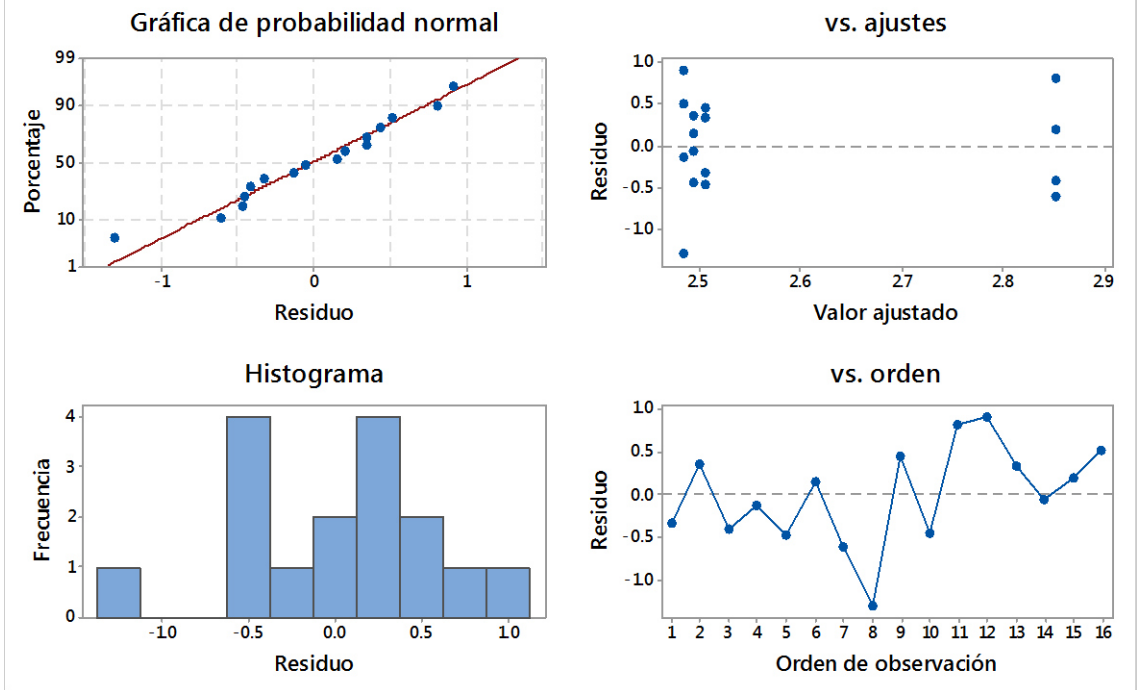
Gráfica de contorno de Máximo Esfue vs. Presión (N), Corriente (KA)



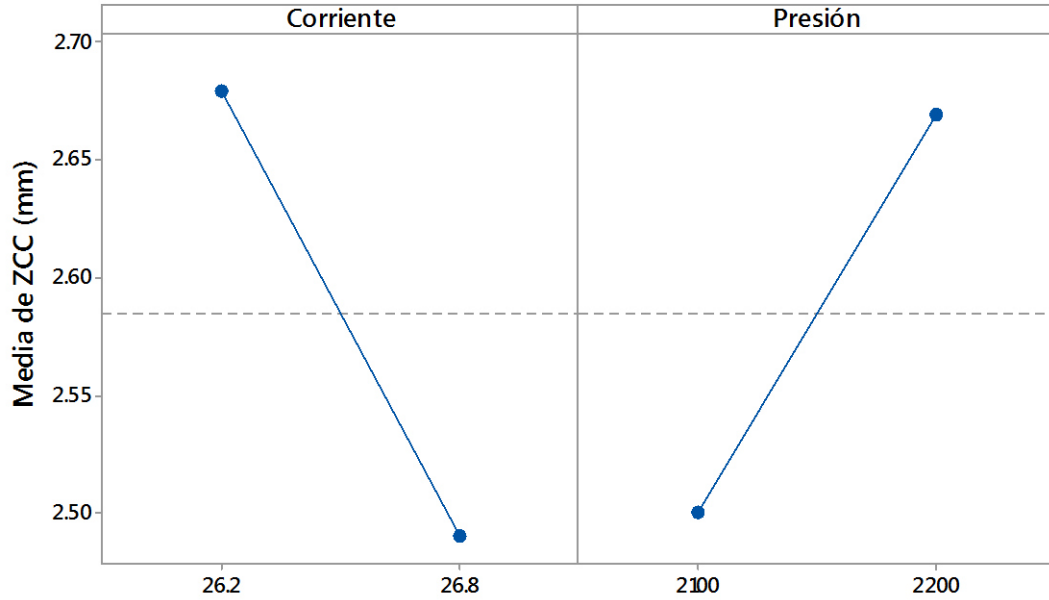
D2.1 Modelo estadístico para el diámetro de la zona de fusión 22MnB5-1006.



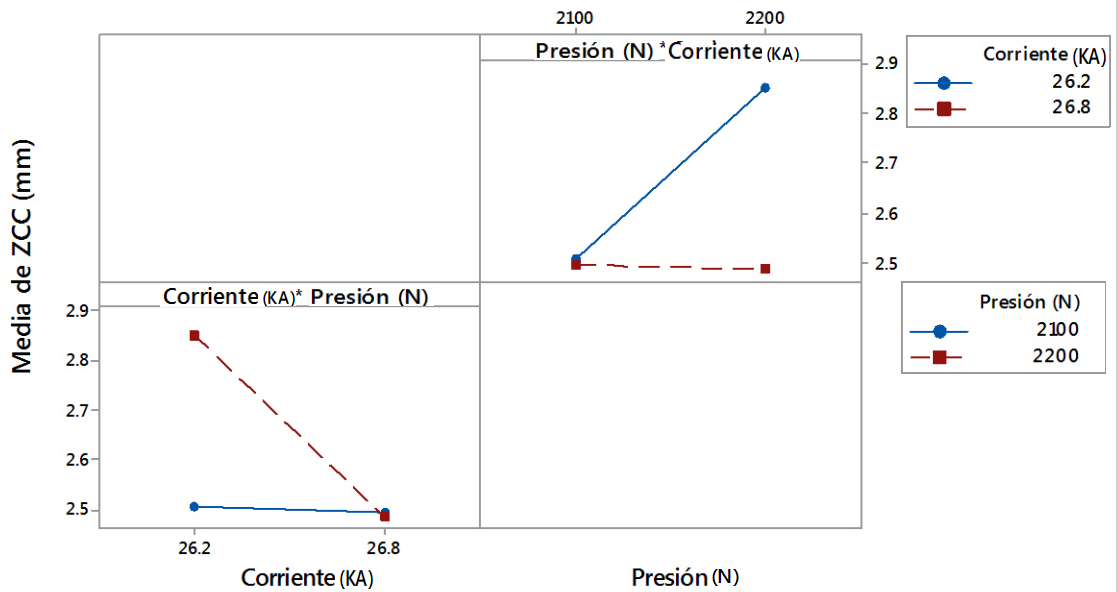
## Gráficas de residuos para ZCC (mm)



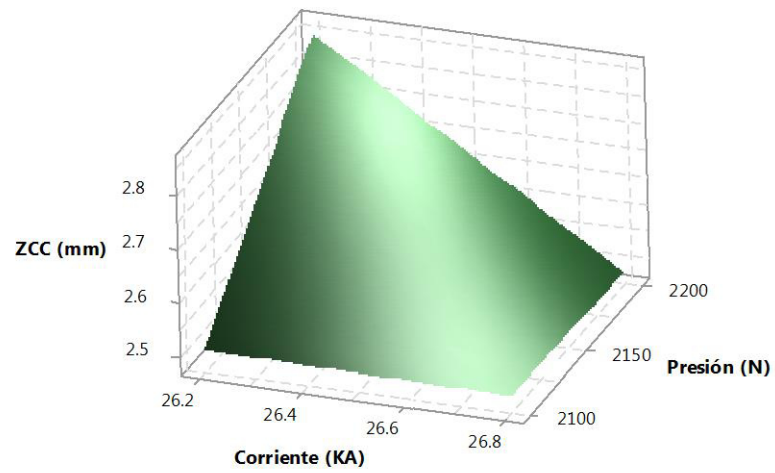
Gráfica de efectos principales para ZCC (mm)  
Medias ajustadas



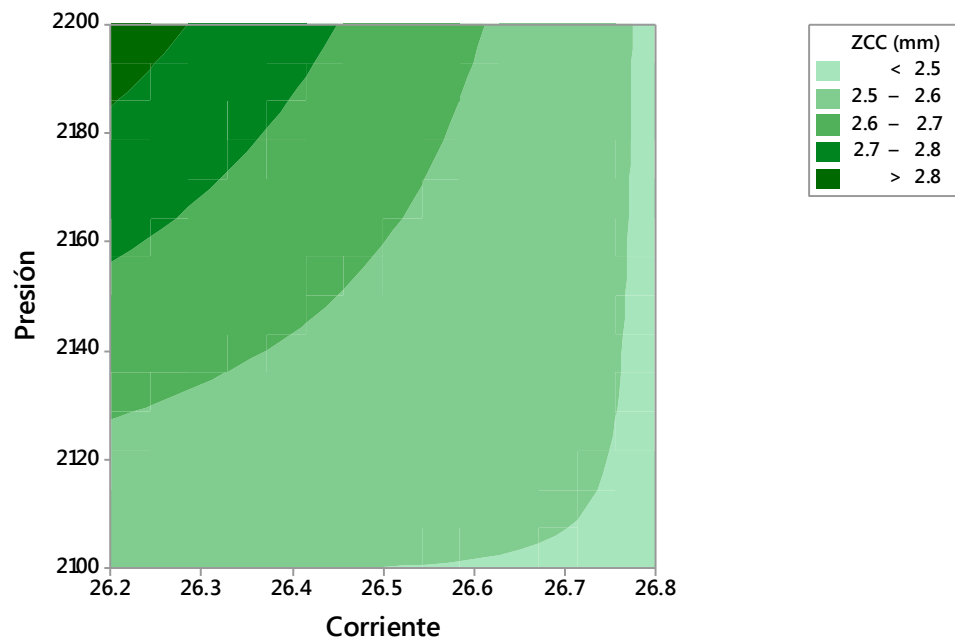
Gráfica de interacción para ZCC (mm)  
Medias ajustadas



