

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



**FRACTURA DE ACERO 22MnB5 EN LAS INMEDIACIONES DE LA  
TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL**

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
MECÁNICA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

POR

LESLY SUSANA BRIANO MURILLO

CD. UNIVERSITARIA, SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. ENERO 2024

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



**FRACTURA DE ACERO 22MnB5 EN LAS INMEDIACIONES DE LA  
TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL**

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
MECÁNICA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

POR

LESLY SUSANA BRIANO MURILLO

CD. UNIVERSITARIA, SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. ENERO 2024

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Fractura de acero 22MnB5 en las inmediaciones de la transición dúctil frágil", realizada por la estudiante Lesly Susana Briano Murillo, con número de matrícula 1579593, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

**El Comité de Evaluación de Tesis**


Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
Director

Dr. Arturo Juárez Hernández  
Revisor

Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama  
Revisor

Dr. Jorge Adrián Aldaco Castañeda  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 1306

Ciudad Universitaria, a 15 de Noviembre de 2023.



### **Declaración de autenticidad:**

Declaro solemnemente que he preparado este documento siguiendo las mejores prácticas nacionales e internacionales. Contiene material original generado y redactado por mí. También contiene material parafraseado o entrecomillado, que por ser de otras personas se incluye dando el debido reconocimiento, citando las fuentes documentales correspondientes.

San Nicolás de los Garza, enero de 2024

---

Lesly Susana Briano Murillo

## **Dedicatoria**

*A mi familia por su amor y apoyo incondicional.*

## **Agradecimientos**

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por recibirme como estudiante para realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico que me otorgó.

A mi asesor de tesis, el Dr. Moisés Hinojosa Rivera, por sus valiosos consejos, aprendizajes y acompañamiento en toda mi estancia como estudiante de maestría.

Al Dr. Arturo Juárez Hernández, por compartir conmigo y con todos sus estudiantes su conocimiento y su buena disposición de siempre apoyarnos.

A la empresa Metalsa por su disposición y facilitación de la materia prima, en especial al Ing. José Iván López Salazar, por todas sus enseñanzas y su gran apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Al laboratorio CALIMET, por su disposición y facilitación de equipos, en especial a la Ing. Luzema González, por su apoyo para hacer uso de los equipos y a mi amigo, el Ing. Luis Ángel de la Rosa Martínez por su disponibilidad de apoyarme en mi proyecto.

A la empresa Hierro Gris de Monterrey, por apoyarme cuando más necesite de utilizar sus equipos y así lograr no atrasarme en la parte experimental de mi proyecto en tiempos de pandemia.

A todos mis profesores y compañeros de posgrado por su acompañamiento.

## Índice

<b>Resumen</b> .....	7
<b>Capítulo I. Introducción</b> .....	8
<b>Capítulo II. Estado del arte</b> .....	12
2.1 Fractura en aceros de alta resistencia.....	12
2.2 Tipos de fractura.....	12
2.3 Modos de fractura.....	13
2.4 Fractografía.....	13
2.5 Antecedentes del acero 22MnB5.....	14
2.6 Mecanismos de fractura y propagación de grietas en metales.....	22
<b>Capítulo III. Hipótesis y objetivos</b> .....	25
3.1 Hipótesis.....	25
3.2 Objetivos.....	25
3.3 Objetivos específicos.....	25
<b>Capítulo IV. Metodología experimental</b> .....	26
4.1 Obtención de la materia prima.....	26
4.2 Tratamientos térmicos.....	28
4.3 Preparación metalográfica.....	30
4.4 Pruebas de dureza Rockwell C/B.....	33
4.5 Pruebas de impacto Charpy.....	34
4.6 Estereoscopia.....	36
4.7 Pruebas de tensión.....	37
4.8 Microscopía electrónica de barrido.....	38
<b>Capítulo V. Resultados y discusión</b> .....	40
5.1 Evaluación microestructural.....	40
5.2 Pruebas mecánicas de dureza.....	43
5.3 Resistencia al impacto del 22MnB5 con diferentes microestructuras.....	45
5.4 Pruebas mecánicas de tensión.....	49
5.5 Fractografía de muestras de impacto Charpy.....	50
<b>Capítulo VI. Conclusiones</b> .....	54
<b>Referencias</b> .....	55
<b>Lista de figuras y tablas</b> .....	59

## Resumen

Actualmente, a nivel global, la industria automotriz está en continua transformación y enfrenta retos derivados del fenómeno del cambio climático y la transición hacia el abandono de los combustibles fósiles; en el campo de los materiales, a nivel de los componentes estructurales de vehículos, estos retos se traducen en la necesidad de hacer partes estructurales más ligeras pero que mantengan las resistencias requeridas en las diversas condiciones de operación, para así ofrecer un desempeño eficiente y seguro. Es por ello que surge la necesidad de investigar el comportamiento a temperaturas subcero de un acero usado por una empresa local en componentes estructurales de vehículos, que operan en ciertas latitudes a temperaturas inferiores a los  $-40^{\circ}\text{C}$ . Es bien sabido que los aceros automotrices generalmente tienen buen desempeño, combinando alta resistencia y tenacidad, sin embargo se introduce incertidumbre en el comportamiento mecánico, al someterlos a condiciones de operación subcero, es el motivo por el cual proponemos generar nuevo conocimiento acerca del comportamiento del acero tipo 22MnB5; para lograrlo, planteamos realizar el estudio experimental donde evaluamos el efecto de dos parámetros de tratamiento térmico sobre la microestructura y el comportamiento mecánico del acero al boro 22MnB5, así como también en la condición de rolado, las dos muestras con tratamiento termico se revinieron en tiempos y temperaturas de permanencia diferentes (5 min a  $405^{\circ}\text{C}$  y 8 minutos a  $408^{\circ}\text{C}$ ) para obtener resistencias a la cedencia entre 1,030 y 1,100 MPa (150 y 160 KSI) estos resultados fueron corroborados por medio de ensayos tanto de tensión como de dureza, ambos a temperatura ambiente. De las tres condiciones de experimentación, se realizó el análisis metalográfico mediante microscopía óptica, posteriormente, determinamos la capacidad de absorción de energía de impacto, mediante ensayos Charpy a temperatura entre la ambiente y  $-42^{\circ}\text{C}$ ; como referencia del límite operacional de este acero se determinó la temperatura de transición dúctil frágil; además, este estudio fue robustecido con estudios fractográficos llevando las muestras fracturadas en la temperatura de transición de las tres condiciones, al microscopio electrónico de barrido, para seguir los cambios microestructurales, identificar las superficies, los mecanismos y propagación de fractura, los resultados mostraron una resistencia significativamente menor al agrietamiento por fragilidad del acero en el estado de rolado en comparación con el estado después del temple y revenido a temperaturas subcero, los aceros después del tratamiento térmico retienen suficientes valores de tenacidad y suficiente resistencia a la fractura frágil hasta temperaturas de alrededor de  $-40^{\circ}\text{C}$ , en el estudio fractografico, para el caso del acero 22MnB5 en condición de rolado, demuestra ductilidad y se puede apreciar una basta cantidad de grietas propagadas por medio de cavidades, para la condición 2 de temple y revenido se aprecian características frágiles y casi no vemos grietas

para la condición 3 es un caso muy parecido al anterior, ambos comportamientos se deben a que la microestructura con el tratamiento térmico se volvió martensítica, esta estructura conlleva a las fracturas de tipo frágil.

## Capítulo I: Introducción

El incremento de conciencia del cuidado ambiental, ha llevado a los seres humanos a nuevos retos en diferentes ramas de la investigación, la industria siderúrgica ha respondido a esta tendencia, desarrollando los llamados aceros avanzados, de los cuales se han desarrollado diversas variantes en una secuencia de generaciones. En la industria automotriz, el desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia o también llamados aceros de tercera generación, se ha convertido en una preocupación importante, ya que su aplicación es primordial para la reducción del consumo de combustible así como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la solución que se ha encontrado es aligerar el peso de los vehículos, introduciendo componentes estructurales de acero con mayor resistencia, permitiendo disminuir su espesor, sin embargo, se exige que se mantengan e incluso que se aumenten los aspectos de seguridad de los pasajeros.

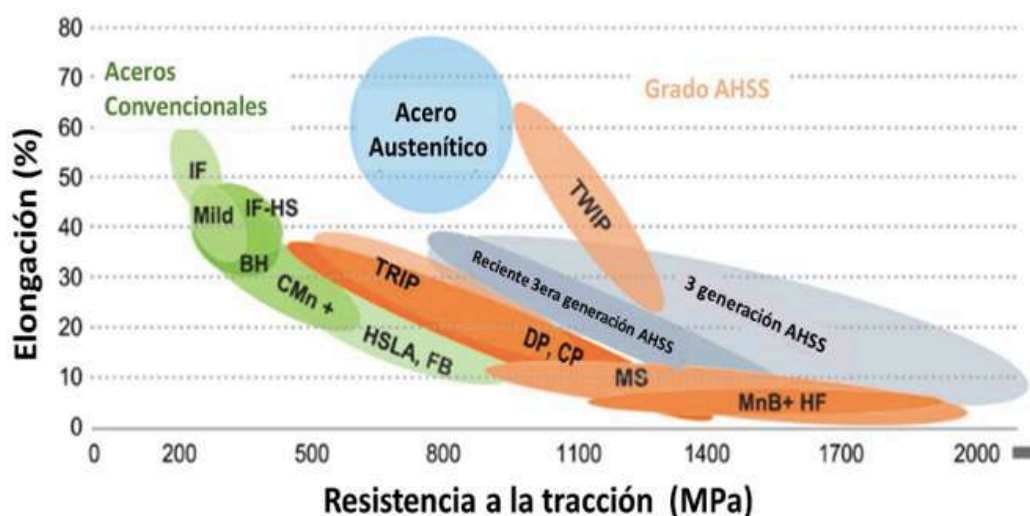


Fig. 1 Diagrama clásico de los aceros avanzados [1]

Se puede observar en la fig.1 el posicionamiento de los diferentes tipos de aceros avanzados, respecto al porcentaje de elongación (eje y) y la resistencia a la tensión (eje x), los aceros se pueden categorizar de acuerdo a sus propiedades mecánicas, considerando primordialmente la resistencia a la tensión, el esfuerzo de cedencia y el porcentaje de elongación, el acero tiene la capacidad de formar diferentes microestructuras que conllevan a fortalecer diferentes propiedades mecánicas, actualmente existe una gran diversidad de tipos de acero, es por eso que ha permitido su uso en aplicaciones de componentes estructurales de vehículos para responder a las necesidades actuales del mercado.



Además, para este proyecto surge la necesidad de investigar el comportamiento a temperaturas subcero del acero 22MnB5 tratado térmicamente para aportar información que sea de utilidad, ya que actualmente es usado en componentes estructurales de vehículos (chasis), que operan en Canadá, donde la temperatura llega a niveles inferiores a los  $-40^{\circ}\text{C}$  y actualmente las especificaciones solo hacen referencia a la temperatura ambiente. Es bien sabido que los aceros al carbono y avanzados cambian su comportamiento mecánico cuando son sometidos a temperaturas por debajo de la ambiente. El comportamiento normalmente esperado, por ejemplo ante un impacto o choque, es que exista una deformación plástica antes de la fractura, lo contrario, es decir un comportamiento frágil o de fractura súbita, es generalmente indeseable. Un acero común se comporta de manera dúctil a temperatura ambiente y cambia progresivamente a comportamiento frágil al ser expuesto a temperaturas bajas, se habla entonces de la temperatura de transición dúctil-frágil.

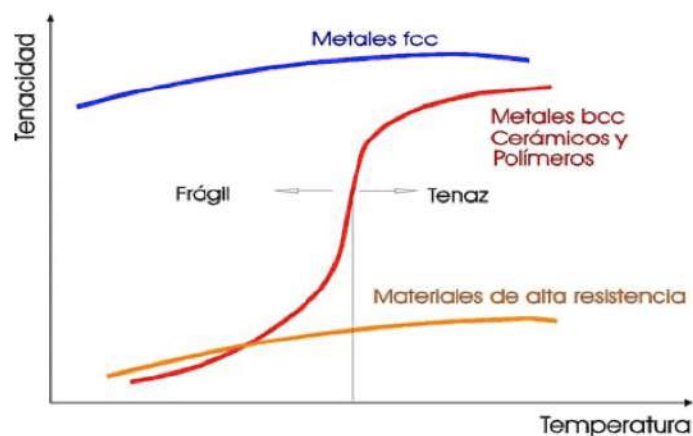


Fig. 2 Diagrama de temperatura de transición dúctil-frágil [2]

Se puede observar en la fig. 2 que, para la mayoría de los materiales con diferentes condiciones de resistencia mecánica, la energía de impacto es menor a medida que la temperatura descende, para algunos materiales se requiere una combinación de alta tenacidad con baja resistencia a la cedencia para poder absorber energía deformándose. El comportamiento mecánico a baja temperatura, particularmente la capacidad de absorción de energía o tenacidad, se determina mediante ensayos de impacto enfriando las muestras a las temperaturas de interés, estos mismos ensayos también nos ayudan a tener una aproximación de la referencia de temperatura de transición dúctil-frágil.