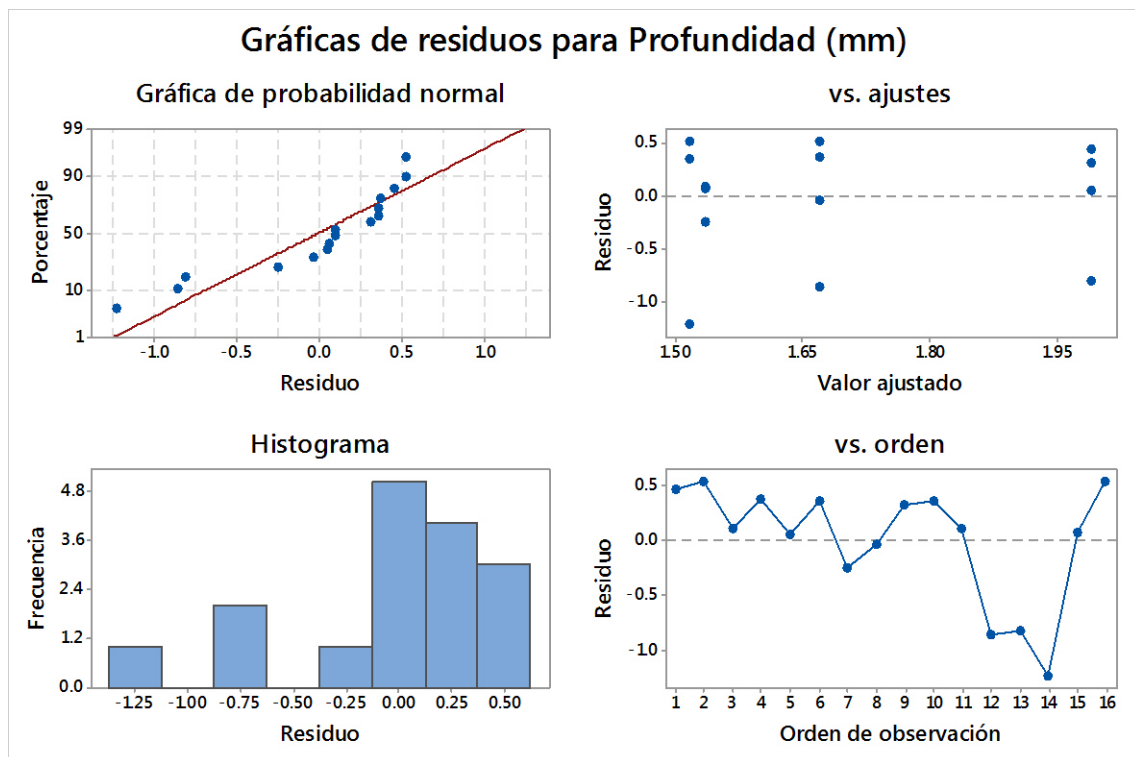
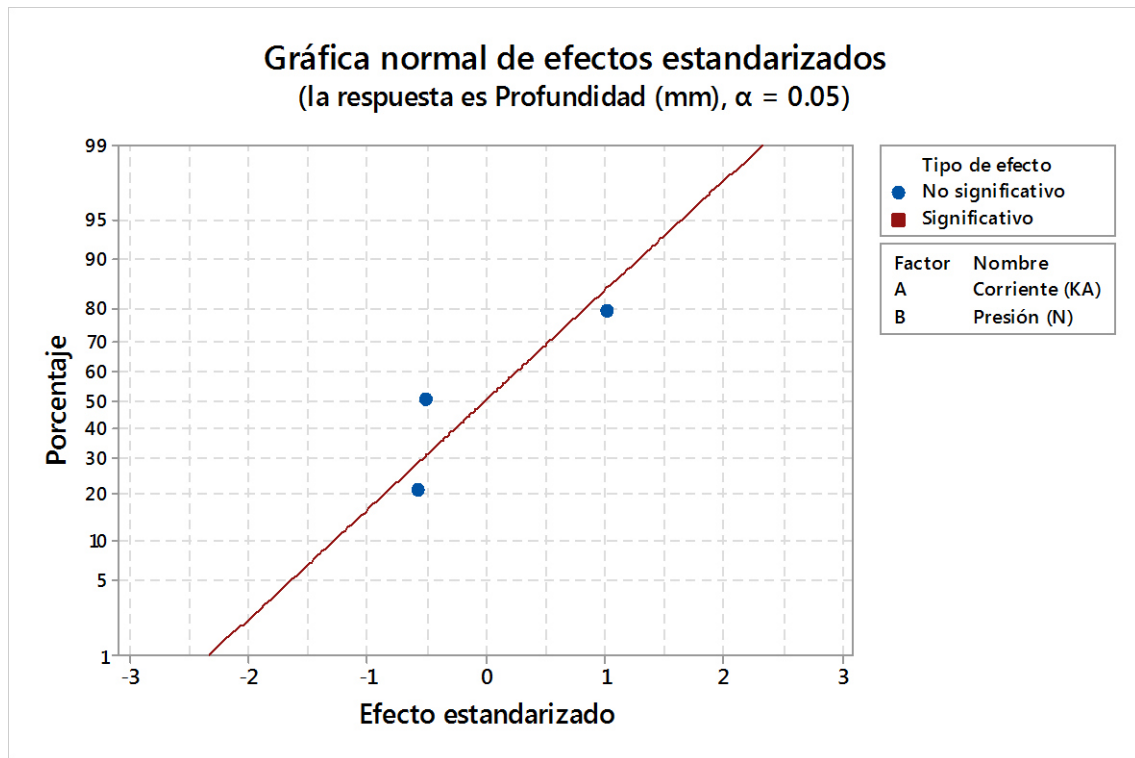
Gráfica de superficie de ZCC (mm) vs. Presión(N), Corriente(KA)



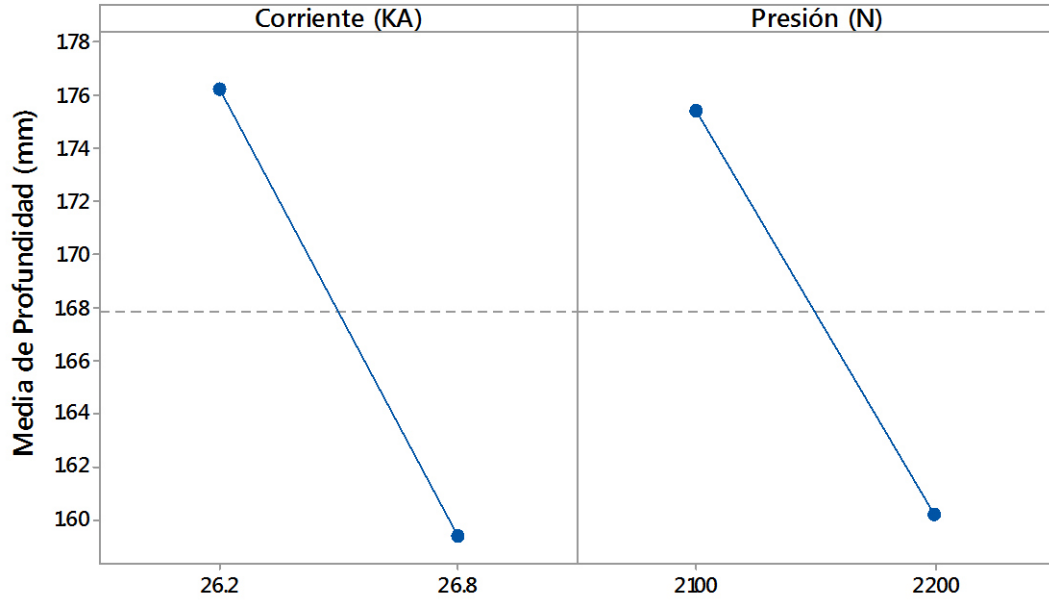
Gráfica de contorno de ZCC (mm) vs. Presión, Corriente



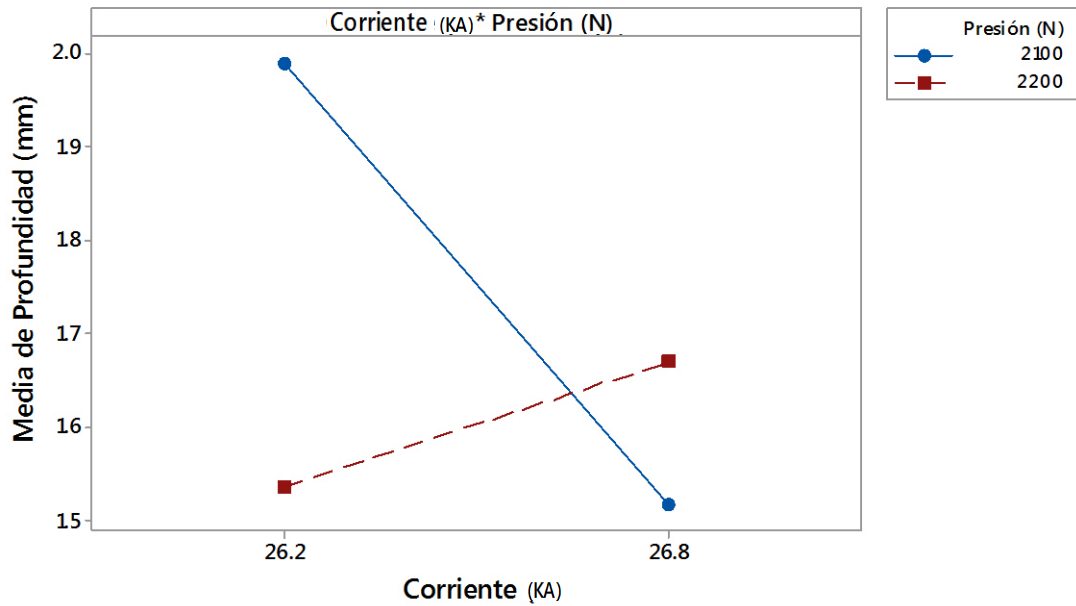
D2.2. Modelo estadístico para la profundidad de la zona de fusión 22MnB5-1006.



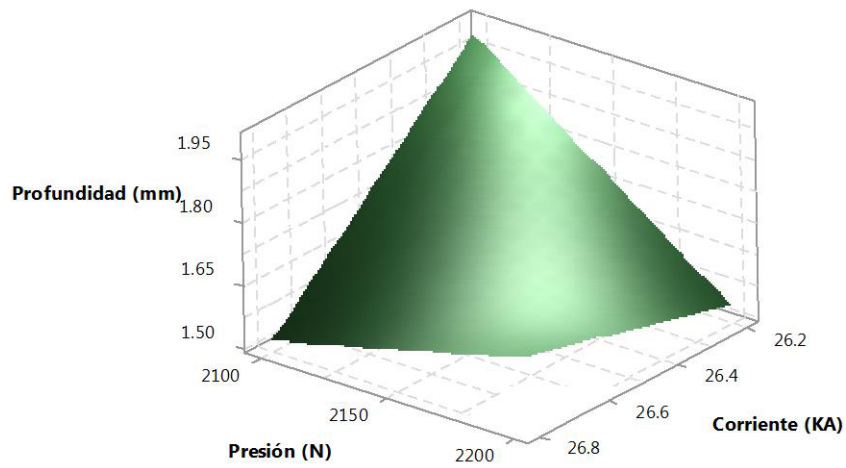
Gráfica de efectos principales para Profundidad (mm)  
Medias ajustadas



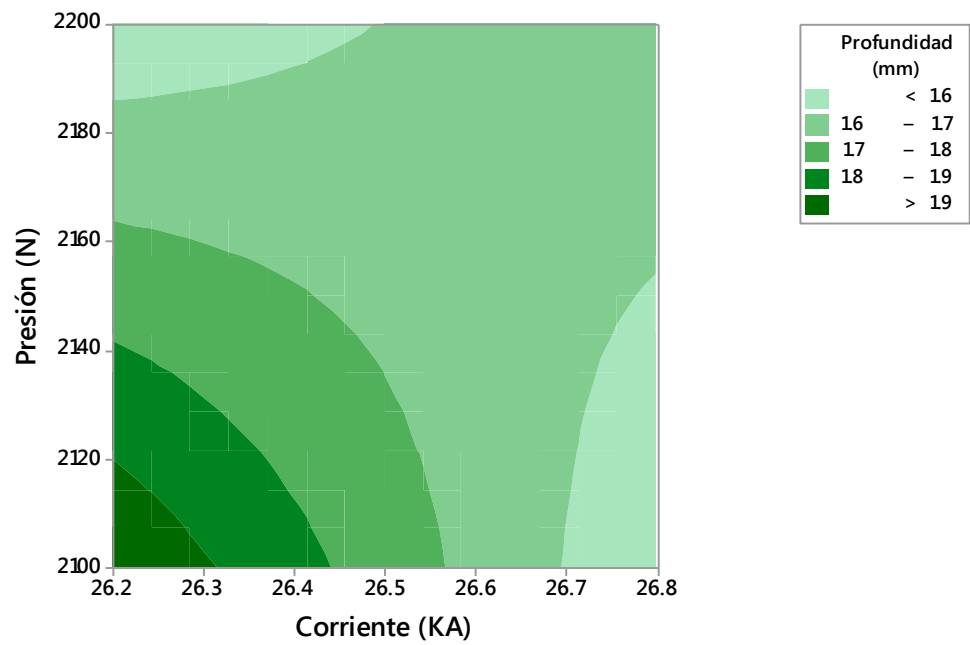
Gráfica de interacción para Profundidad (mm)  
Medias ajustadas



Gráfica de superficie de Profundidad (mm) vs. Presión (N), Corriente (KA)

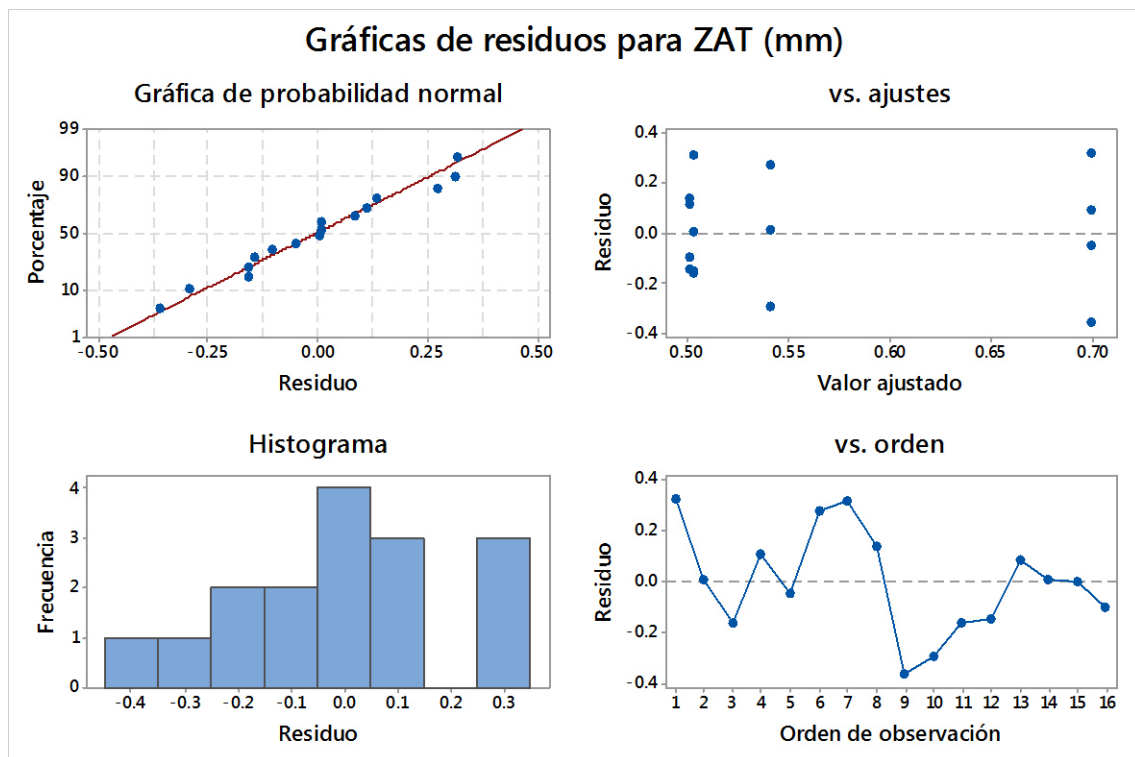
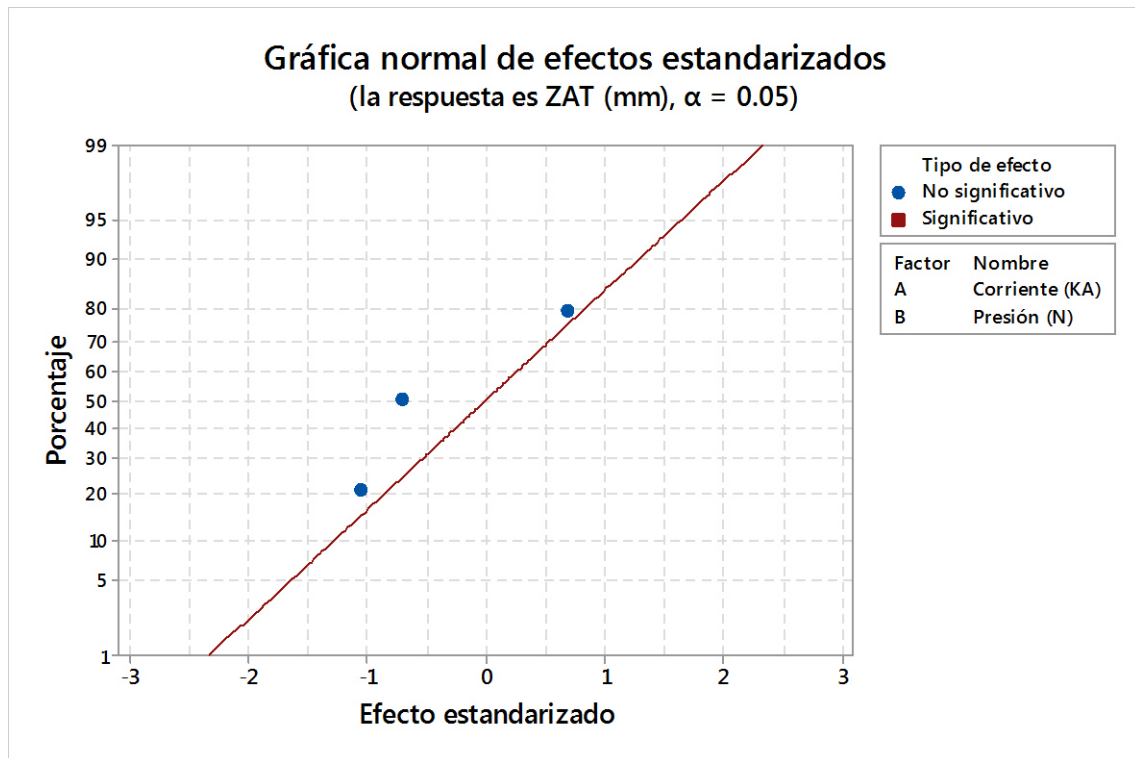


Gráfica de contorno de Profundidad vs. Presión (N), Corriente (KA)

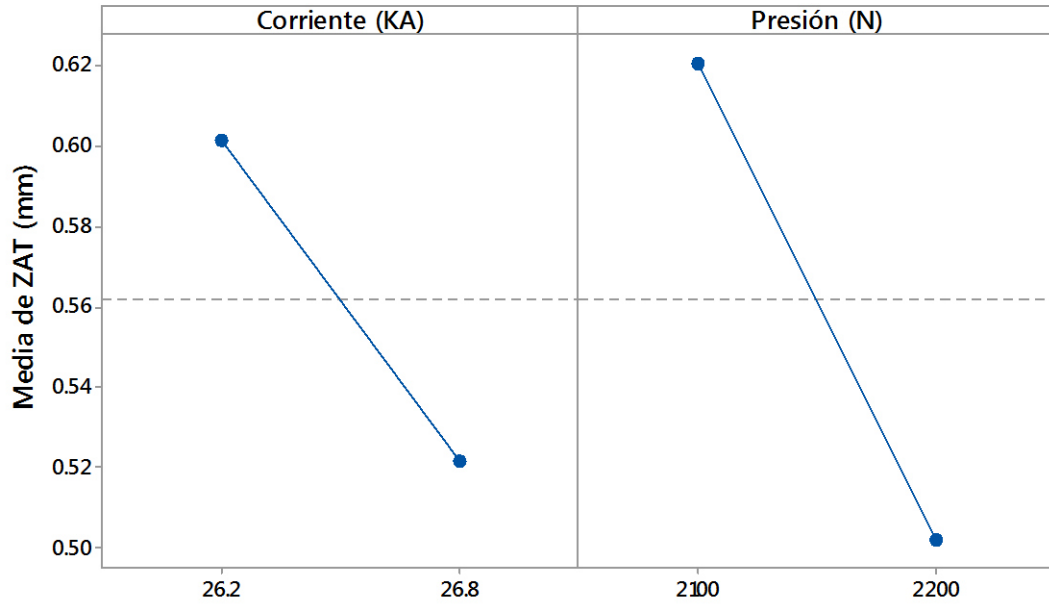




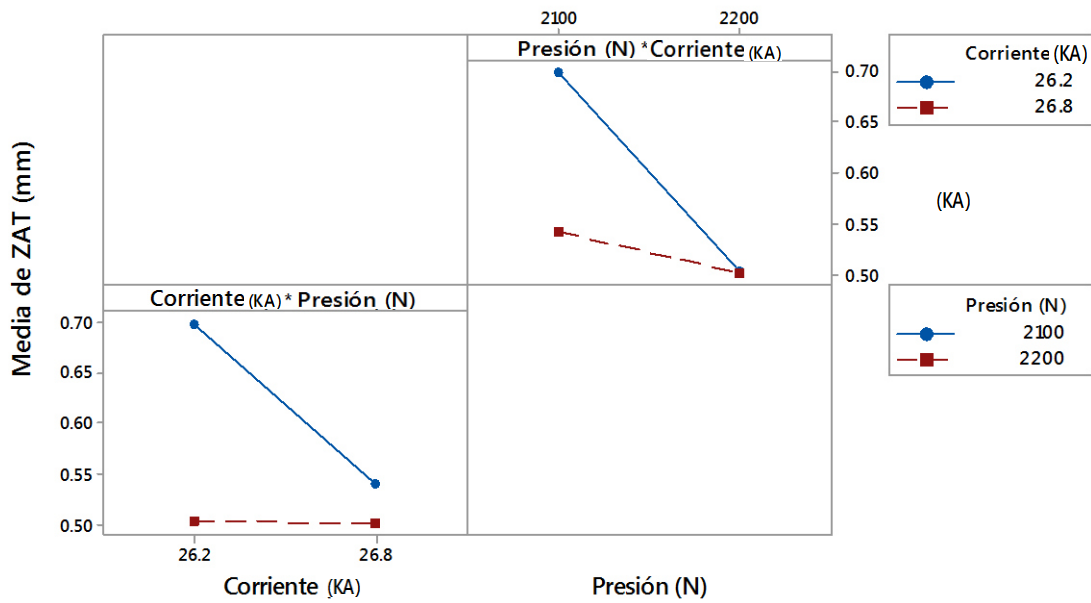
D2.3. Modelo estadístico para la zona afectada térmicamente 22MnB5-1006.



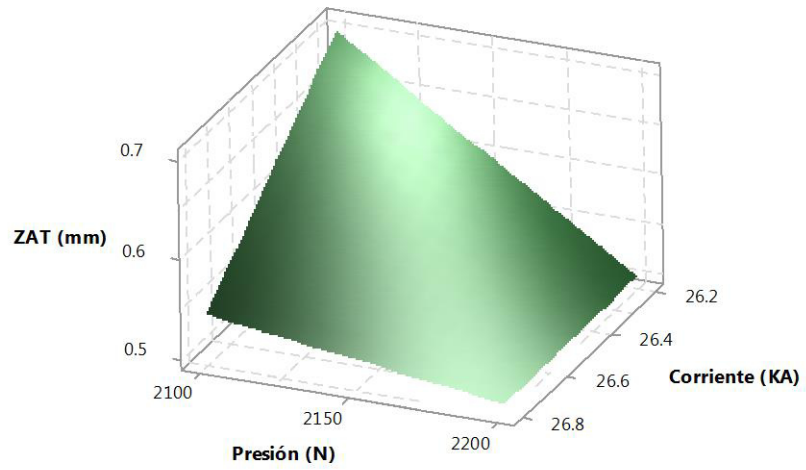
Gráfica de efectos principales para ZAT (mm)  
Medias ajustadas



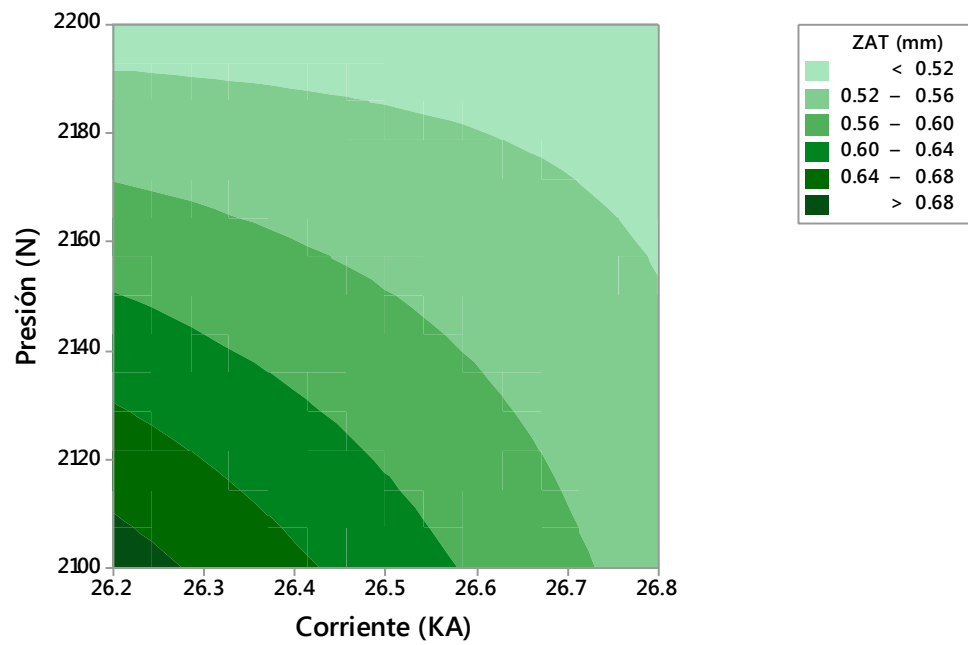
Gráfica de interacción para ZAT (mm)  
Medias ajustadas