El presente proyecto de investigación se desarrolló en la parte experimental en el laboratorio del doctorado, ubicado en el CIDET de la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la

Universidad Autónoma de Nuevo León y también se contó con el apoyo del laboratorio externo CALIMET, la empresa Metalsa y la empresa Hierro Gris de Monterrey donde se recurrió debido a que el laboratorio de la escuela cerró sus puertas por pandemia. El fenómeno de la transición de comportamiento dúctil a comportamiento frágil es ampliamente conocido [3] y ha sido motivo de infinidad de estudios, que se derivaron en parte del hundimiento del Titanic y las fallas de los buques Liberty y que propulsaron el desarrollo de las disciplinas de la mecánica de fractura, la fractografía y el análisis de falla. Si nos remontamos a principios del siglo XX, tomando en cuenta que en este siglo el único medio de transporte tanto para pasajeros como para el correo entre Europa y América era el barco de vapor, derivando así la importancia y competencia de la construcción de barcos gigantes tales como el Titanic, en la fig. 3 podemos observar su construcción, los ingenieros de diseño de aquella época, usaron para la fabricación del casco del barco un acero al carbono. La tabla 1 muestra la composición química completa del acero de la estructura del Titanic, vemos una relación de manganeso-azufre, muy baja en comparación con los estándares actuales, está demostrado que la presencia de cantidades relativamente altas de fósforo, oxígeno y azufre tienden a fragilizar el acero, por lo tanto, este acero era proclive a la fragilización en condiciones de baja temperatura y por impacto, sin embargo en esa época este material era de los mejores aceros disponibles, solo que no era el adecuado para su aplicación, ya que en ese entonces no se consideraba el aspecto de fragilidad en el diseño.

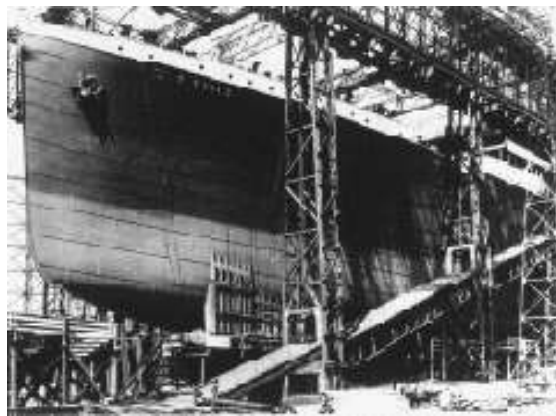


Fig. 3 El Titanic en construcción en el astillero de Harland and Wolff en Irlanda [4]

Tabla 1. Composición química del acero de la estructura del Titanic [5]

<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%S</b>	<b>%P</b>	<b>%Al</b>	<b>%N</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Mo</b>	<b>%Ni</b>
<b>0.21</b>	<b>0.11</b>	<b>0.47</b>	<b>0.048</b>	<b>0.036</b>	<b>0.005</b>	<b>0.004</b>	<b>0.008</b>	<b>0.01</b>	<b>0.019</b>

A causa de este tipo de catástrofes emanó la importancia del diseño adecuado de los materiales según su aplicación, hoy en día es casi imposible imaginar la industria tal y como la conocemos sin el acero, que es considerado uno de los más grandes avances tecnológicos de la humanidad, el acero es parte de nuestra vida en diversas aplicaciones que van desde instrumentos básicos de cocina, buques, puentes, estructuras de vehículos, esculturas

emblemáticas, aviones, y hasta cohetes espaciales, por eso a lo largo de la historia de la humanidad, hemos ido investigando como darle mejores propiedades a este gran material añadiendo diferentes elementos.

Las principales aleaciones que se empezaron a experimentar para fortalecer el acero, contenían del 25% al 35% de níquel, también a principios del siglo pasado, se estudiaron aleaciones con cromo, las cuales mostraban un incremento en la resistencia a la corrosión del acero, también se descubrió que el boro en una cantidad de 2% en peso en algunos aceros otorgaba una gran dureza, pero también una inherente fragilidad, la falta de conocimiento para controlar el contenido del boro durante el proceso de fabricación del acero llevo a una baja comercialización de este, sin embargo, a principios de la segunda guerra mundial, la gran escasez de elementos aleantes que otorgaban mayor dureza al acero, tales como el níquel y el cromo, llevó a la necesidad de utilizar boro en sustitución de éstos, aunque durante éste periodo, su uso fue casi nulo, no fue hasta los años 50's, gracias a los avances en las investigaciones de los aceros con boro que se llevaron a cabo, en el desarrollo de tecnologías de fabricación del acero, se hizo posible que actualmente el boro sea un elemento aleante comúnmente utilizado en los aceros al bajo y medio carbono en pequeñas cantidades que van desde 0.001 a 0.003% en peso.

A este grupo especial, dentro de los aceros de baja aleación, les llamaron aceros al boro, existen algunas aplicaciones donde operan estos aceros a temperaturas subcero en donde es de suma importancia la resistencia al agrietamiento por fragilidad y tener una temperatura de transición segura de dúctil a frágil es primordial; actualmente existe un vacío de investigaciones del comportamiento mecánico a bajas temperaturas de estos materiales, y es la razón por la cual los científicos continúan estudiando la dependencia de la tenacidad y la propagación de grietas en la composición química, la microestructura y las condiciones de procesamiento, una parte importante de este proyecto de tesis consta en generar nuevo conocimiento del comportamiento mecánico a temperaturas subcero.

Acerca del acero tipo 22MnB5, el cual es un acero medio carbono que se caracteriza principalmente por su conformabilidad en estado laminado en caliente y su alta resistencia después del tratamiento térmico, estas características de resistencia después de los tratamientos térmicos, se logran en particular por el bajo contenido de boro, además del carbono y el manganeso, y es gracias a estas características que este grado de acero es el más usado en el proceso de estampado en caliente utilizándose para partes de la carrocería y partes relevantes en la seguridad en la industria automotriz, como pilares centrales, protección contra impactos laterales, parachoques o partes del chasis.

## Capítulo II: Estado del arte

### 2.1 Fractura en aceros de alta resistencia

Desde los inicios de la fabricación de los camiones pesados, se ha hecho presente el uso de largueros estructurales con geometría en “C”, históricamente, la presencia de fracturas en los bordes de los rieles laterales no es común, sin embargo, se ha encontrado, en camiones pesados de unidades antiguas después de 10 años de uso, bordes fracturados en la zona de la brida.

Pero ¿qué es una fractura? este término se refiere a la separación de un material en dos o más partes debido a la acción de una fuerza externa, lo cual genera superficies de fractura, el proceso de falla de un material puede dividirse en la iniciación de una grieta la cual bajo la acción de fuerzas externas se propaga hasta llegar a la fractura, en estos procesos influyen muchas variables.

### 2.2 Tipos de fractura

Una fractura se puede tipificar como una fractura frágil, dúctil o mixta, tal como se observa la figura. 4 y se pueden identificar por medio de observar la topografía de la superficie de fractura.

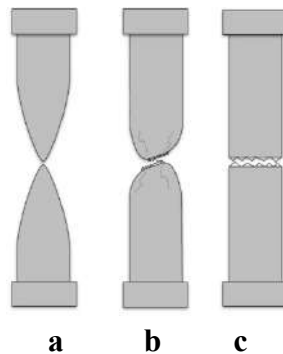


Fig.4 Tipos de fractura: (a) fractura dúctil, (b) fractura mixta, (c) fractura frágil [6]

- (a) La fractura dúctil se observa en materiales que se deforman plásticamente, o sea, el esfuerzo aplicado sobrepasa su punto de cedencia o límite elástico entrando a la zona plástica y llevando el material a la ruptura, una vez fracturado se observa la deformación plástica en el material por el cambio notable en la geometría.

(b) La fractura frágil está desprovista de deformación plástica; sin embargo algunos materiales dúctiles pueden comportarse como frágiles a velocidades de deformación muy rápidas o cuando su temperatura es muy baja llegando a su temperatura de transición.

### 2.3 Modos de fractura

Considerando que la fractura se origina por la propagación de grietas, en relación a la orientación de la grieta y las cargas aplicadas, se habla de tres modos de fractura, que se designan como Modo I, II y III, como se puede observar en la Figura 5, los modos II y III son fundamentalmente de ruptura por cortante pero en el modo II los esfuerzos y la deformación permanecen en el plano de la pieza, mientras III corresponde a un efecto fuera del plano.

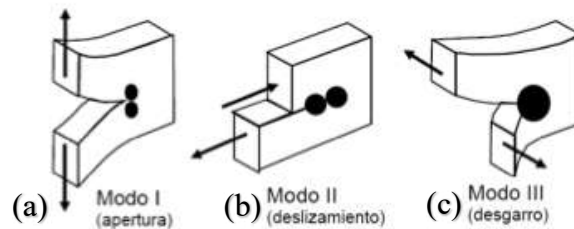


Fig.5 Modos de fractura:

(a) modo I apertura, (b) modo II deslizamiento, (c) modo III desgarro [7]

### 2.4 Fractografía

Fractografía fue el término con el que Carl A. Zapffe en 1944 nombró al medio para acercar el lente de un microscopio lo suficientemente a la superficie irregular de una fractura para revelar sus detalles, la superficie de fractura es comúnmente estudiada y para ello se utilizan diferentes tipos de microscopios, como el estereoscopio y el microscopio electrónico de barrido, el objetivo de la fractografía es analizar las características de la fractura para poder identificar el tipo de fractura, si es intergranular o transgranular, como se muestran en la figura 6, o si presenta alguna partícula que nuclea una grieta, etcétera, con el fin de poder relacionar la topografía de la superficie de la fractura con las causas y/o los mecanismos básicos de la fractura.

Una fractura intergranular indica que la grieta se propagó a lo largo de las fronteras de grano, lo que significa que el material está resistiendo los esfuerzos, y que la grieta pudo haberse propagado por ese medio, una fractura transgranular indica una fractura que se propagó a través del grano, que implica que el material no está resistiendo el esfuerzo.

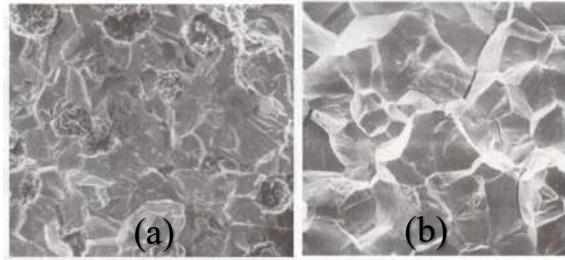


Fig. 6 (a) fractura intergranular, (b) fractura transgranular [8]

## 2.5 Antecedentes del acero 22MnB5

En 2011, el Dr. Eng. Frydman estudió el efecto de la estructura de los aceros al boro en su resistencia a la fractura frágil, se examinaron dos grados de acero al boro, B27 y 28MCB5, que se experimentaron en diferentes condiciones, el primero en estado de entrega sin ningún tipo de tratamiento térmico y el segundo con temple y revenido; en la investigación presentada, es visible una resistencia significativamente menor al agrietamiento por fragilidad del acero en el estado entregado en comparación con el estado después del endurecimiento y revenido. Aunque los valores de resistencia al impacto de los antiguos aceros son relativamente altos a temperatura ambiente, se produce principalmente un carácter frágil de fractura en los aceros en el estado de entrega. La temperatura de transición dúctil a frágil para los aceros ya tiene lugar a temperaturas positivas. Los aceros después del temple y el revenido retienen suficientes valores de tenacidad y suficiente resistencia a la fractura frágil hasta temperaturas de alrededor de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

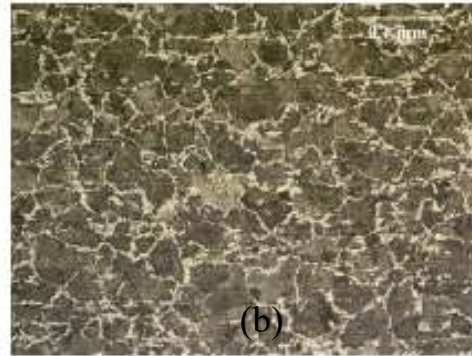
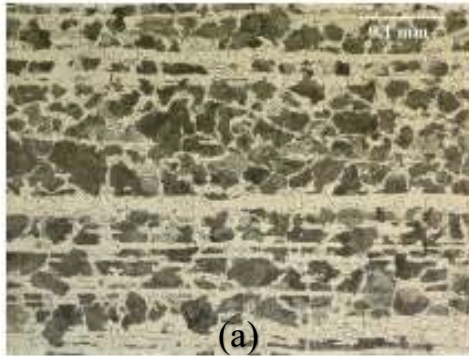


Fig. 7 (a) Microestructura B27 Fig. 8 (b) Microestructura 28MCB5 [9]

Bandeamiento es el nombre que se le da a la microestructura que presenta un acero en capas alineadas de perlita y ferrita, como se puede observar en la figura 7, las propiedades mecánicas dependen de la orientación microestructural, analizando los resultados de impacto que obtuvo el Dr. Frydman y relacionándolos con la microestructura, se puede decir que el bandeamiento de la perlita influye en la capacidad de absorber energía de impacto, ya que en el estado de entrega absorbe menos energía pero después del temple y revenido absorbe más energía incluso a menos  $-40^{\circ}\text{C}$ .

La microestructura de ambos aceros está formada por una mezcla de ferrita y perlita, pero con una distribución diferente de estos componentes. Hay una estructura de bandas en el grado B27, mientras que en el grado 28MCB5 las colonias de perlita están rodeadas de ferrita como se puede observar en la figura 8.

Tabla 2. Valores medios de tenacidad de los aceros ensayados en un rango de temperatura de 20 ÷ -40°C. [10]

Grado de acero	Estado de entrega				Después del temple y revenido			
	Valores medios de la resistencia al impacto con muesca en V Charpy [J/cm <sup>2</sup> medido a diferentes temperaturas [°C]							
	20°C	0°C	-20°C	-40°C	20°C	0°C	-20°C	-40°C
B27	39	17	9	7	61	56	45	37
28MCB5	67	29	17	6	48	40	38	30

Como se muestra en la tabla 2, la distribución diversa de los componentes de la estructura perlita y ferrita en el estado de entrega provocan diferencias significativas en la resistencia al impacto de los aceros. La tenacidad de ambos aceros en estado cae a valores relativamente bajos de 0 y 9 ft•lb a temperatura de 0°C, y se reduce a valores aún más bajos a temperaturas negativas.

La resistencia al impacto de los aceros ensayados después del temple y revenido muestra valores relativamente altos a temperatura ambiente y los valores disminuyen lentamente al disminuir la temperatura, manteniéndose los valores medios de 10 y 17 ft•lb a una temperatura de -40°C.

Un año posterior, en 2012, el mismo Dr. Frydman, complementa su anterior investigación, publicando acerca de las propiedades del acero al boro tras diferentes tratamientos térmicos, en este artículo, el acero al boro que se analiza es grado B27.

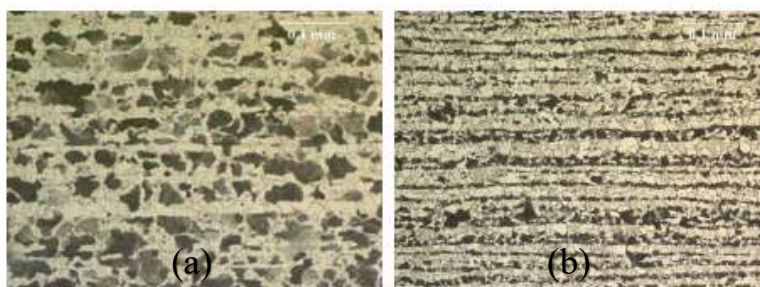


Fig. 9 (a) Microestructura del acero B27, estado de entrega (b) normalizado [11]

El acero se estudió en estado de entrega, la microestructura obtenida es la que se puede observar en la figura 9 (a) así como la de normalizado 9 (b), en ambas se puede apreciar una estructura de bandeamiento, sin embargo se observa un mejor ordenamiento en el normalizado.

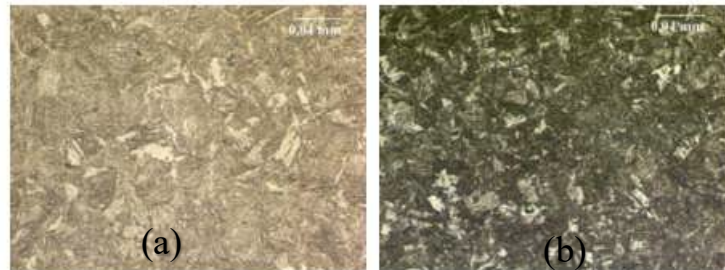


Fig. 10 (a) Microestructura acero B27, templado (b) templado y revenido a 200°C [12]

La microestructura con templado como se observa en la figura 10(c), y después del templado y revenido como se aprecia en la fig. 10(d), se puede decir que no hay un gran cambio en la transformación martensítica con el revenido a 200°C.

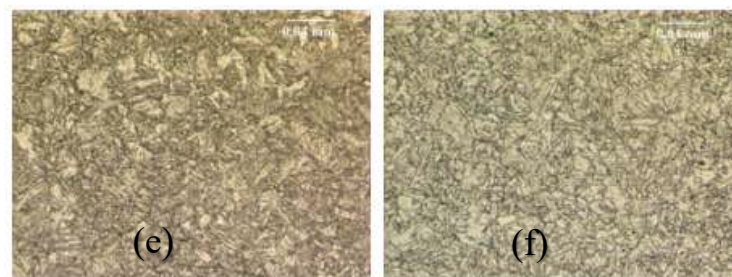


Fig. 11 (c) Microestructura acero B27, templado y revenido a 400°C  
(d) templado y revenido 600°C [13]

La fig. 11 (c) muestra la microestructura del templado y revenido a 400°C y la fig. 11(d) después del templado y revenido a 600°C, se puede apreciar una mejor transformación si la comparamos a la condición de revenido a 200°C.

Estos estudios muestran que los parámetros básicos de resistencia del acero B27,  $R_{0,2}$  y  $R_m$ , son relativamente bajos en estados entregados y después de la normalización, mientras que los valores altos de estos parámetros se obtienen después de tratamientos tales como temple y temple más revenido a 200°C, mayor tenacidad y menor tendencia a la fractura frágil, en el rango de temperatura de funcionamiento de la mayoría de los dispositivos de -20°C a -40°C, también ocurre en los estados después del templado y revenido en comparación con los estados de entrega y después de la normalización. En los dos últimos estados, una gran parte de la fractura por fragilidad durante la prueba de impacto tiene lugar incluso a -20°C.



Sin embargo, el Dr. Eng. Frydman en ambas publicaciones, no describe cual es la relación del efecto de las microestructuras que obtuvo después de los tratamientos térmicos, con la resistencia a la fractura frágil, por lo tanto queda un hueco en la explicación del porque tienen comportamiento frágil a temperaturas subcero.

En 2016, se publica el efecto del contenido de boro en las características mecánicas del acero de bajo carbono por El- Shennawy, menciona que en los aceros microaleados bainíticos con bajo contenido de carbono que contienen Nb, Ti y V, al agregar boro a este tipo de acero mejora su capacidad de endurecimiento al promover la formación de sitios de bainita o martensita, en la serie de figuras del 12 al 15 se pueden seguir los cambios en la microestructura de acuerdo al contenido de boro. Este trabajo aborda el efecto de diferentes contenidos de boro en las propiedades mecánicas del acero de bajo carbono. Se fundieron aleaciones con diferente contenido de boro.



Fig.12 Microestructura  
0.0003%B



Fig.13 Microestructura  
0.005%B

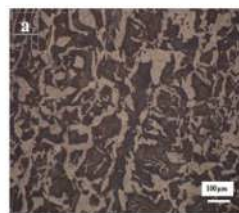


Fig.14 Microestructura  
0.007%B



Fig.15 Microestructura  
0.02%B. [14]

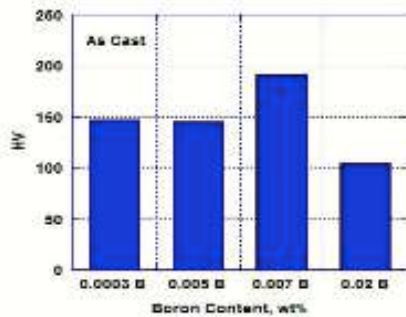


Fig. 16 Histograma de Dureza Vickers

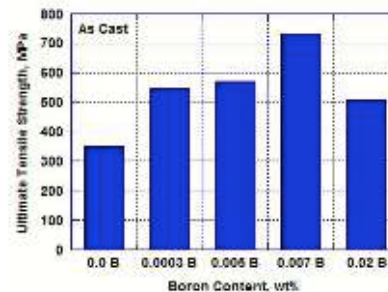


Fig. 17 Resistencia a la tensión del acero con diferente % B

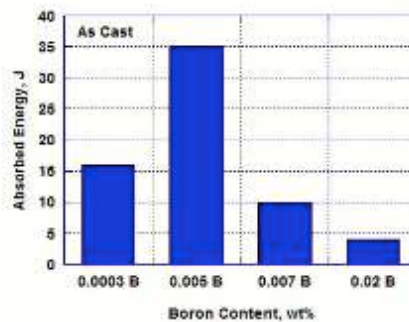


Fig. 18 Comportamiento de impacto frente al contenido de %B. [15]

Como se puede observar en la figura 16, la dureza más alta se obtiene con un contenido de boro de 0.007%, al igual que la mejor resistencia a la tensión, fig. 17, pero en cuanto a una

mejor capacidad de absorción de energía es el 0.005% de boro como se aprecia en la fig. 18, todas estas pruebas se realizaron a temperatura ambiente, sería interesante investigar que efecto tienen estos mismos porcentajes de boro en el comportamiento mecánico, pero a temperaturas por debajo de 0°C.

¿Cómo influye el contenido de boro en la tenacidad a la fractura y la cinética de propagación de grietas por fatiga de los aceros bainíticos? De acuerdo con K.F. Rodríguez-Galeano [16], en 2016, se fabricaron aceros bainíticos con un contenido variable de boro, con el objetivo de analizar la tenacidad a la fractura y los cambios en la vida a fatiga. Los resultados mostraron que un cambio relativamente pequeño en el contenido de boro puede causar una variación notable en la tenacidad a la fractura de los aceros bainíticos. El valor máximo obtenido en los tiempos de fractura fue para el acero con mayor contenido de boro.

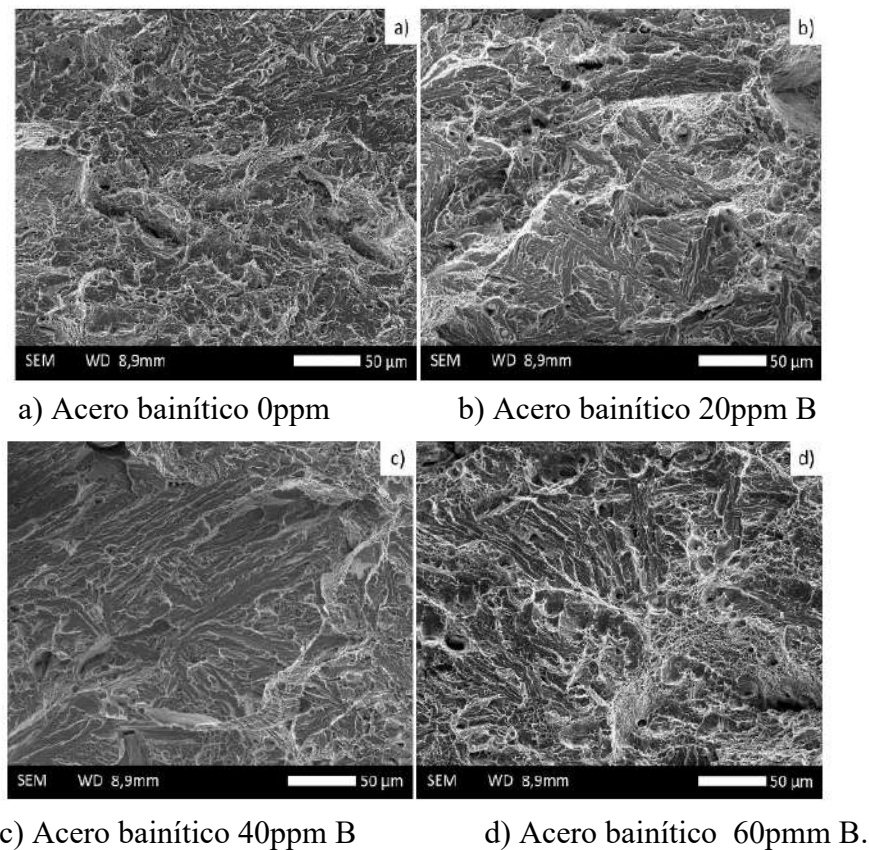


Fig. 19 SEM de áreas de fractura generadas por la prueba de impacto

Se observó que la cantidad de componentes de martensita disminuye en los aceros con la adición de boro, lo que lleva a la promoción y presencia de coalescencia de cavidades como se puede observar en las figuras 19(a),(b), y (d) por lo tanto, a un aumento notable en la tenacidad de los aceros bainíticos. También se observó un aumento en la vida a fatiga de los

aceros bainíticos con un aumento en el contenido de boro, de acuerdo al análisis mediante la ley de Paris.

Bingtao Tang [17], predijo el daño del acero al boro 22MnB5 estampado en caliente con un criterio de fractura dúctil, realizó el experimento y la simulación. Esta investigación relata acerca de la plasticidad y el modelado de fractura dúctil del acero al boro 22MnB5 estampado en caliente, donde la fase martensita con alto límite elástico, endurecimiento por trabajo y ductilidad, esta presentes durante el proceso de enfriamiento. Los criterios de fractura dúctil de Lou, que implican la nucleación, el crecimiento y la coalescencia de cavidades en materiales metálicos, se revisan y amplían teóricamente y se implantan utilizando la subrutina VUMAT de ABAQUS/Explicit. El criterio de fractura dúctil determinado se aplica para pronosticar el inicio de la fractura para siete tipos de especímenes y se compara con los datos del experimento como se observa en las figuras 20 y 21. La comparación indica que el criterio de Lou de fractura dúctil simplemente extendido puede describir con precisión la evolución de la fractura dúctil desde un estado de tensión de tracción uniaxial a tensión de tracción biaxial.