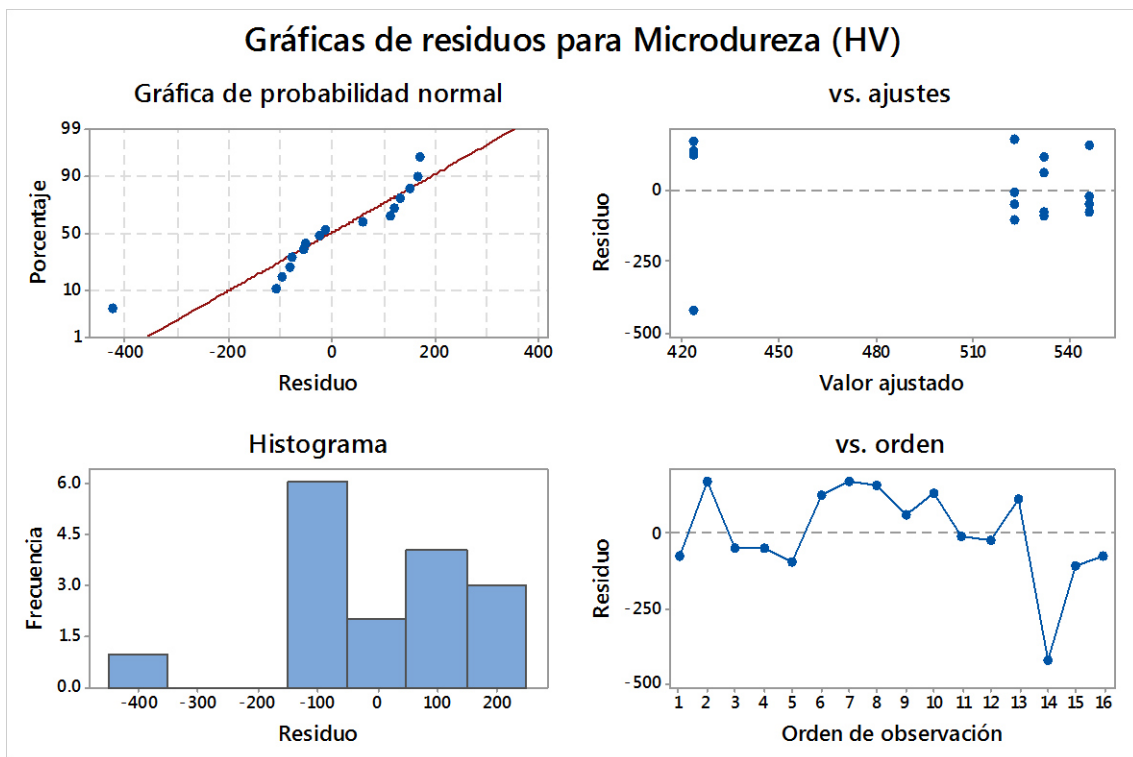
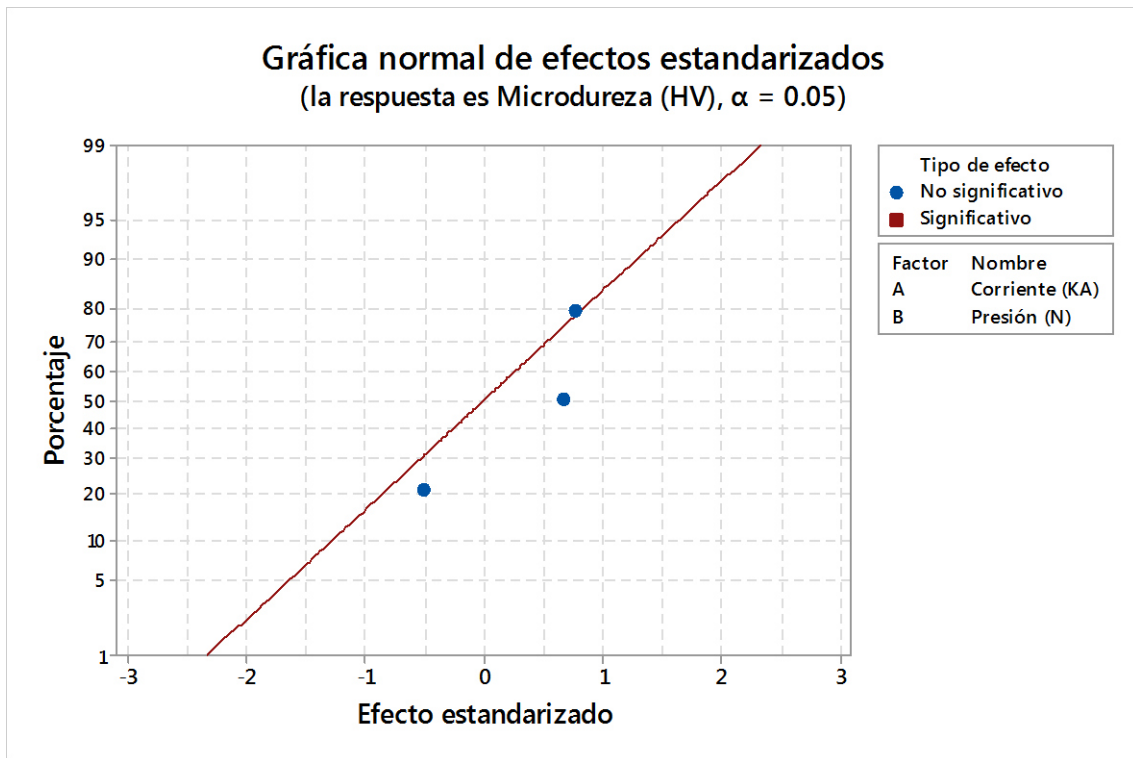
Gráfica de superficie de ZAT (mm) vs. Presión (N), Corriente (KA)



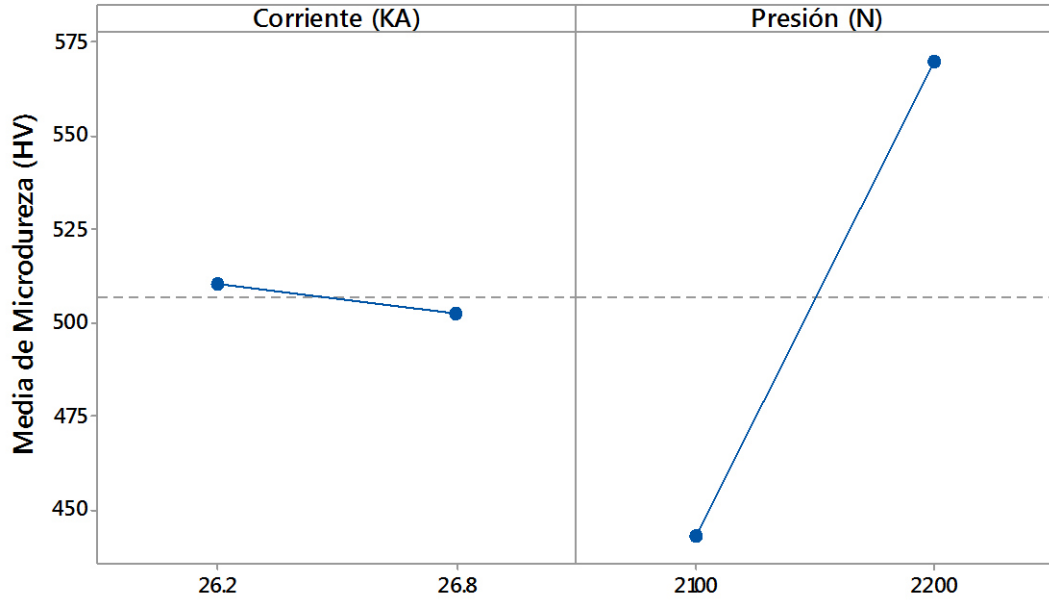
Gráfica de contorno de ZAT (mm) vs. Presión (N), Corriente (KA)



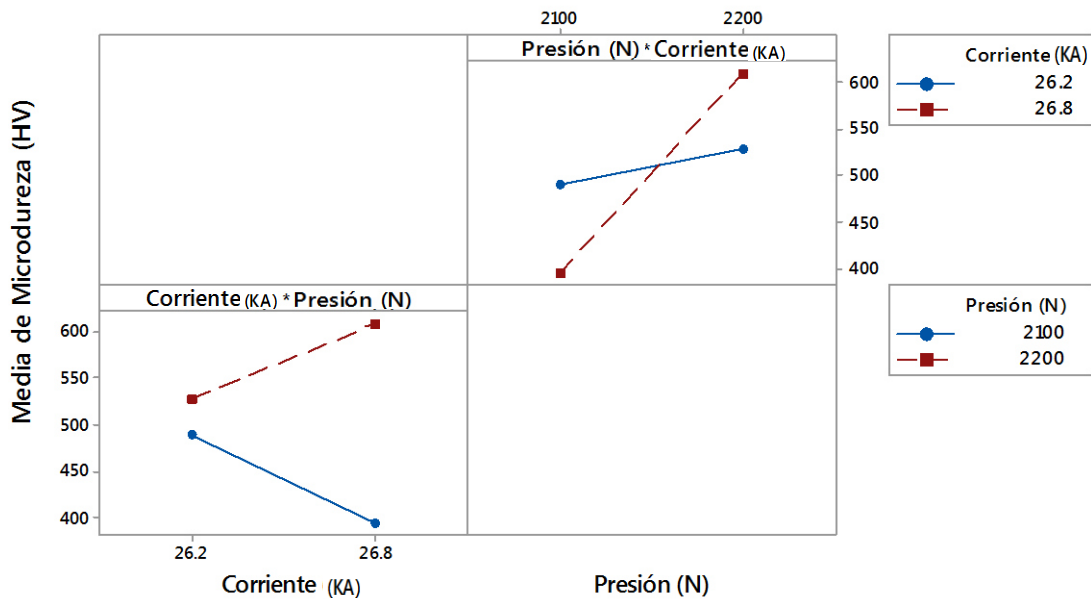
D2.4. Modelo estadístico microdureza 22MnB5-1006.



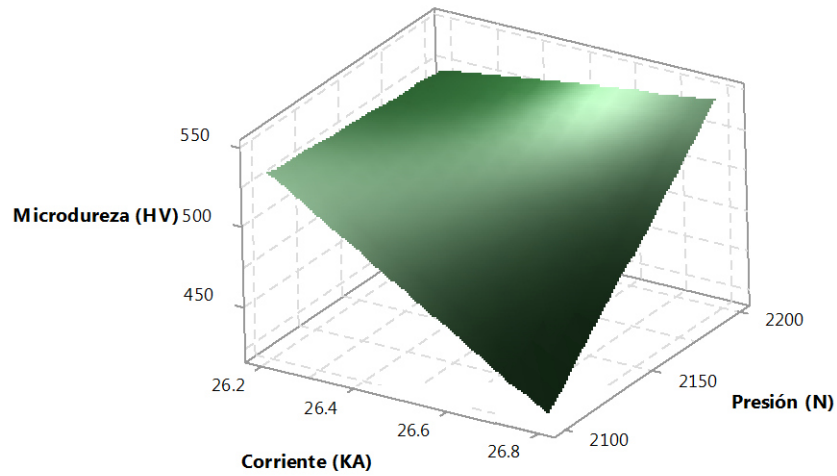
Gráfica de efectos principales para Microdureza (HV)  
Medias ajustadas



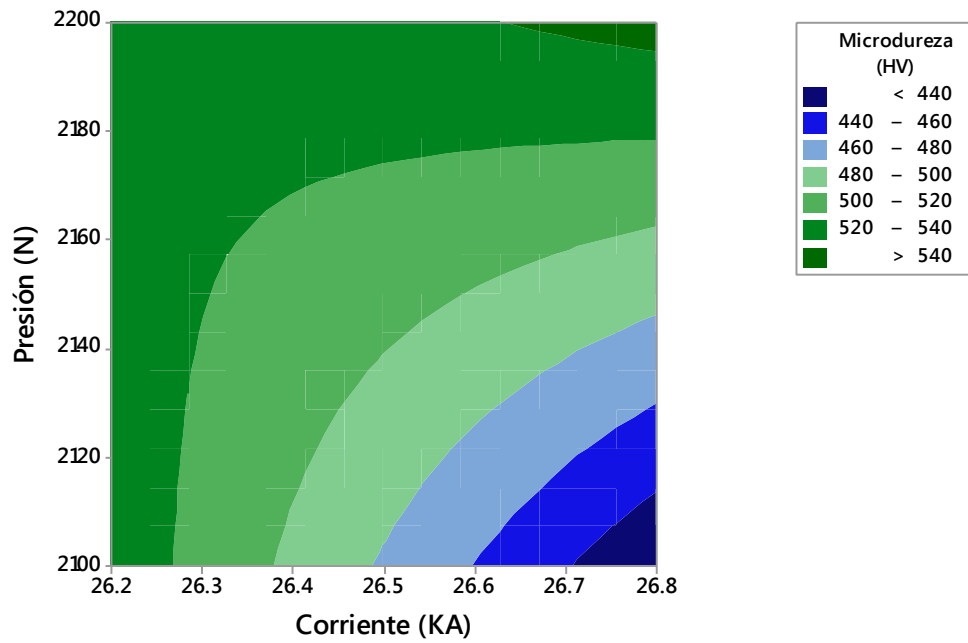
Gráfica de interacción para Microdureza (HV)  
Medias ajustadas