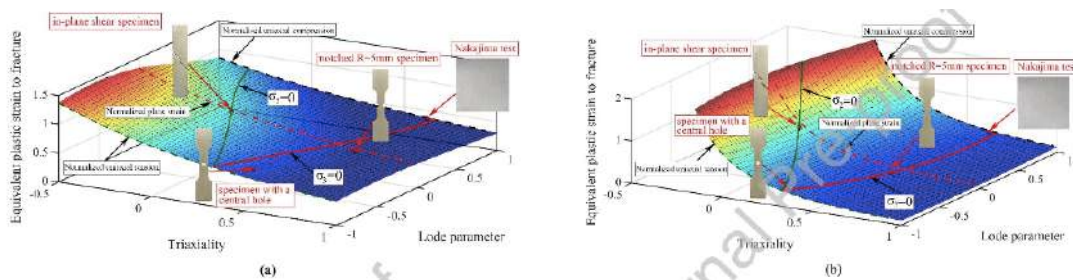


Fig. 20 Los lugares de fractura construidos optimizados con las deformaciones de fractura a) Calculado por método híbrido; b) calculado por el método DIC (GOM ARIMIS). [17]

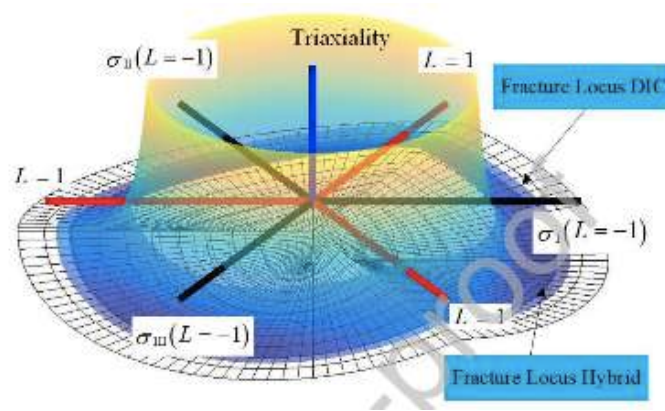


Fig. 21 Dos lugares de fractura de acero al boro templado 22MnB5 construidos en las coordenadas de las tensiones principales [18]

Onur Cavus [18], publicó acerca de las características microestructurales y propiedades mecánicas del acero estampado en caliente 22MnB5 en diferentes condiciones de tratamiento térmico en 2020, en este estudio, se investigaron la microestructura y las propiedades mecánicas de la lámina de acero 22MnB5 en diferentes condiciones de tratamiento térmico. La lámina de acero calentada a 700°C, 800°C y 900°C se sometió a procedimientos de enfriamiento con aire, enfriamiento rápido con agua y enfriamiento rápido con agua más revenido. Las propiedades microestructurales posteriores al tratamiento térmico se analizaron bajo un microscopio óptico. Para determinar las propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tensión uniaxial y medidas de dureza, los resultados se pueden observar en la fig. 25. Las propiedades mecánicas más altas se lograron con el enfriamiento rápido con agua de 800°C y 900°C, el valor de elongación osciló entre 2 y 4 % con el enfriamiento rápido con agua. Además, el proceso de temple aumentó ligeramente el valor de elongación.

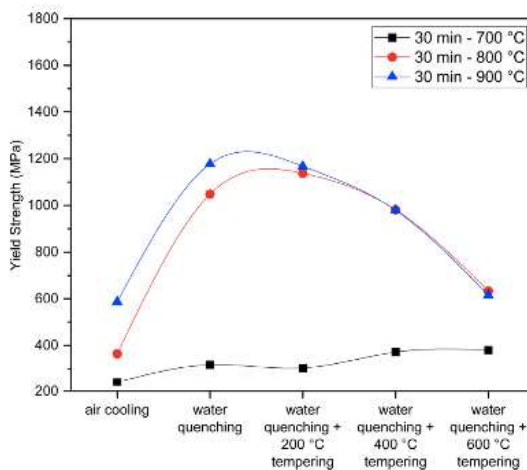


Fig. 22 Límite elástico vs diferentes condiciones de tratamiento térmico

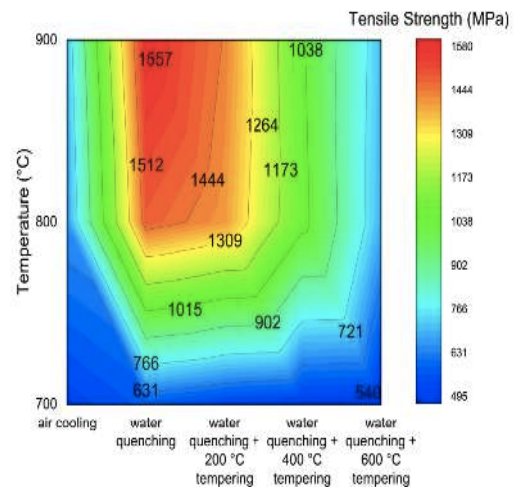


Fig. 23 Mapa de resistencia a la tensión en función de la temperatura de mantenimiento y el método de tratamiento térmico.

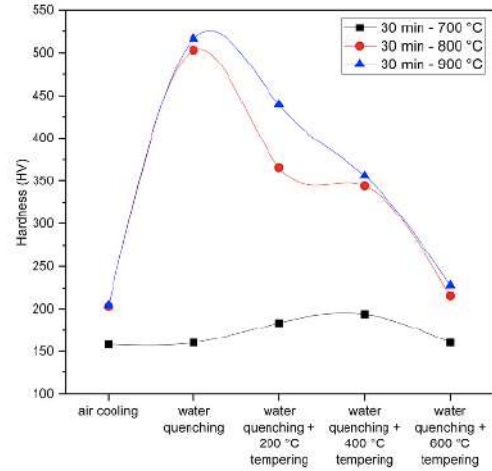
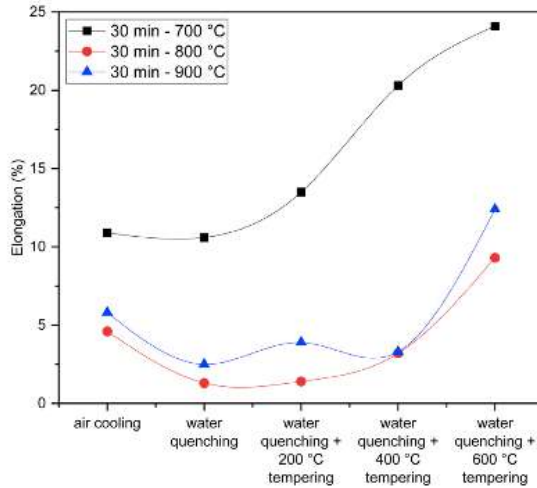


Fig. 24 Elongación vs diferentes condiciones

Fig. 25 Dureza vs diferentes condiciones

Bingtang Tang, realizó la investigación de modelado numérico de fractura dúctil de piezas de acero al boro 22MnB5 estampadas en caliente en flexión de tres puntos, el artículo estudia el comportamiento de falla del acero al boro 22MnB5 estampado en caliente bajo diferentes condiciones de carga como se puede observar en la fig.26, se realizan pruebas de flexión de tres puntos en conjuntos de vigas en forma de U estampadas en caliente para evaluar el efecto de la carga compleja en la evolución del daño. A través de análisis microscópicos basados en SEM, se exploran los mecanismos de falla del material, como el modo de coalescencia de cavidades, así como la relación entre la dirección del esfuerzo cortante máximo y la superficie de fractura. Un modelo basado en FE de las pruebas de flexión en tres puntos que incorpora un criterio de fractura dúctil se calibra e implementa en el software ABAQUS/Explicit utilizando subrutinas VUMAT. Se demuestra que el modelo numérico es capaz de reproducir correctamente la secuencia de deformación y predecir dos macrofisuras simétricas bajo un punzón circular. La curva carga-carrera de la simulación FE finalmente se compara con la de la simulación para mostrar su confiabilidad.

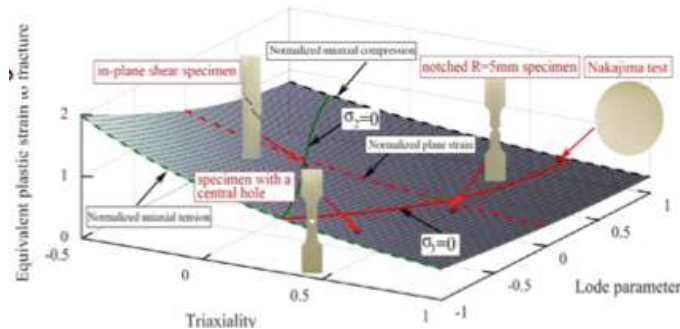


Fig. 26 El lugar de fractura construido basado en la deformación de fractura calculada en varios estados de tensión [20]

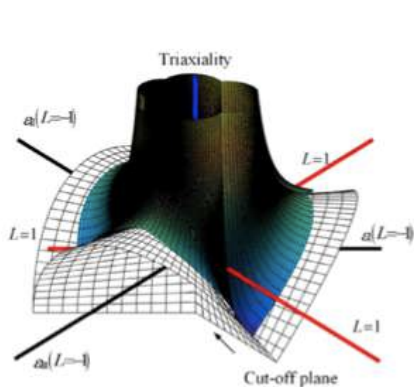


Fig. 27 El lugar de fractura construido en el espacio de deformación principal de  $(\epsilon_I, \epsilon_{II}, \epsilon_{III})$ , que muestra una contracción significativa del lugar de fractura con el aumento de la tensión triaxial. [19]

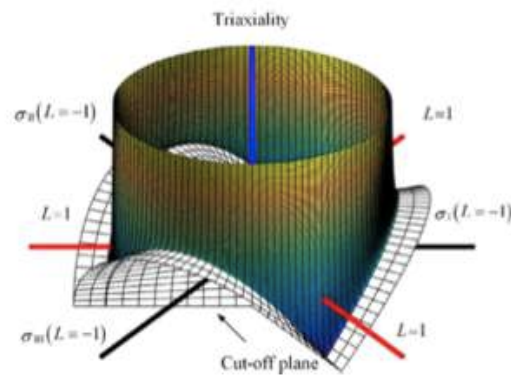


Fig. 28 El lugar geométrico de la fractura construido en el espacio principal de tensión 3D de  $(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III})$ , que muestra la contracción del lugar geométrico de la fractura con el aumento de la triaxialidad de la tensión.[20]

## 2.6 Mecanismos de fractura y propagación de grietas en metales

Existen diversos mecanismos de fractura y propagación de grietas los cuales están en constante investigación, debido a que con el paso del tiempo se van descubriendo nuevas propuestas de estos, los diversos mecanismos pueden estudiarse a diferentes niveles desde el atómico utilizando dinámica molecular, nanométrico estudiando el comportamiento de las dislocaciones en el material y microscópico observando la interacción de los granos en materiales policristalinos.

Podemos encontrar dislocaciones a un nivel nanométrico, estas representan defectos lineales que comúnmente se encuentran en materiales metálicos cristalinos, tales defectos pueden llegar a alterar las propiedades mecánicas de un material, se pueden comportar de distintas maneras como apiladas como se puede observar en la fig. 29 o como intersticios tal como muestra la fig.30 , si las dislocaciones llegasen a interactuar entre ellas pueden, destruirse o fusionarse y esto ocasiona dureza en el material debido a la distorsión atómica que se genera.

Las dislocaciones pueden acumularse u ordenarse en línea, a este fenómeno se le conoce como poligonización, cuando ocurre el acumulamiento que puede ser en una frontera de grano, en un precipitado o en un punto donde ya exista una acumulación de dislocaciones, el cual genera energía y atrae a las dislocaciones, forma zonas frágiles en el material donde es propenso a iniciar una grieta bajo la acción de alguna fuerza externa, otra manera en la cual las dislocaciones interactúan es por intersección entre ellas y cuando esto sucede se apilan y se destruyen entre ellas mismas lo que genera nuevas dislocaciones y por consecuencia esto causa un desorden en el material que a su vez provoca heterogeneidad en las propiedades mecánicas, dando como resultado esfuerzos residuales que actúan como iniciadores de grietas.

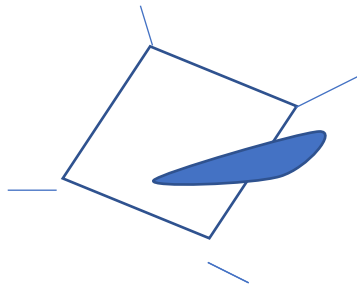


Fig. 29 Mecanismo de apilación

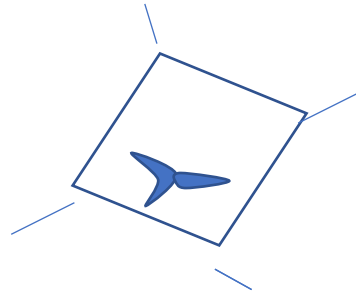


Fig. 30 Mecanismo intersección

Si observamos a un nivel micrométrico los defectos que surgen por la interacción de los granos en el material, se puede observar una incompatibilidad de propiedades, esto se debe a que los granos tienen texturas diferentes o están compuestos de diferentes fases y cuando se aplica un estímulo obviamente van a reaccionar de diferente manera, puede ser que algunos se deformen más lentos que otros formando cavidades entre los granos y es cuando se inician las grietas, otra manifestación es la coalescencia de microcavidades, las cuales se forman por particulares de segunda fase como pueden ser carburos, óxidos y precipitados; el tamaño de estas partículas tiene su debida importancia porque una partícula pequeña puede aumentar las propiedades mecánicas de un material pero si es una partícula de tamaño grande, se pueden degradar.

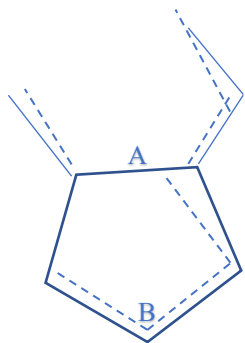


Fig. 31 Mecanismo de incompatibilidad elástica

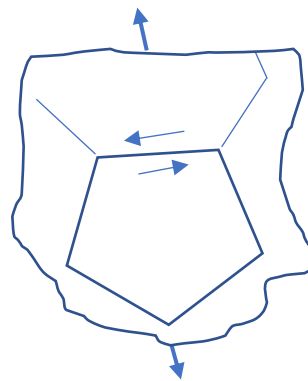


Fig. 32 Mecanismo de deslizamiento de fronteras de grano

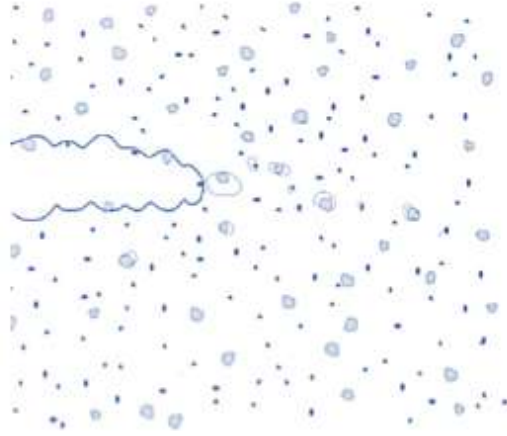


Fig. 33 Propagación de grieta por partículas de segunda fase [21]

El proceso de fatiga como mecanismo de fractura y propagación, como se observa en la fig. 34, es muy común que se presente en los metales, debido a que está expuesto a esfuerzos de tensión y/o compresión cíclicos y en ciertas aplicaciones bajo altas temperaturas de trabajo, la acción de los esfuerzos constantes da como resultado el endurecimiento del material por deformación, se acumulan dislocaciones haciendo que el material se endurezca en la superficie de contacto, se presenta rugosidad y esta deformación se va propagando por el interior y genera grietas en la superficie y si sigue la constante aplicación de fuerza el material termina fracturado.



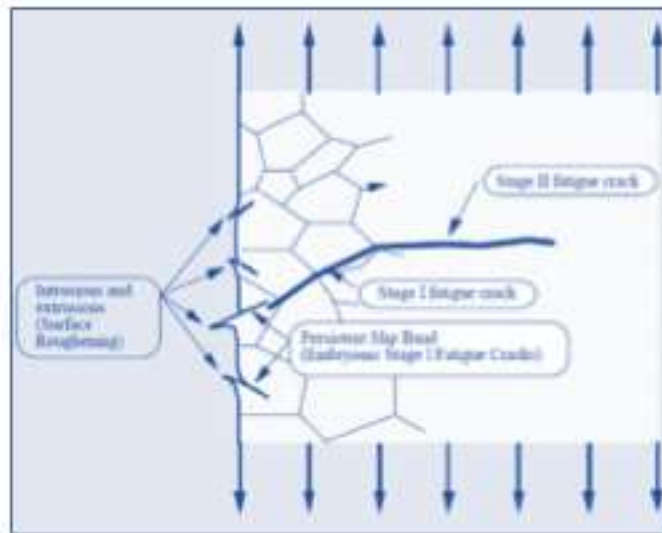


Fig. 34 Mecanismo de nucleación y propagación de grietas por fatiga [22].

## Capítulo III: Hipótesis y objetivos

### 3.1 Hipótesis

Las propiedades mecánicas del acero 22MnB5 serán determinadas por los cambios generados en la microestructura, debido al tratamiento térmico revenido, donde se obtendrá una microestructura mixta de martensita y ferrita la cual aumentará la resistencia a la cedencia y disminuirá la temperatura de transición dúctil-frágil.

### **3.2 Objetivo General**

Generar nuevo conocimiento acerca del comportamiento mecánico del material objeto de este estudio en las inmediaciones de su temperatura de transición dúctil-frágil, buscando correlacionar la habilidad de absorber energía de impacto con las mezclas de fases que resultan de los tratamientos térmicos orientados a obtener las propiedades mecánicas requeridas.

### **3.3 Objetivos Específicos**

3.3.1 Determinar la capacidad de absorción de energía de impacto para los distintos niveles de resistencia, que corresponden a distintas mezclas de fases en la microestructura y explorar correlaciones con fundamento fenomenológico.

3.3.2 Elucidar los modos y mecanismos de fractura para cada condición experimental.

3.3.3 Explorar correlaciones entre los modos de fractura, la microestructura, la energía de impacto, las propiedades mecánicas en cada condición experimental.

## **Capítulo IV: Metodología experimental**

Este capítulo describe detalladamente el procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo de esta tesis, así como el material utilizado, el método y el equipo en conjunto con las condiciones a las que fue el material expuesto, en cada una de las etapas de la

experimentación, como se presenta en el diagrama de bloques de la fig.35

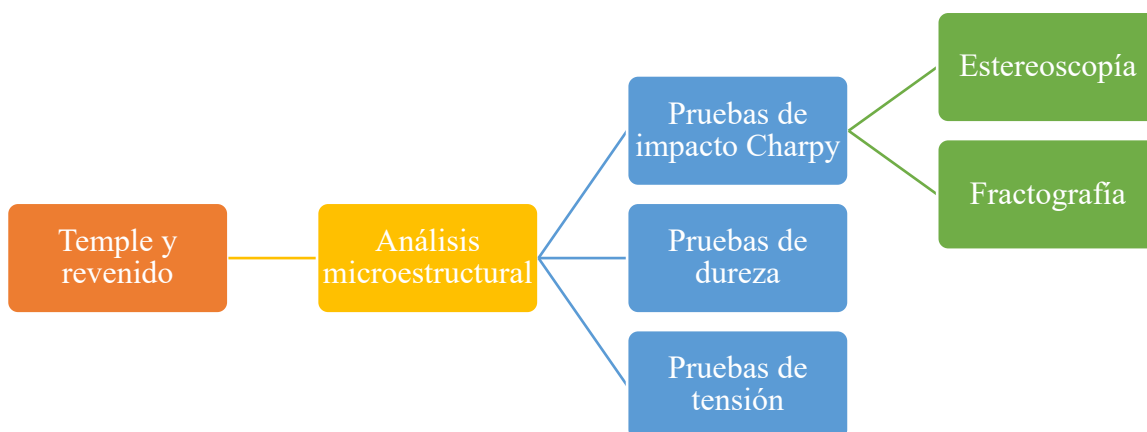


Fig. 35 Diagrama de bloques

#### 4.1 Obtención de la materia prima

El material utilizado para hacer los experimentos es un acero tipo 22MnB5, cuya composición química aproximada se muestra en la Tabla 3, el cual fue proporcionado por una empresa local, en dos condiciones, la primera en su estado immaculado y la segunda con un tratamiento térmico llamado temple con la finalidad de posteriormente realizarles un revenido con diferentes parámetros.

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B
22MnB5	0.25%	0.12%	1.15%	0.013%	0.002%	0%	0%	0.003%

Tabla 3: Composición química en porcentaje para el material objeto del estudio propuesto

El acero 22MnB5 es producido mediante una banda laminada en caliente en espesores nominales de 11 mm de ancho como se muestra en las figuras 36 y 37.



Fig. 36 Rollo de acero 22MnB5



Fig. 37 Bobina de acero laminada en rieles

El material se recibió en vigas de aproximadamente 1 metro de largo por 50 cm de ancho, como se puede observar en la fig. 38 el cual posteriormente se cortó con ayuda de una máquina tipo sierra cinta como la de la fig. 39, los cortes de las muestras se efectuaron en dirección transversal al sentido de rolado y las medidas fueron de 15 cm por 5 cm para facilitar la realización de los experimentos correspondientes como muestra la fig. 40.



Fig. 38



Fig. 39



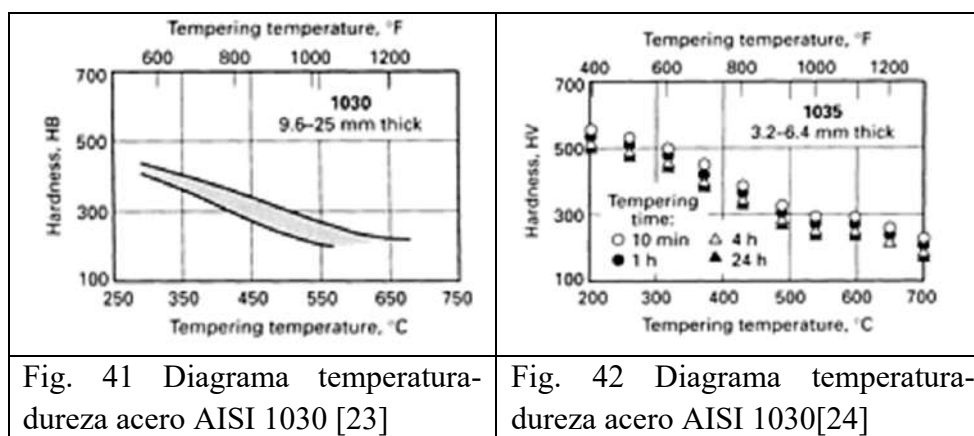
Fig. 40

## 4.2 Tratamientos térmicos

El acero 22MnB5, se recibió con un tratamiento de temple, en el cual se obtienen mezclas de martensita y bainita, estas dos últimas fases son inestables y muy frágiles, la combinación de inestabilidad dimensional y fragilidad da como resultado un aumento del agrietamiento por temple, esto provoca que los aceros templados no sean aptos para aplicaciones de ingeniería estructural.

Es la razón por la cual el acero 22MnB5 de este proyecto recibió un tratamiento térmico de revenido, con la finalidad de eliminar los cambios dimensionales e inducir tenacidad, o sea mejorar la resiliencia y la ductilidad.

Primeramente, se determinó teóricamente la temperatura de revenido aproximada a partir de un diagrama temperatura – dureza para un acero de medio carbono, como muestra la fig. 41, para estimar la temperatura adecuada del horno, ya que el diagrama no está disponible para el 22MnB5, se utilizaron los diagramas de aceros al carbón AISI 1030, como muestran las figs. 41 y 42, como referencia de la selección de temperatura de revenido, ya que poseen un contenido de carbono similar.



Después se determinó, también teóricamente, el tiempo necesario de inducción de calor de la muestra; para este cálculo se utilizó la regla universal del tiempo de remojo del tratamiento térmico para aceros al carbono, la cual hace la indicación de una hora por pulgada de espesor.

El tiempo y temperatura de revenido calculados fueron los siguientes:

- 1) 405°C por 5 minutos de tiempo de inducción de calor
- 2) 408°C por 8 minutos de tiempo de inducción de calor

Con la información previamente obtenida se procedió a realizar las pruebas piloto de tratamiento térmico experimental, se realizaron dos ensayos de revenido en horno de mufla, como muestran las figuras 43 y 44, se desarrollaron con parámetros de temperatura y tiempo diferentes.

Temperatura de revenido prueba #1: 405°C (dimensiones 15cm x 5cm)

Temperatura de revenido prueba #2: 408°C (dimensiones 15cm x 5cm)

Medio de enfriamiento: Aire

Temperatura del medio de enfriamiento: Temperatura ambiente



Fig. 43 Mufla, Modelo: FE-340, Serie: 1903073, Voltaje 120 V, Potencia: 1500W, Frecuencia: 60 Hz.



Fig. 44 Termopar tipo K utilizado para corroborar la temperatura de la mufla

La rampa de calentamiento del horno fue de 1 hora 23 minutos, el método de enfriamiento fue por aire a temperatura ambiente por 50 minutos, se recurrió al apoyo de un termopar tipo K, directo a la pieza, para poder corroborar la temperatura dentro de la mufla.