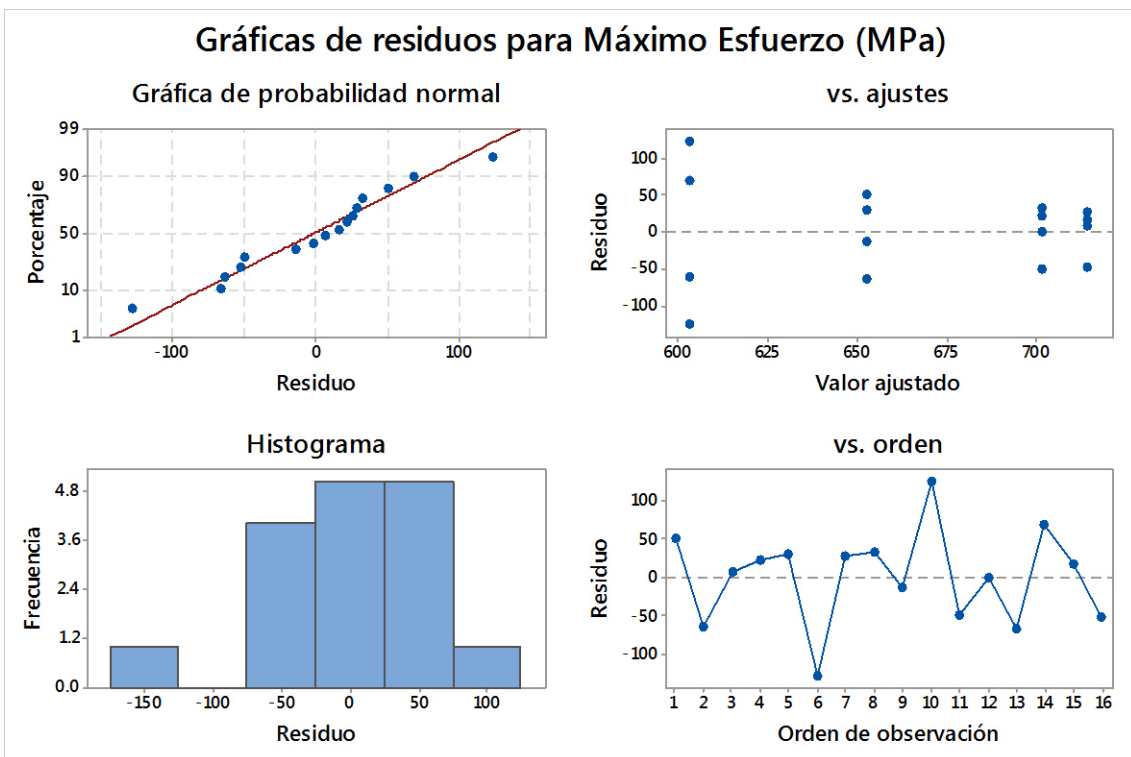
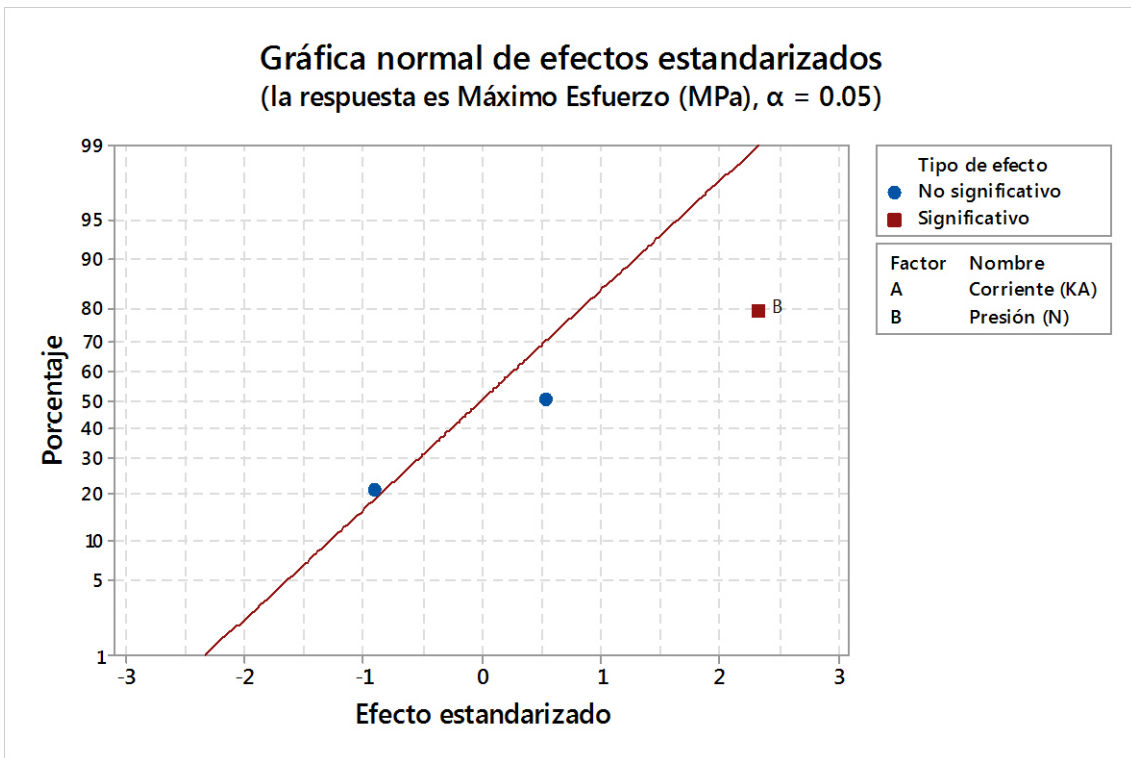
Gráfica de superficie de Microdureza (HV) vs. Presión (N), Corriente (KA)



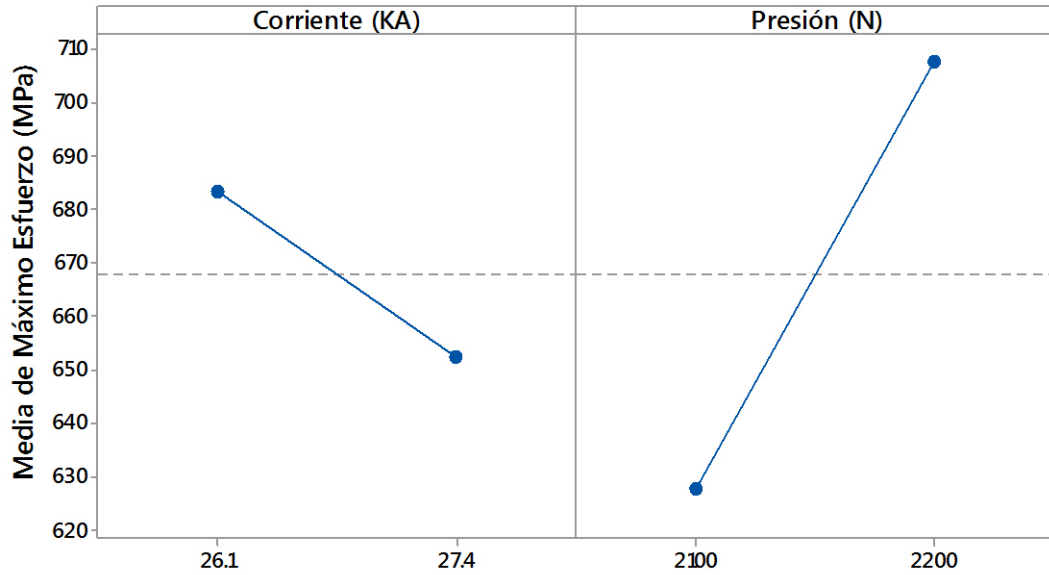
Gráfica de contorno de Microdureza vs. Presión (N), Corriente (KA)



D2.5. Modelo estadístico esfuerzo máximo.

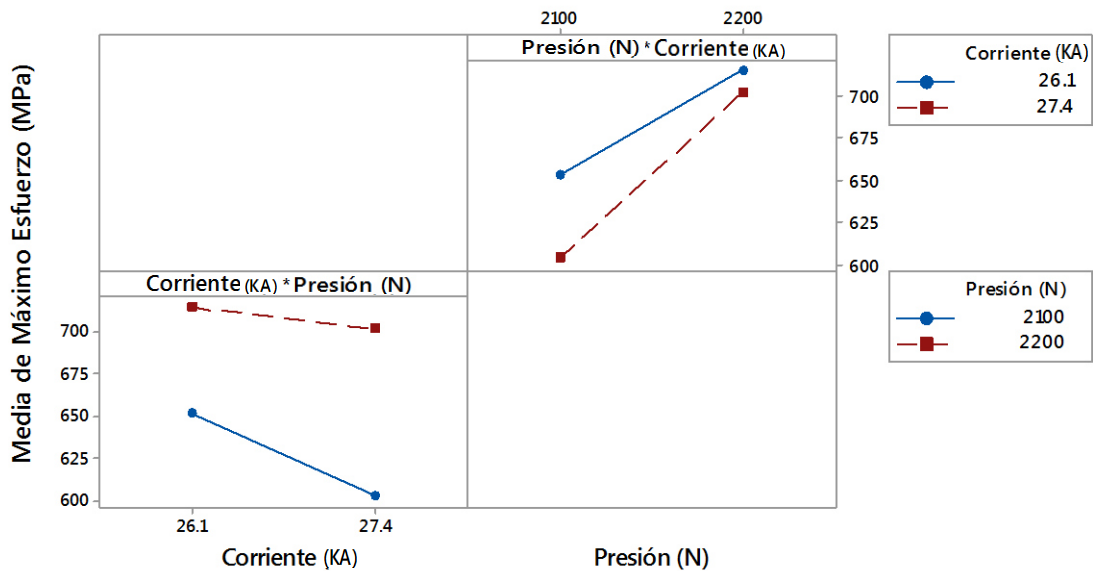


Gráfica de efectos principales para Máximo Esfuerzo (MPa)  
Medias ajustadas



Todos los términos que se muestran están en el modelo.

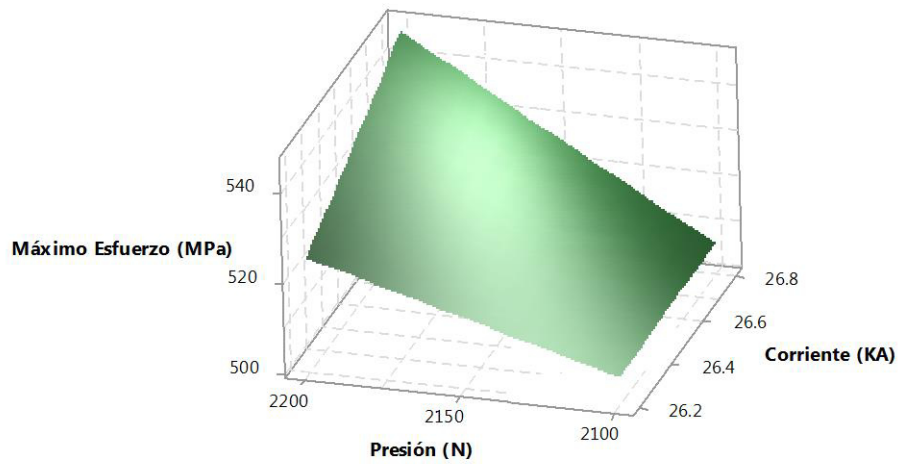
Gráfica de interacción para Máximo Esfuerzo (MPa)  
Medias ajustadas



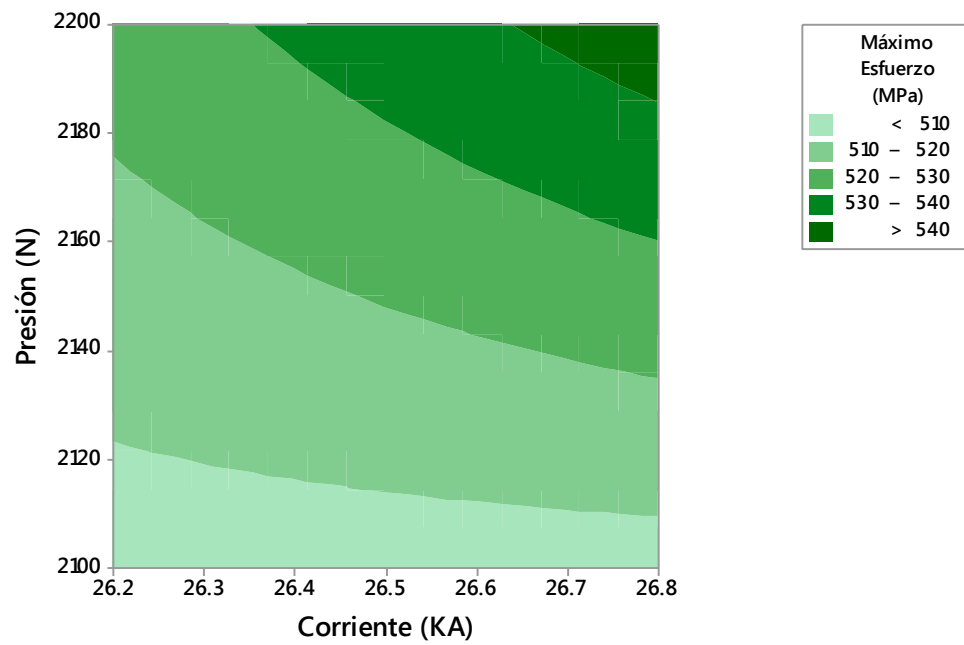
Todos los términos que se muestran están en el modelo.