### 4.3 Preparación metalográfica

La preparación metalográfica es de suma importancia ya que nos ayuda a estudiar la constitución y estructura de los materiales, revelando así las propiedades que los materiales tienen, para revelar la microestructura de un material es necesario hacer la preparación metalográfica cuidadosamente; el acero 22MnB5 se preparó para su evaluación microestructural en tres estados:

- 1) En estado de rolado
- 2) En estado de temple y revenido 1 (5 minutos a 405 °C)
- 3) En estado de temple y revenido 2 (8 minutos a 408 °C)

Para obtener una excelente imagen de la microestructura, debemos tener una superficie plana y semipulida, para terminar con un pulido fino para después de realizar un ataque químico y así poder observarla al microscopio óptico, como se muestra en la fig.45

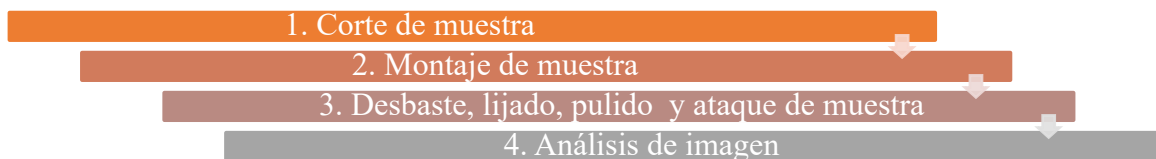


Fig. 45 Procedimiento paso a paso de la preparación metalográfica

#### Paso 1: Corte de muestra transversal al sentido de rolado

El corte metalográfico es uno de los pasos más importantes, en la preparación de muestras, cuando cortamos la pieza para conseguir la muestra que se quiere analizar, se debe asegurar que no se genere un calor excesivo, para realizar el corte de la muestra, se utilizó la cortadora marca Struers Labotom-5 como se muestra en la fig. 46 y el disco de corte de la misma marca, es importante observar que después de hacer el corte la superficie de la muestra haya quedado libre de daños térmicos y con una deformación mecánica insignificante, el tamaño de las muestras cortadas fue de 1 pulgada cuadrada.



Fig.46 Cortadora de materiales metálicos

## Paso 2: Montaje de muestras

Para el montaje se utilizó la montadora marca Bainmount mostrada en la figura 47, con la finalidad de obtener protección y soporte de la superficie de la muestra, así como facilitar el manejo de la muestra, se utilizó baquelita para encapsular la muestra.



Fig. 47 Montadora marca Bainmount

Parámetros utilizados:

Temperatura de calentamiento: 180°C | Tiempo de calentamiento: 10 min

Temperatura de enfriamiento: 30°C | Tiempo de enfriamiento: 5 min

## Paso 3: Desbaste, lijado, pulido y ataque químico

Este procedimiento de lijado y pulido es la parte de la preparación de la muestra que nos permite tener una superficie lo suficientemente lisa para hacer el análisis microscópico, para el lijado, se usaron lijas de carburo de silicio numeración 80, 180, 200, 320, 400, 500, 600, 800, 1200, 2400, y 4000 para el pulido de muestra se utilizó paño y el pulido final se realizó con suspensión de diamante de 3 y 1.5 micrómetros que permiten conseguir una buena planeza de la muestra.



Fig. 48 Pulidora marca struers



Fig. 49 Lijado de muestra



Finalmente cuando se tiene la superficie libre de rayas o, como coloquialmente se le dice, acabado espejo, se usa un reactivo químico, como se observa en la fig. 50 se utilizó nital al 5%, el cual es un reactivo muy común para el ataque de metales ferrosos, como se muestra en la fig. 51, por un tiempo de 5 segundos.



Fig. 50 Reactivos para preparar ataque químico



Fig. 51 Ataque químico de la muestra

#### **Paso 4: Análisis por microscopía óptica**

Para este paso se utilizó el microscopio óptico como se muestra en la fig. 52 el cual es un microscopio invertido para el análisis de la muestra, este se requiere debido a la opacidad de los metales y aleaciones, ya que opera con la luz reflejada del metal, el porcentaje de fases de las microestructuras obtenidas a través de microscopio óptico, se determinó de acuerdo al porcentaje de carbono que tiene la muestra y con tablas de ASTM.



Fig. 52 Análisis microestructural a través de microscopio óptico

#### 4.4 Prueba de dureza Rockwell C/B

Para medir la dureza de la superficie en las muestras en las cuales se realizó el tratamiento térmico temple, se recurrió a un durómetro Rockwell, como se muestra en la fig. 53.

Una prueba de dureza es un medio para determinar la resistencia a la penetración y también se puede llegar a emplear para obtener una aproximación rápida de la resistencia a la tensión, para lo cual existen tablas para la conversión de medidas de dureza de una escala a otra o para aproximar la resistencia a la tensión, que se encuentran en la norma SAEJ-417. Estos valores de conversión se han obtenido a partir de curvas generadas por computadora y se presentan con una precisión de 0.1 puntos para permitir una reproducción precisa de esas curvas.

El durómetro Rockwell es prácticamente una máquina que mide la dureza determinando la profundidad de penetración en la muestra bajo una carga de 150 Kg-f, el penetrador es simplemente una bola de acero de 1/16 de pulgada. El valor de la dureza como se lee en el dial es un número arbitrario que está relacionado a la profundidad de la indentación, el dial se pone a cero en la escala de cifras negras y se aplica la carga principal. Después se aplica y retira la carga principal, se toma la lectura mientras se aplica la carga menor todavía está en posición.

Todas las pruebas de dureza se realizaron de acuerdo con la norma ASTM- A 370 – 07a.



Fig. 53 Durómetro Wilson / Rockwell Modelo: B504-T, Serie: 83028904

## 4.5 Prueba de impacto Charpy

Este método de prueba de impacto se relaciona específicamente al comportamiento del acero cuando se somete a una sola aplicación de una fuerza, junto con altas tasas de carga y para el caso de este proyecto, a temperaturas subcero, es importante conocer cuál es su resistencia a la fractura frágil en condiciones de trabajo, para algunos materiales los resultados de las pruebas de impacto en especímenes con muescas en v, se ha encontrado que se puede predecir la probabilidad de fractura frágil. Todas las pruebas de impacto Charpy se realizaron de acuerdo con la norma ASTM – E23.

Las características esenciales de una prueba de impacto son: un adecuado espécimen como se muestra en la figura 54, las medidas que marca la norma, un conjunto de yunques y soportes de muestras en los que se realiza la prueba. Se coloca el espécimen para recibir el golpe de la masa en movimiento, la cual tiene suficiente energía para romper el espécimen, y un dispositivo para medir la energía absorbida por la muestra rota.

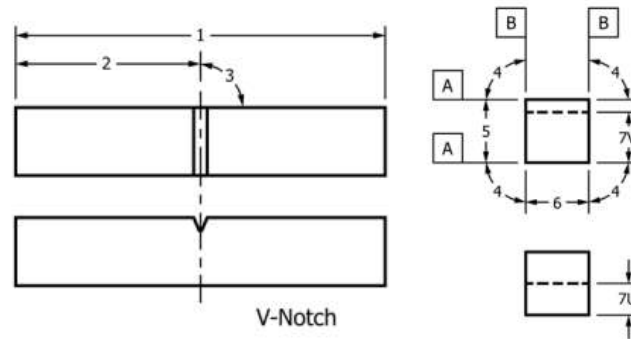


Fig. 54 Especímenes de prueba de impacto Charpy, muesca en V [25]

Tabla 4. Descripción de las dimensiones del espécimen para prueba de impacto Charpy [26]

Número	Descripción	Dimensiones	Tolerancia
1	Longitud de la muestra	75 mm	+0/-2.5mm
2	Muesca para arriba	28 mm	--
3	Longitud de la muesca al borde	90°	±2°
4	Ángulo de los lados adyacentes	90°	±0.17°
5	Ancho	10mm	±0.025mm
6	Espesor	10mm	±0.025mm
7	Longitud del ligamento	8mm	±0.025mm
8	Radio de la muesca	0.25mm	±0.025mm
9	Ángulo de la muesca	45°	±1°
A	Requisito de acabado superficial	2 µm (Ra)	≤
B	Requisito de acabado superficial	4 µm (Ra)	≤

Una prueba de impacto Charpy con muesca en V es una prueba en la que la muestra se golpea y se fractura con un solo golpe en una máquina de prueba especialmente diseñada, se obtienen valores de prueba como la energía absorbida, el porcentaje de fractura, la expansión lateral opuesta a la muesca, o una combinación de estos.



Fig. 55 Especímenes de prueba de impacto Charpy, muesca en V maquinadas.

Las temperaturas de prueba se enlistan en la tabla 5, de las tres condiciones fueron sometidas en una cámara criogénica para poder alcanzar las temperaturas deseadas

Tabla 5. Temperaturas de prueba

Condición	Temperatura °C											
	1 (Rolado)	25°C	0 °C	-20°C	-30 °C	-40 °C						
2 Temple y revenido (5min a 405 °C)	25°C	0 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C	-32 °C	-34°C	-35 °C	-36 °C	-38°C	-42°C
3 temple y revenido (8min a 408 °C)	25°C	0 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C						



Fig. 56 Péndulo probador de impacto de alta energía



Fig. 57 Cámara criogénica

## 4.6 Estereoscopia

Se recurrió al uso del estereoscopio, como se muestra en la fig. 58 después obtener todas y cada una de las muestras fracturadas de las pruebas de impacto Charpy para realizar estudios abarcando una mayor longitud de escala del tipo de fractura, la magnificación utilizada fue de 60x y fue de gran ayuda para poder separar las muestras de las que serían examinadas mediante el microscopio electrónico de barrido.

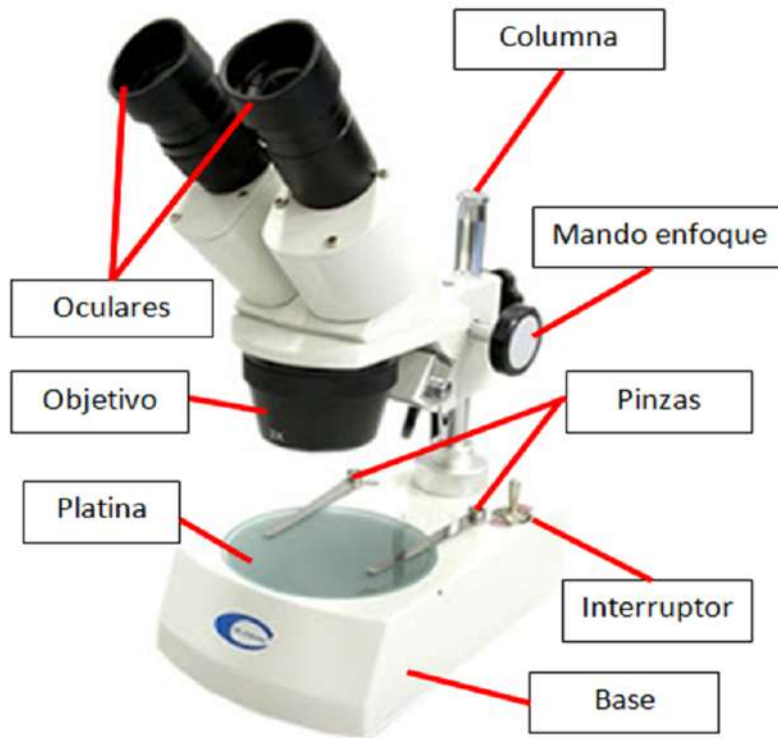


Fig. 58 Descripción de las partes del estereoscopio.

#### 4.7 Prueba de tensión

El ensayo de tensión básicamente consiste en someter una muestra maquinada del material en investigación, en este caso se sometieron tres probetas del material 22MnB5 con 3 réplicas de cada uno para promediar los resultados, a temperatura ambiente en tres condiciones diferentes, en la condición 1 de rolado, en la condición 2 de temple y revenido (405°C por 5 minutos), en la condición 3 de temple y revenido (408°C por 8 minutos) como se muestra en la fig. 59 estas bajo una carga medida suficiente para causar la ruptura, las propiedades resultantes se dan en términos relacionados a las pruebas de tensión, como la resistencia a la tensión, el límite elástico, el alargamiento y la reducción del área y ductilidad.

Todas las pruebas de tensión se realizaron de acuerdo con la norma ASTM- A 370 - 07a



Fig. 59 Probetas en diferente condición para ensayo de tensión maquinadas



Fig. 60 Máquina universal de ensayos

El material se cortó en dirección transversal del laminado y las medidas de los especímenes maquinados y ensayados fue de ancho: 11mm y longitud: 22 mm

## 4.8 Microscopía Electrónica de Barrido

El análisis fractográfico de las muestras previamente seleccionadas impactadas por medio de la prueba Charpy se observaron mediante microscopía electrónica de barrido, utilizando un microscopio marca Hitachi como se muestra en la figura 61, el cual escanea un haz de electrones muy finamente enfocado a través de la muestra en un patrón, las interacciones entre los electrones del haz y los átomos de muestra generan un flujo de señal en serie, que se correlaciona con la posición del haz para construir una imagen.



Fig. 61 Microscopio Electrónico de Barrido

El microscopio electrónico de barrido utiliza condiciones de vacío y usa electrones para poder formar una imagen, por lo cual se deben realizar preparaciones especiales para la muestra, las cuales se describen a continuación:

1. La muestra debe estar seca, se debe eliminar toda el agua de las muestras porque el agua se vaporizaría en el vacío.
2. Como el material que nosotros utilizamos pertenece a la familia de los metales y estos tiene propiedades conductoras, no requieren preparación como algún tipo de recubrimiento antes de ser utilizado.
3. Se debe cortar la muestra a una altura aproximada de 1 cm para que pueda ser introducida en el MEB como se muestra en la figura 65.
4. La muestra por precaución se debe pegar con cinta de cobre doble cara al porta muestras para evitar algún accidente ya estando adentro del microscopio.