Gráfica de superficie de Máximo Esfuerzo (MPa) vs. Presión (N), Corriente (KA)



Gráfica de contorno de Máximo Esfue vs. Presión (N), Corriente (KA)





## Apéndice E.

Para la elaboración del modelo estadístico se ilustrará los pasos que se debería seguir en el software de minitab. Se debe considerar que para este modelo se utilizara solo dos parámetros elevado a dos niveles, denominados como parámetro 1 y2 y nivel bajo y alto respectivamente. A continuación, se describe de una manera esquemática el procedimiento a seguir

1. Escoger los parámetros de soldadura más críticos, esto dependerá de investigaciones pasadas o de nuevas áreas que se desee explorar.
2. Escoger las respuestas que se desee analizar, ya sea esfuerzo máximo, microdureza, tamaño de la zona de fusión, por mencionar algunas.
3. Una vez determinado estos datos se introducen al software de minitab, primero se configuró el tipo de Diseño factorial en la Figura E1.1

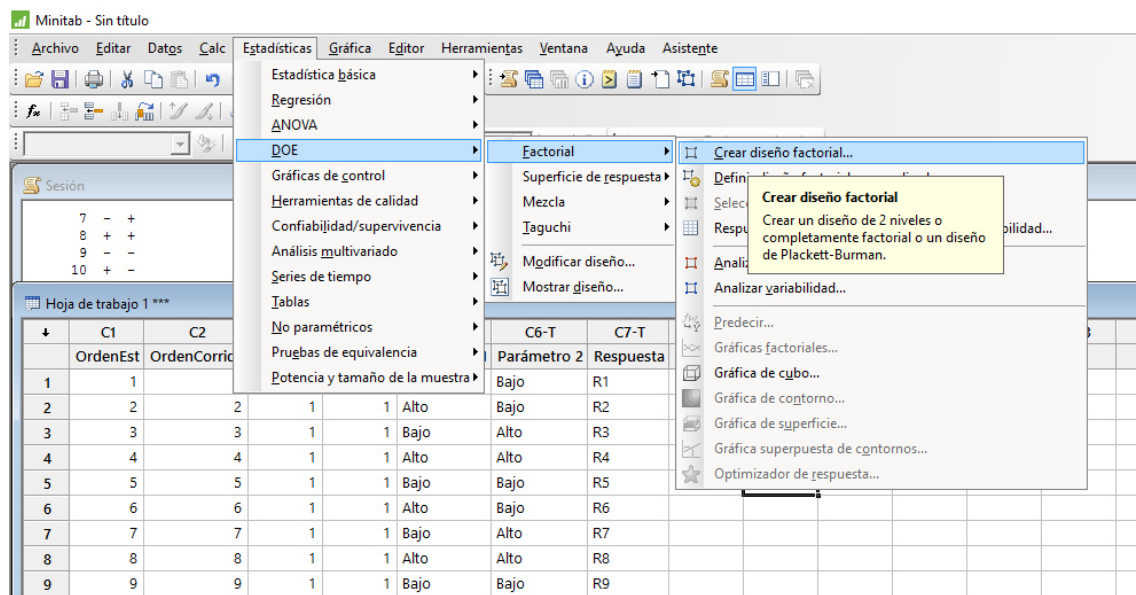


Figura E1. 1.

4. Se escoge el número de factores, así como el número de réplicas, Figura E1:2.

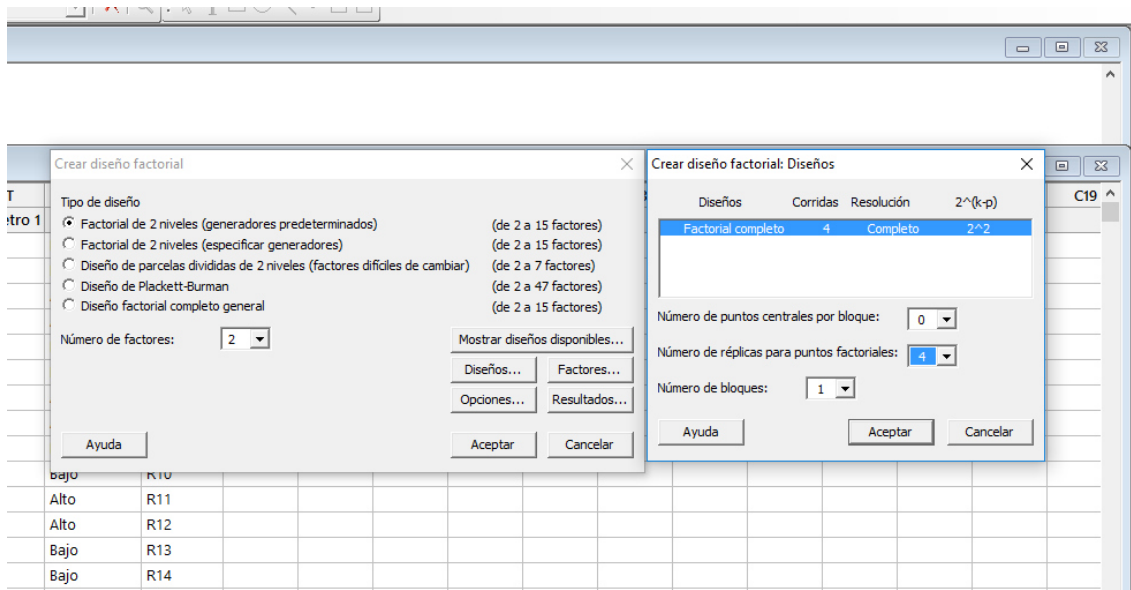


Figura E1. 2

5. Se configuró los parámetros escogidos, así como los niveles que estos tendrán, Figura E1.3.

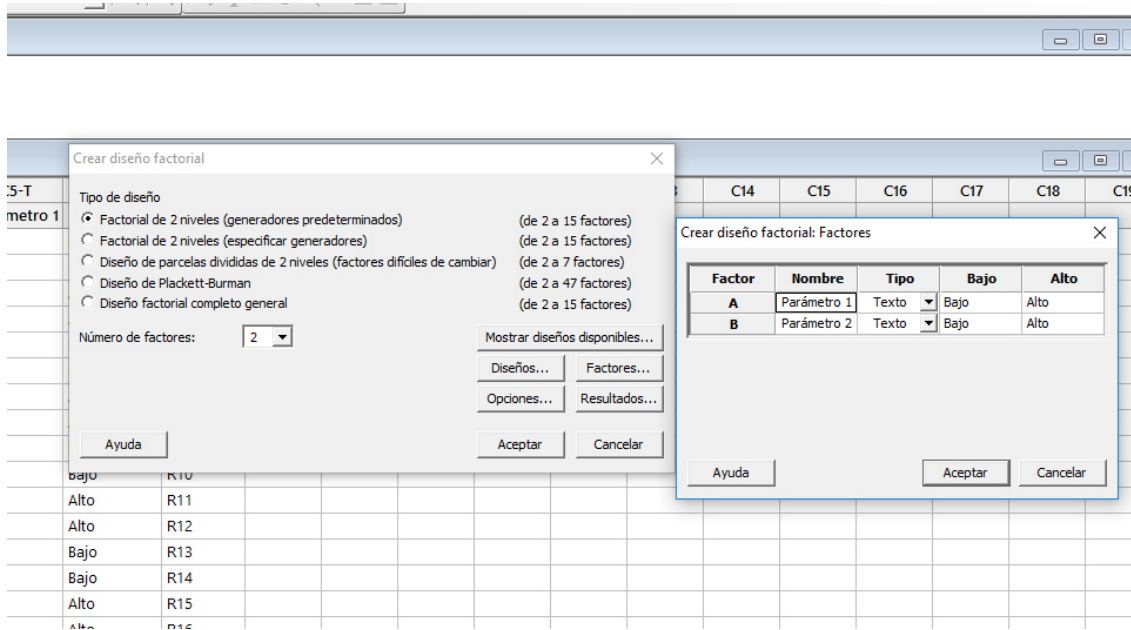


Figura E1. 3

6. Se introdujo las respuestas que se obtuvieron por experimentación para cada condición., Figura E1.4.

	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6-T	C7	C8	C9	C10
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Parámetro 1	Parámetro 2	Respuesta			
1	1	1	1	1	Bajo	Bajo	1			
2	2	2	1	1	Alto	Bajo	2			
3	3	3	1	1	Bajo	Alto	3			
4	4	4	1	1	Alto	Alto	4			
5										

Figura E1. 4.

7. Se analizó el diseño factorial siguiendo el procedimiento como se muestra en la Figura E1.5. una vez realizado esto se obtendrá la tabla ANOVA como las del Capítulo 6 y las gráficas del Apéndice D.

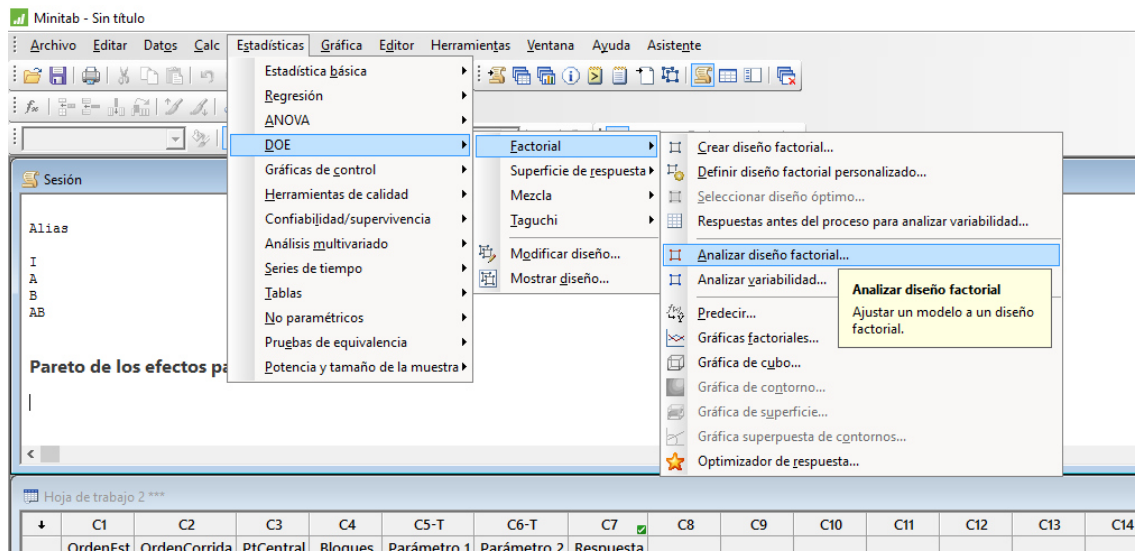


Figura E1. 5.

## Referencias.

1. Steel Market Development Institute “AHSS 101 the evolving use of advanced High strength steels for automotive applications”, 2011, pp 8-10.
2. World Auto Steel, “Advanced high strength steel (AHSS) application guidelines”, Version 4.0, Marzo 2009, PP3-15.
3. Arcelor Mittal, “Aceros bake hardening”, edición para Europa, Enero 2012, pp 4-10.
4. R. Huziak, R. Kawalla, S. Waengler, “Advanced high strength steels for automotive industry”, Archives of civil and mechanical engineering, 2008.
5. Luis Alberto Moya Salazar, “Soldabilidad de aceros IF Termogalvanizados para aplicaciones automotrices”, Tesis M.C de la ingeniería mecánica con especialidad de materiales, Autónoma de Nuevo León, Enero 2005, pp 4.
6. James N.A. Starling, “The evolution of solute carbon during continuous annealing of interstitial-free steel and its effects on bake hardenability”, Queen’s University, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Marzo 1998 pp 1-2.
7. M.Charleux, W.J. Poole, M. Militzer, and A. Deschamps “Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel”, Metallurgical and materials transactions A, Volume 32A, Julio 2001, pp 1.
8. J.M. Gray, T. Ko. Zhang Shouhua, Wu Baorong, Xie Xishan “HSLA steels metallurgy and applications”, conference proceedings ASM international, 4-8 Noviembre 1985, pp 2944.
9. Internet, “[www.asimet.cl/galvanizado.htm](http://www.asimet.cl/galvanizado.htm)”, página de galvanizado en caliente y en frío; Revista metal industrial, Octubre 2002; pp 1-21.
10. Sekine, H. and Maruyama, T., “3rd Proceeding, International conference on the strength of metals and alloys”, London, Iron and Steel Institute, 1973, pp 85-94.
11. A.R. Marder, “The metallurgy of zinc – coated steel”, Progress in Materials Science 45 (2000) pp 193 -271.
12. Jackson C.B., “Coil Joining in Galvanizing lines”, 89th Galvanizers Association Conference Proceedings; 1997, San Francisco, EUA, pp 1 – 17

13. Warnecke W., Bode R., Kothe R. y Meyer L., "Modern hot dip coated sheet steel—processing, coating characteristics and fabricating properties", Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy And Performance; The Minerals, Metals & Materials Society, Octubre 1990, Detroit, EUA, pp 3-17.
14. Sendzimer T. 1938. U.S. Patent No 2, 110.893.
15. Marder A.R., "The metallurgy of Zinc Coated", Progress in Materials Science, Año 45, Vol. 3, Junio 2000, EUA, pp 191 – 271.
16. Olefjord I., Leijon W., Jelvestam U., "Selective surface oxidation during annealing of steel sheets in H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>" Applied Surface Science 1980; 6:41
17. Bordigno L., Angeli G., Bolt H., Hekkens R., Mashek W., y Paavilainen J., "Enhanced hot dip galvanizing by controlled oxidation in the annealing furnace", 44th Mechanical 27 Working And Steel Processing Conference Proceedings, Vol. XL; Editorial ISS Internacional; Septiembre 2002, Orlando, EUA, pp 833 – 844.
18. Bordignon L., Angeli G., "Enhanced hot dip galvanizing by controlling oxidation in the annealing furnace", Galvanizers Association Conference Proceedings, Septiembre 2001; Portland, EUA; pp1-19.
19. Marder A.R., "The metallurgy of Zinc coated progress", Material Science Año 45, Vol 3; junio 2002; pp 191 – 271.
20. Jordan CE., Marder AR. "Fe–Zn phase formation in interstitial – free steels hot – dip galvanized at 450 °C, part 1 0.00 % Al – Zn baths", Journal Materials Science 1997; 32: 5593.
21. Allegra L., Hart RG., Townsend HE., "Intergranular zinc embrittlement and its inhibitions by phosphorous in 55 pct Al – Zn coated sheet" Metallurgical and Materials Transactions 1983; 14A: 401.
22. Guttman M., Lepretre Y, Aubry A, Roche M-J., Moreau T., Drillet P., Maitigne JM., Baudin H. "Mechanism of the galvanizing reaction. Influence of Ti and P contents in steel and of its surface microstructure after annealing", Galvatech' 95. Chicago, IL: Iron and Steel Society, 1995. P 295.
23. RWMA Handbook Committee: Resistance Welding Manual; 4ª edición; Marzo 2003, Philadelphia, EUA.
24. Alireza Khosravi "Weldability of electrogalvanized versus galvanized interstitial free steel sheets by resistance seam welding", Materials & Design, 44, febrero 2013, pag. 90-98.

25. ASM international, Handbook, "Welding brazing and soldering", volume 6, 2da edición, 1993, USA.
26. Asociación Española de soldadura y tecnologías de unión, "soldeo por resistencia", junio 2007.
27. N. Y. Tang, "Thermodynamics and kinetics of alloy formation in galvanized coatings". Goodwin FE, Editor. Zinc Based Steel Coating Systems: Production and Performance. Warrendale Pa: TMS 1998, PP3.
28. Luis Alberto Moya Salazar "Soldabilidad de aceros IF termogalvanizados para aplicaciones automotrices" Tesis de Maestro en Ciencia de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Enero 2005 pp .74
29. Vicente Capote Luna, "ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN LA SOLDADURA", Revista digital para profesionales de la enseñanza, Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, No. 15, julio 2011.
30. Paola Andrea Ruiz Rojas, "Calidad en la Soldadura: Inspección y Detección con Ensayos No Destructivos", Revista Digital Metal Actual.
31. Hongyan Zhang, Jacek Senkara "Resistance welding fundamentals and applications" Taylor & Fancis Group, Published in 2006, pp 1-16.
32. Nick den Uijil, Sullivan Smith, Tom Moolevliet, Cierick Goos, Ellen van der Aa, Tony van der Veldt "Faliure modes of resistance spot welded advanced high strength steels", The 5th International seminar on advances in resistance welding, 24-25 Septiembre 2008 Toronto, pp 78-104.
33. N. den Uijl, S. Smith, C. Goos, E. van der Aa, T. Moolevliet and T. van der Ve. "Failure modes of resistance spot welded advanced high strength steels". The 5th International Seminar on: Advances in Resistance Welding. Toronto, Canada 2008, pp. 82-90.
34. Resistance Welder Manufacturers' Association, "Resistance welding manual", 4ta Edición, pp. 1-2, 1999, Filadelfia, EUA.
35. S. S. Babu, G. M. Goodwin, R. J. Rohde And B. Sielen, "Effect of Boron on the microstructure of low-carbon steel resistance seam welding", Welding Research Supplement, junio 1998, pag. 249-253.
36. 36. Ito, Y., and Bessyo, K, "Cracking Parameter of high strength steels related to heataffected-zone cracking– Rep. 1", 1968 J. of Japan Welding Society 37(9):683-991.



37. "Specification for metal-arc welding of carbon and carbon manganese steels. BS5135", British Standard Institute. Diciembre 1974.
38. Sunghak Lee, Dongil Kwon, Young Kook Lee, and Ohjoon Kwon "Transformation strengthening by thermomechanical treatments treatments in CMn-Ni-Nb steel", Metallurgical and materials transactions A, Volume 26A, Mayo 1995, pp 1.
39. L.J. Cuddy "Thermomechanical processing of microalloyed austenite", TMS, Warrendale, 1982, p 129.
40. J.M. Gray, T. Ko. Zhang Shouhua, Wu Baorong, Xie Xishan "HSLA steels metallurgy and applications", conference proceedings ASM international, 4-8 Noviembre 1985, pp 29-44.
41. Internet, "United States Steel corporation" Automotive Low-Carbon Steels.
42. Internet, "Precision Steel Warehouse, Inc" Low Carbon Steel Sheet- Aluminium Killed Steel sheet.
43. Internet," [www.azom.com/article.aspx?ArticleD=2537](http://www.azom.com/article.aspx?ArticleD=2537) ", Pagina de The AZO Journal of Materials Online.
44. Tang N-Y. "Modeling of enrichment in galvanized coatings", Metallurgical and Materials Transactions 1995; 26<sup>a</sup>:1669.
45. Guttman M. "Diffusive phase transformations in hot dip galvanizing", Material Science Forum 1994; 155 (156): 527
46. Avner, Sydey H. "Introducción a la Metalurgia Física". 2a Edición. s.l: Mc Graw Hill, 1988.
47. Dagoberto Silva Franco, "Laminación en caliente y en frío de aceros al silicio para aplicaciones eléctricas" Tesis de Maestro en Ciencia de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Enero 2012, pp 40.
48. Khaled F. Al-Hajeri "The grain and subsequent transformation of austenite in the HSLA steel during high temperature thermomechanical processing", University of Pittsburgh school of engineering, Abril 13,2005, pp 12-19.
49. Cuddy, L.J., "Microstructure development during thermomechanical treatment of HSLA steels", Metallurgical transaction, Vol. 12A, Julio 1981, pp 1313 – 1320.
50. Sekine, H. and Maruyama, T., "3rd Proceeding, International conference on the strength of metals and alloys ", London, Iron and Steel Institute, 1973, pp 85- 94.

51. Welding Handbook, Volume 2, pp.554, AWS.
52. Resistance Welder Manufacturers Association Bulletin # 23.
53. N.T. William, W. Waddell, "High speed resistance seam welding of uncoated and coated steels", Welding and Metal Fabrication, Aug 1995.
54. Keneath Stearling, "Introduction to the physical metallurgy of welding", 1st Edition, Butterworths & Co (Publishers) Ltd., p. 1, 110-112 (1983).
55. V.H Baltazar H., M.L. Kuntz, Y. Zhou. "Fusion zone microstructures in resistance spot welding of TRIP to HSLA". Waterloo, Canada: Department of mechanical and Mechatronics Engineering, University of Waterloo, 2009. p. 2.
56. P. D. Medina-Varela y A. M. López-Reyes, "Análisis crítico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados," Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira, vol. 18, no. 47, pp. 101-106, Abril 2011.
57. J. Ferré y F. X. Rius, "Introducción al diseño estadístico de experimentos," Revista Técnicas de Laboratorio, vol. 24, no. 274, pp. 648-653, Septiembre 2002.
58. D. C. Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, México, Limusa Wiley, 2011.
59. Minitab StatGuide, Minitab 17.
60. M. Coba-Salcedo y E. Serres-Moliner, "Tecnologías de fabricación rápida. Optimización y mejora de la tecnología de mecanizado rápido-coproinmold," Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquía, no. 36, pp. 7-20, Marzo 2006.
61. Guía de Métodos Alternativos para Determinar el Precalentamiento en la Soldadura de Aceros Estructurales. (s.f.). Recuperado el 2015, de ANEXO IV, Proyecto de Reglamento Argentino para la Soldadura de Estructuras en Acero.
62. Barrera Morales Juan Camilo, "Estudio de la Soldabilidad Del Acero Estructural Astm A572 Grado 50 Con Proceso GMAW en Junta en T, Posición 3f Progresión Descendente, Comparado Con El Proceso SMAW Progresión Ascendente", Tesis Para Optar al Título de Ingeniero Mecánico, Institución Universitaria Los Libertadores Bogota Colombia, 2015. Pp. 53, 54.
63. ASTM E 415-99a "Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel".

64. Chrysler Corporation Committee; Standard laboratory procedure Chrysler PS-10947 “ Resistance spot welding automotive components and assemblies including advanced high strength steels ”, January 2010, EUA, pp 1-46.
65. ASTM E 92-00 “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”
66. AWS/SAE D8.9M: 2002 An American National Standard “Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials” Abril 2002, EUA, pp 1-46.
67. AWS/SAE D8.9M: 2002 An American National Standard “Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials” Abril 2002, EUA, pp 1-46.
68. Chrysler Corporation Committee; Standard laboratory procedure Chrysler LP-461-K170 “Resistance weldability test for bare, galvanized, galvanized, high strength, low carbon, and interstitial free hot and rolled steel sheet”, Abril 1992, EUA, pp 1-46.D
69. American Welding Society. AWS/SAE D8.1M: Specification for automotive weld quality - resistance spot welding of steel. Miami, 2007.
70. Recetas de soldaduras, Ternium.
71. Internet:  
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8305fde5a8e64658a93595edfb722bc4&ckck=1>
72. Internet: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6537#2>
73. Reporte: ensayos de tensión de láminas soldadas, Dra. Martha P. Guerrero Mata, Dra. Adriana Salas Zamarripa

## Índice de Imágenes.

Figura 2. 1. Esquema de los aceros AHSS (se muestran en color) comparándolos con los aceros de baja resistencia (gris oscuro) y con los aceros HSS convencionales. (Gris claro) [2]. .....	8
Figura 2. 2. Esquema de los nuevos aceros de mayor resistencia que utilizan una composición química, proceso y microestructuras únicas para obtener propiedades específicas y características de deformación [2]. .....	8
Figura 2. 3. Muestra las islas de martensita en una matriz de ferrita [1]. .....	10
Figura 2. 4. Bainita y austenita retenida son fases adicionales en los aceros TRIP [1]... ..	10
Figura 2. 5. Retraso de recristalización por el Nb o Ti [8]. .....	16
Figura 2. 6. Distintos efectos del titanio en un acero de bajo contenido de carbono laminado en caliente. Donde Er es energía de impacto, T es dirección transversal y L es dirección longitudinal [8]. .....	18
Figura 2. 7. Efecto del Nb, Ti y V sobre la temperatura crítica de recristalización de la austenita (contenido de carbono 0.15%) [8]. .....	19
Figura 2. 8. Relación entre el exceso de boro y el efecto de las propiedades mecánicas [8]. .....	21
Figura 2. 9. Ilustración esquemática de la microestructura de austenita resultado de distintas condiciones de deformación. ....	24
Figura 2. 10. Representación esquemática de la microestructura austenítica, cuando la deformación es por abajo y por arriba de la temperatura de paro de recristalización TRXN, de austenita. Nota GB, DB, TB Y NPD denotan la contribución total Sv de los límites de grano, bandas de deslizamiento y maclaje. Por otra parte, D es la longitud del borde al cuadrado y R es la proporción de reducción de laminado [48]. .....	25