Fig. 62 Cortadora para pequeñas muestras

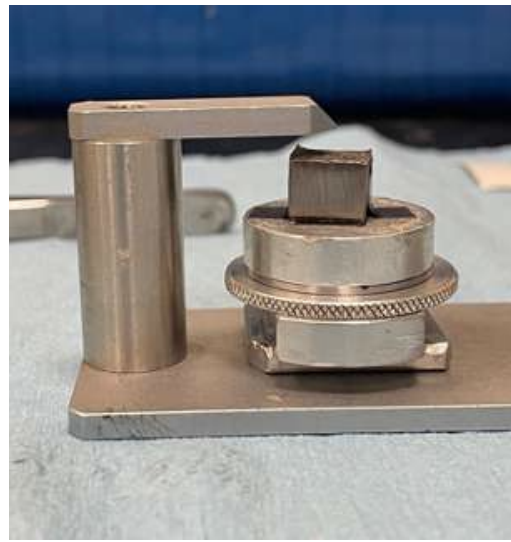


Fig. 63 Porta muestras para ingresar a MEB

5. El MEB cuenta con un software para poder visualizar las imágenes, en el cual se introducen manualmente los parámetros con los que se van a trabajar, para este proyecto se necesitaron 2 eV y con los controles se puede ir variando la magnificación y la intensidad del haz.

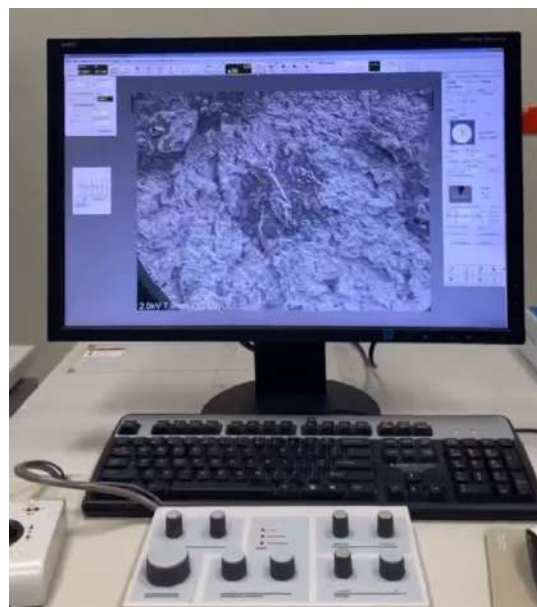


Fig. 64 Computadora para visualizar imágenes del MEB



## Capítulo V: Resultados y discusión

### 5.1 Evaluación microestructural

Empezaremos analizando la microestructura del acero 22MnB5 en la condición de rolado tal como se recibió y se muestra en la figura 65, esta microestructura está compuesta principalmente por una matriz de ferrita de color claro con perlita de color oscuro, los granos en esta microestructura se alargan a lo largo de la dirección de laminación, este acomodo es comúnmente conocido como estructura de bandas, en las primeras 0.040" se observa, matriz ferrítica, con 34% de perlita media en bandas, perlita fina.

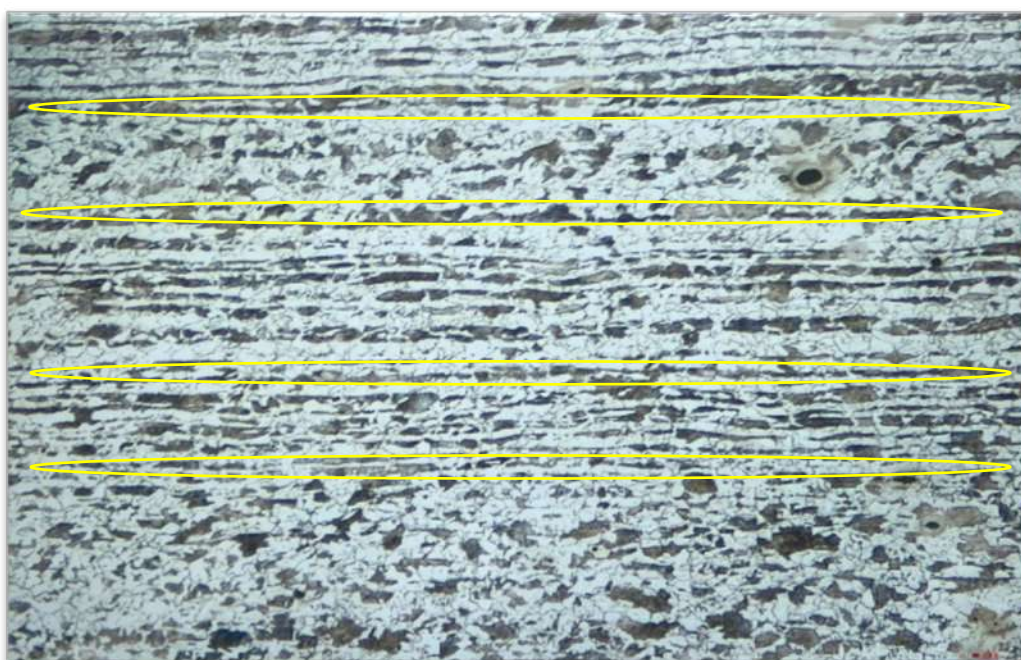


Fig. 65 Microestructura 22MnB5 condición 1 (rolado), 100x,

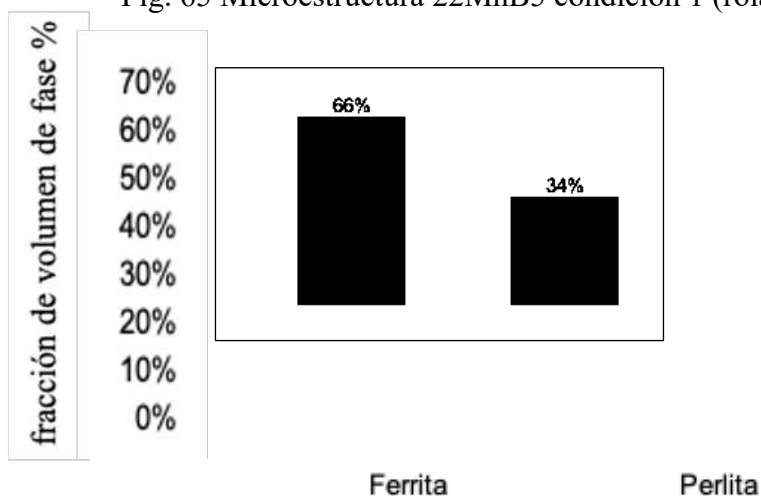


Fig. 66 Fracción de volumen de fase de ferrita-pearlita de acero 22MnB5

La microestructura del acero 22MnB5 en la condición 2, se muestra en la figura 67, esta microestructura corresponde al primer tratamiento térmico que se realizó, revenido por 5 minutos a 405°C, está compuesta principalmente por una matriz de martensítica, con un 82% de transformación de fases y se observan trazas de ferrita libre.

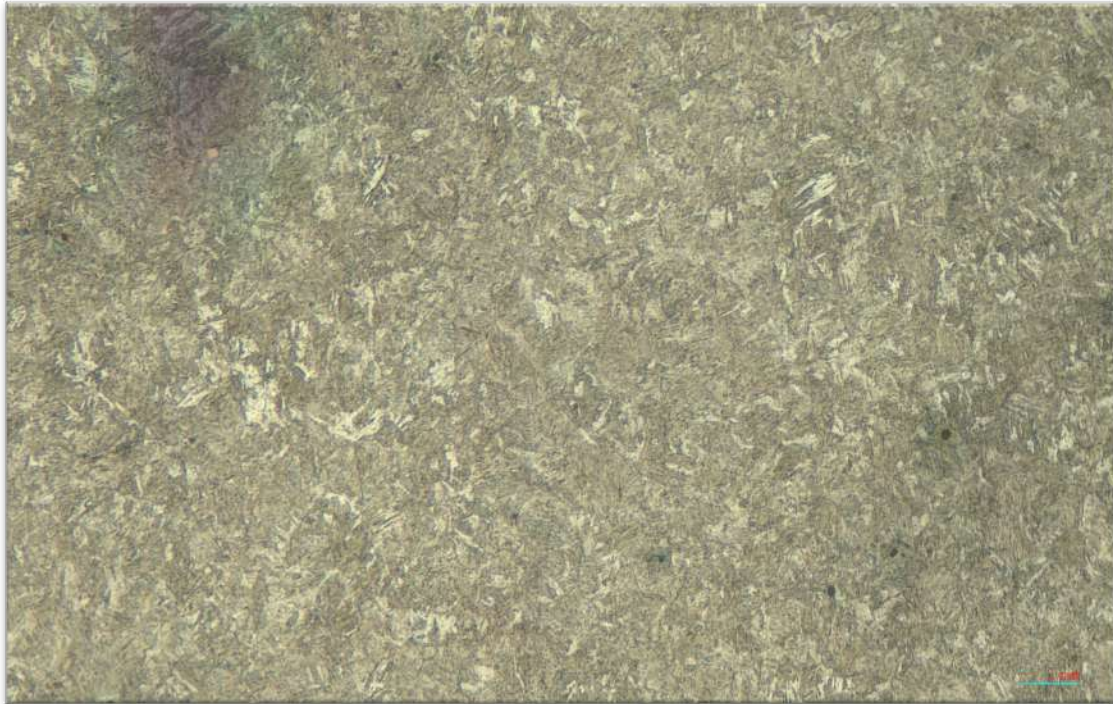


Fig. 67 Microestructura 22MnB5 condición 2 (Temple y revenido 405°C), 100x

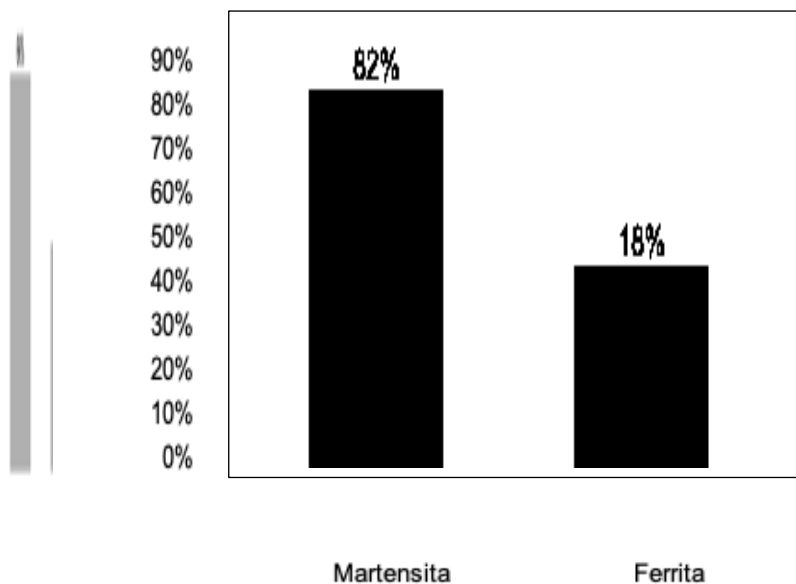


Fig.68 Fracción de volumen de fase de martensita y ferrita de acero 22MnB5

La microestructura del acero 22MnB5 en la condición 3, se muestra en la figura 69, esta microestructura corresponde al segundo tratamiento térmico que se realizó, revenido por 8 minutos a 408°C está compuesta principalmente por una matriz de martensítica, con un 85-15% de transformación de fases y se observan trazas de ferrita libre.



Fig. 69 Microestructura 22MnB5 condición 3 (Temple y revenido 408°C), 100x

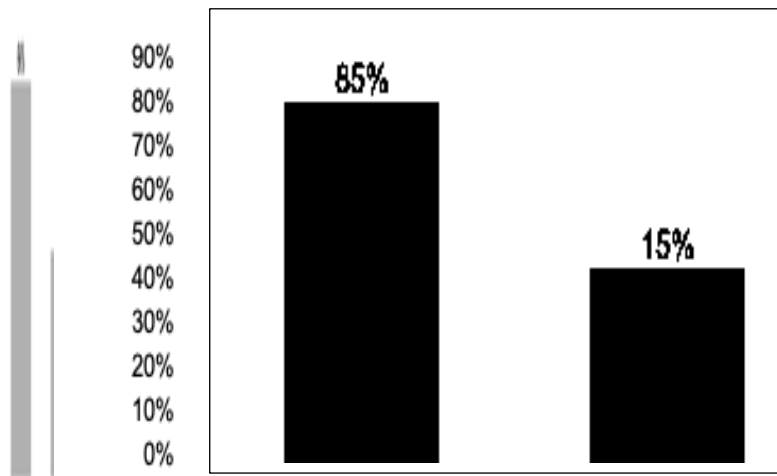


Fig.70 Fracción de volumen de fase de martensita y ferrita de acero 22MnB5

Dado que la deformación se produce mediante el movimiento de las dislocaciones, para fortalecer el acero se debe limitar el movimiento de las dislocaciones, una forma de limitar su movimiento es introducir más dislocaciones, para que no puedan moverse unos a través de otros.