Figura 2. 11. Ilustración esquemática del proceso de laminado. Nota TGC es la temperatura de engrosamiento de grano [15].....	25
Figura 3. 1. Generación de calor en RSEW [51]. .....	28
Figura 3. 2. Ilustración esquemática de la relación entre velocidad de soldadura y el porcentaje de penetración utilizando dos corrientes [51]. .....	30
Figura 3. 3. Ilustración esquemática del comportamiento de la presión y corriente y cómo influye en el porcentaje de penetración del botón de soldadura .....	31
Figura 3. 4. Ilustración esquemática del comportamiento de la presión y la corriente y como estos influyen el ancho del cordón. ....	32
Figura 3. 5. Gráfica de lóbulo tridimensional para un acero bajo carbono usando pulsos de corriente 3-1.....	34
Figura 3. 6. Curva del comportamiento de la resistencia contra el tiempo en un la soldadura continua por resistencia eléctrica (RSEW) .....	35
Figura 3. 7. Sección transversal del cordón de soldadura a tres velocidades diferentes [53]. .....	37
Figura 3. 8. Un diagrama esquemático de las diversas zonas de la región de soldadura correspondiente a la aleación de C (0,15 en peso % C) indicado en el diagrama de equilibrio Fe Fe <sub>3</sub> C [54]. .....	40
Figura 3. 9. Diagrama TTT para una aleación hierro-carbono con una composición eutectoide: A= austenita, B= bainita, M= martensita, P= Perlita [31]......	42
Figura 3. 10. Diagrama CCT típico de un acero de bajo carbono: A= austenita; F= Ferrita, P= perlita, B= bainita, M= martensita .....	42
Figura 3. 11. Diagrama de Graville [61].....	47

Figura 4. 1. Componentes de un experimento .....	50
Figura 4. 2. Representación geométrica del diseño $2^2$ [58].....	50
Figura 4. 3. Transformación usada para encontrar el modelo de regresión en un diseño $2^k$ .....	57
Figura 5. 1. Diseño experimental de la investigación. ....	59
Figura 5. 2. Parámetros de soldadura. ....	62
Figura 5. 3. Medición de soldadura.....	63
Figura 5. 4. Esquema de prueba de tensión a corte .....	64
Figura 5. 5. Esquema del perfil de dureza Vickers [67,68].....	65
Figura 5. 6. Diagrama de la ubicación de la toma de micrografías en 22MnB5-22MnB5.....	65
Figura 6. 1. Microestructura del acero 22MnB5.....	67
Figura 6. 2. Microestructura del acero 1006.....	67
Figura 6. 3. Sección transversal del cordón de soldadura para cada condición entre 22MnB5-22MnB5.....	70
Figura 6. 4. Diagrama de la ubicación de la toma de micrografías en las dos uniones. .	71
Figura 6. 5. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 1), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente. ....	72

Figura 6. 6. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 2), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente. .... 73

Figura 6. 7. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 3), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente. .... 74

Figura 6. 8. Microestructura de la zona de fusión del acero 22MnB5. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente. Columna de la derecha corresponde a la microestructura de la zona de fusión (condición 4), Fotos tomadas en 50x, 100x y 500x respectivamente. .... 75

Figura 6. 9 Microestructura de la zona afectada térmica del acero 22MnB5 a 50x,100x 500x. El 5 y 4 corresponden a la región supercrítica, el 3 corresponde a la región intercrítica, el 2 corresponde a la región subcrítica y el 1 corresponde metal base. .... 77

Figura 6. 10. Medición de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para la soldadura 22MnB5-22MnB5. .... 78

Figura 6. 11. Medición de la profundidad de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para las soldadura 22MnB5-22MnB5. .... 79

Figura 6. 12. Medición de la Zona afectada térmicamente (ZAT) de cada una de las corridas y condiciones para las soldadura 22MnB5-22MnB5. .... 79

Figura 6. 13. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 1. .... 80

Figura 6. 14. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 2. .... 81

Figura 6. 15. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 3.....	81
Figura 6. 16. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-22MnB5 en la condición 4.....	82
Figura 6. 17. Dureza Vickers en el centro de la zona de fusión en 22MnB5-22MnB5 para cada condición y replica. ....	82
Figura 6. 18. Esfuerzo máximo de los ensayos de tensión para la unión de soldaduras 22MnB5-22MnB5.....	83
Figura 6. 19. Gráfica de interacción para esfuerzo Máximo para 22MnB5-22MnB5. ....	84
Figura 6. 20. Comportamiento mecánico a la tensión para cada condición para soldaduras 22MnB5-22MnB5. ....	85
Figura 6. 22. Sección transversal del cordón de soldadura para cada condición entre 22MnB5-1006.....	86
Figura 6. 22. Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 1).....	87
Figura 6. 23. Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 2).....	88
Figura 6. 24. . Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 3).....	89



Figura 6. 26. . Microestructura de la zona de fusión de los aceros 22MnB5-1006. Columna izquierda, microestructuras tomadas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 22MnB5. Columna derecha microestructuras tomas cerca de la zona afectada térmicamente del acero 1006 (condición 4).....	90
Figura 6. 26. Medición del diámetro de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para soldadura 22MnB5-1006. ....	92
Figura 6. 27. Medición de la profundidad de la zona de fusión de cada una de las corridas y condiciones para soldadura 22MnB5-1006. ....	92
Figura 6. 28. Medición de la Zona afectada térmicamente (ZAT) de cada una de las corridas y condiciones para soldadura 22MnB5-1006. ....	93
Figura 6.29. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 1. ....	94
Figura 6. 30. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 2. ....	94
Figura 6. 31. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 3. ....	95
Figura 6. 32. Perfil de Microdureza en la zona transversal del cordón de soldadura de 22MnB5-1006 en la condición 4. ....	95
Figura 6. 33. Dureza Vickers en el centro de la zona de fusión en 22MnB5-1006 para cada condición y replica. ....	96
Figura 6. 34. Esfuerzo máximo de los ensayos de tensión para la unión entre 22MnB5-1006.....	97
Figura 6. 35. Gráfica de interacción para esfuerzo Máximo para 22MnB5-1006.....	97
Figura 6. 36. Gráfica esfuerzo deformación para cada condición para 22MnB5-1006..	98

Figura 6. 37 Grafica de cubos de medias ajustada para el Diámetro de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-22MnB5. ....	100
Figura 6. 38. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5. ....	101
Figura 6. 39 Gráfica de cubos de medias ajustada para la profundidad de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-22MnB5. ....	102
Figura 6. 40. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5....	103
Figura 6. 41. Gráfica de cubos de medias ajustada para la zona afectada térmicamente (mm) en la unión 22MnB5-22MnB5. ....	104
Figura 6. 42. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta dela zona afectada térmicamente para la unión 22MnB5-22MnB5. ....	105
Figura 6. 43. Gráfica de cubos de las medias ajustadas de los valores de la microdureza (HV) en la unión 22MnB5-22MnB5.....	106
Figura 6. 44. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de microdureza para la unión 22MnB5-22MnB5.....	107
Figura 6. 45. Gráfica de cubos de medias ajustada para el Esfuerzo máximo (MPa) en la unión 22MnB5-22MnB5.....	108
Figura 6. 46. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de esfuerzo máximo para la unión 22MnB5-22MnB5. ....	109
Figura 6. 47. Gráfica de cubos de medias ajustada para el Diámetro de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-1006.....	111
Figura 6. 48. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006. ....	112

Figura 6. 49. Gráfica de cubos de medias ajustada para la profundidad de la zona de fusión (mm) en la unión 22MnB5-1006.....	113
Figura 6. 50. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006. ....	114
Figura 6. 51. Gráfica de cubos de medias ajustada para la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006.....	115
Figura 6. 52. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006. ....	116
Figura 6. 53. Gráfica de cubos de las medias ajustadas de los valores de la microdureza (HV) en la unión 22MnB5-1006.....	117
Figura 6. 54. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de microdureza para la unión 22MnB5-1006. ....	118
Figura 6. 55. Gráfica de cubos de medias ajustada para el Esfuerzo máximo (MPa) en la unión 22MnB5-1006. ....	119
Figura 6. 56. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un $\alpha=0.05$ . Para la respuesta de esfuerzos máximos para la unión 22MnB5-1006.....	120

## Índice de tablas

Tabla 2. 1. Ti elemento microaleante con múltiples usos [8].	17
Tabla 2. 2. Características del boro como elemento microaleante [8].	20
Tabla 4. 1. Tabla de signos para el diseño $2^2$ y notación de Yates [58].	53
Tabla 4. 2. Tabla ANOVA para un diseño factorial $2^2$ [58].	55
Tabla 5. 1 Parámetros utilizados para la unión entre 22MnB5-22MnB5	61
Tabla 5. 2. Parámetros utilizados para la unión entre el acero 22MnB5-1006.	61
Tabla 6. 1. Espectrometría de chispa de cada uno de los aceros	68
Tabla 6. 2 Tabla de diseño factorial $2^2$ para el Diámetro de la zona de fusión en la unión 22MnB5-22MnB5	100
Tabla 6. 3.Efectos de los términos en la Zona centro de fusión para 22MnB5-22MnB5.	100
Tabla 6. 4. ANOVA del Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5.	101
Tabla 6. 5. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de profundidad de la zona de fusión en la unión 22MnB5-22MnB5.	102
Tabla 6. 6. Tabla de efectos para la profundidad para 22MnB5-22MnB5.	102
Tabla 6. 7. ANOVA de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-22MnB5.	103

Tabla 6. 8. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-22MnB5 .....	104
Tabla 6. 9. Tabla de efectos de la zona afectada térmicamente para 22MnB5-22MnB5.....	104
Tabla 6. 10. ANOVA de la zona afectada térmicamente para la unión 22MnB5-22MnB5 .....	105
Tabla 6. 11. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de microdureza en la unión 22MnB5-22MnB5.....	106
Tabla 6. 12. Efecto de los términos en la microdureza para 22MnB5-22MnB5 .....	107
Tabla 6. 13. ANOVA de la microdureza para la unión 22MnB5-22MnB5. ....	107
Tabla 6. 14. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de esfuerzos Máximos en la unión 22MnB5-22MnB5.....	108
Tabla 6. 15. Efecto de los términos en el esfuerzo máximo para 22MnB5-22MnB5. ..	108
Tabla 6. 16. ANOVA del esfuerzo máximo para la unión 22MnB5-22MnB5. ....	109
Tabla 6. 17. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el Diámetro de la zona de fusión en la unión 22MnB5-1006.....	111
Tabla 6. 18. Efecto de los términos en el diámetro de fusión para 22MnB5-1006.....	111
Tabla 6. 19 ANOVA Diámetro de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006. ....	112
Tabla 6. 20. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de profundidad de la zona de fusión en la unión 22MnB5-1006.....	113
Tabla 6. 21. Efecto de los términos en la profundidad para 22MnB5-1006.....	113
Tabla 6. 22 ANOVA de la profundidad de la zona de fusión para la unión 22MnB5-1006.....	114

Tabla 6. 23. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006.....	115
Tabla 6. 24. Efecto de los términos en la zona afectada térmicamente para 22MnB5-1006.....	115
Tabla 6. 25. ANOVA de la zona afectada térmicamente en la unión 22MnB5-1006....	116
Tabla 6. 26. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis de microdureza en la unión 22MnB5-1006.....	117
Tabla 6. 27. Efecto de los términos en la microdureza para 22MnB5-1006. ....	117
Tabla 6. 28. ANOVA de la microdureza para la unión 22MnB5-1006.....	118
Tabla 6. 29. Tabla de diseño factorial $2^2$ para el análisis del esfuerzo Máximo en la unión 22MnB5-1006.....	119
Tabla 6. 30. Efecto de los términos en el esfuerzo máximo para 22MnB5-1006. ....	119
Tabla 6. 31. ANOVA del esfuerzo máximo para la unión 22MnB5-1006.....	120
Tabla 6. 32. Predicción de respuestas para la unión 22MnB5-22MnB5.....	121
Tabla 6. 33. Predicción de respuestas para la unión 22MnB5-1006. ....	122