El enfriamiento para formar martensita aumentó enormemente el número de dislocaciones, lo que explica en parte por qué la martensita es tan dura, también el refinamiento del grano significa muchos más límites para impedir el movimiento de dislocación.

Todo esto es significativo porque la austenita y la martensita/ferrita tienen una estructura atómica diferente que afecta cómo se mueven las dislocaciones a través del material. La austenita es una estructura atómica "cúbica centrada en las caras" (FCC) mientras la ferrita tiene una estructura "cúbica centrada en el cuerpo" (BCC) y la martensita es "tetragonal centrada en el cuerpo" (BCT), que es similar a BCC, pero está distorsionada por átomos de carbono atrapados entre los átomos de hierro.

Las dislocaciones viajan a lo largo de "planos compactos" de átomos, que son los planos de los átomos que están más estrechamente empaquetados. FCC tiene muchos planos compactos, mientras que BCC y BCT no tienen planos compactos "verdaderos":

Debido a que la martensita no tiene un plano realmente compacto, existe un componente térmico en el movimiento de dislocación. Es necesaria cierta temperatura para alimentar energía al movimiento atómico y permitir el movimiento de las dislocaciones. Con los planos compactos de la austenita, el movimiento de dislocación depende mucho menos de una contribución térmica. Por lo tanto, a medida que se reduce la temperatura, las dislocaciones son menos capaces de moverse, lo que dificulta la deformación, lo que aumenta el límite elástico del material. Esto conduce a una alta sensibilidad del límite elástico a la temperatura.

La adición de manganeso provoca la promoción de otro tipo de movimiento de dislocación llamado "deslizamiento cruzado". El deslizamiento cruzado es el movimiento de dislocaciones de un plano a otro, la promoción del deslizamiento cruzado por el manganeso significa que el límite elástico es menos sensible a la temperatura, que es lo que mejora la tenacidad y reduce la temperatura de transición dúctil frágil.

## 5.2 Pruebas mecánicas de dureza

La prueba de dureza se llevó a cabo a temperatura ambiente en las 3 condiciones de prueba del acero 22MnB5, la gráfica de la fig. 71 resume los valores medios de dureza, condición de rolado mostró el valor de dureza de 170 Vickers, (85.2 HRB) la condición de 2 de revenido 405°C exhibió un valor de dureza de 400 Vickers (39.9 HRC) y la condición de 3 de revenido 408°C exhibió un valor de dureza de 370 Vickers (37.5 HRC).

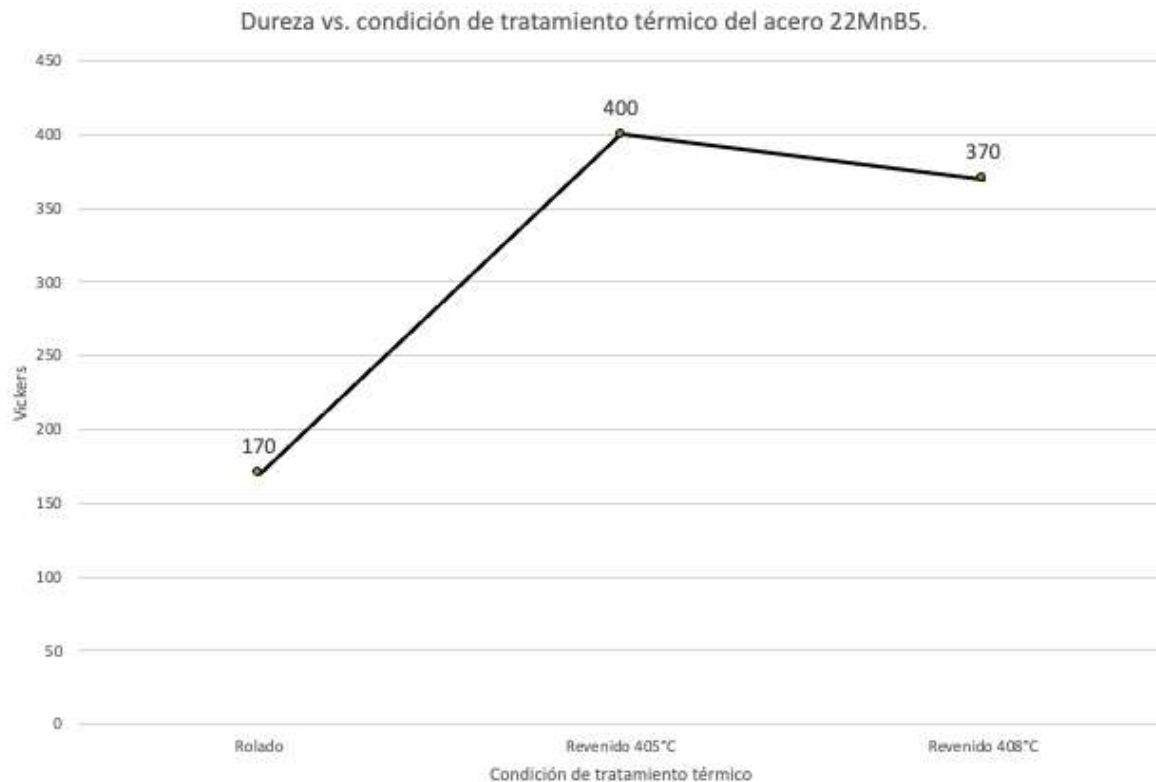


Fig.71 Gráfica de resultados de dureza

Una mayor resistencia y dureza significan una menor tenacidad, esperaríamos que el acero a bajas temperaturas tuviera menor tenacidad que el acero a temperatura ambiente y esto puede resultar preocupante tomando en cuenta que los componentes se van a utilizar durante el invierno, especialmente en los climas del norte. Sin embargo, esto no siempre es una reducción gradual de la tenacidad con una temperatura más baja; en los aceros martensíticos como en este caso hay una fuerte reducción de la tenacidad por debajo de una temperatura determinada.

### 5.3 Resistencia al impacto 22MnB5

Debido a que la caída de la tenacidad es gradual, puede resultar difícil identificar una única temperatura de transición.

En la gráfica que muestra la fig. 72 se presentan los valores ya promediados de la resistencia al impacto con entalla en V Charpy medidos para las tres condiciones del acero 22MnB5 estudiados.

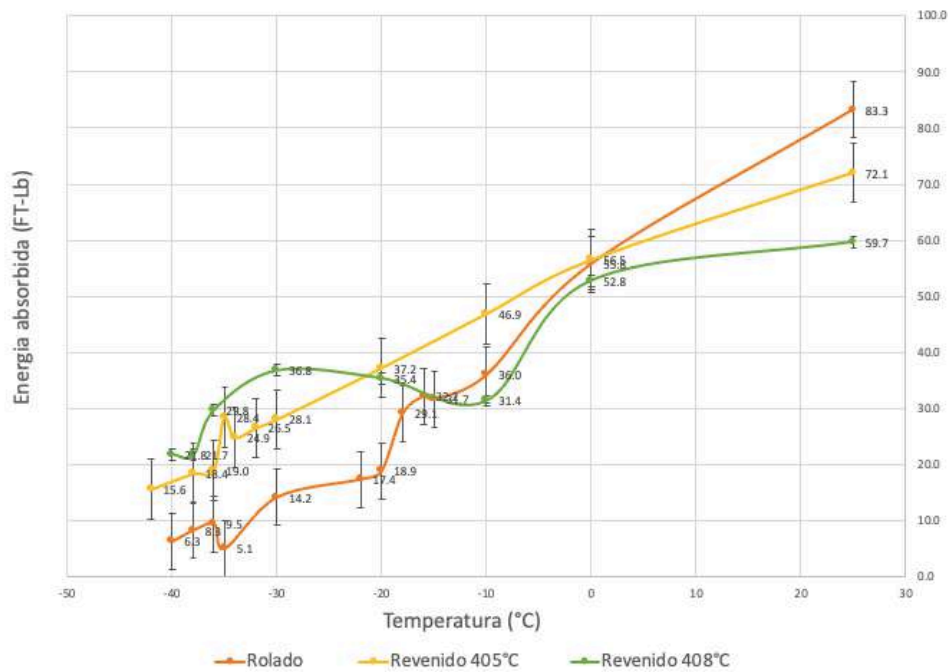


Fig. 72 Gráfica que describe el comportamiento de impacto de las tres condiciones estudiadas

Tabla 6. Desviación estándar por condición

Desviación estandar	Condición
22.39	Rolado
17.72	Revenido 405°C
13.67	Revenido 408°C

Tabla 7: Valores promedio de tenacidad del acero en diferentes condiciones ensayado en un rango de temperatura de 25 ÷ -42°C

Acero 22MnB5	Temperatura de revenido (°C)	Valores de resistencia al impacto Charpy (ft-lb) medidos a diferentes temperaturas																
		25°C	0°C	-10°C	-15°C	-16°C	-18°C	-20°C	-22°C	-30°C	-32°C	-34°C	-35°C	-36°C	-37°C	-38°C	-40°C	-42°C
Condición 1	--	83.3	55.8	36	31.7	32.2	29.1	18.9	17.4	14.2	-	-	5.1	9.5	-	8.3	6.3	-
Condición 2	405°C	72.1	56.5	46.9	-	-	-	37.2	-	28.1	26.5	24.9	28.4	19	-	18.4	-	15.6
Condición 3	408°C	59.7	52.8	31.4	-	-	-	35.4	-	36.8	-	-	-	29.8	-	21.7	21.8	-

Se observa un cambio decreciente en la tenacidad en las tres condiciones de la temperatura ambiente a 0°C de 55.8, 56.5 y 52.8 ft•lb (75.65, 76.60, 71.58 Joules) se reduce a valores aún más pequeños a temperaturas negativas.

La distribución diversa de los componentes de la estructura ferrítico-perlítica que se tiene en la condición 1 que es sin ningún tiempo de tratamiento térmico, provoca diferencias en la resistencia al impacto

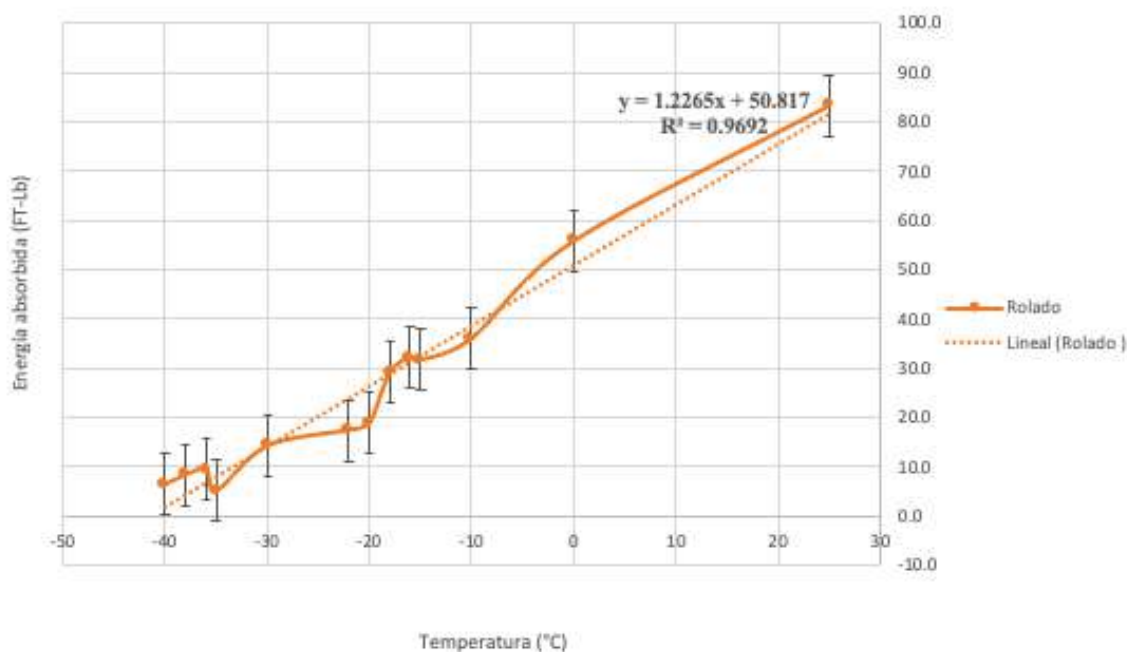


Fig. 73 Gráfica que describe el comportamiento de impacto en condición de rolado

Se puede definir la transición de dúctil a frágil en los aceros analizados: en la condición 1 por debajo de -20°C, en la condición 2 por debajo de -36°C y en la condición 3 por debajo de -37°C, los valores obtenidos de tenacidad en este tipo de pruebas, determinan la transición de fractura dúctil a fractura frágil, aunque se aceptan de manera diferente según cada estándar, es común para los aceros estructurales, una cantidad igual a 35 J/cm<sup>2</sup>

La resistencia al impacto de los aceros ensayados después del temple y revenido muestra valores relativamente altos a temperatura ambiente y los valores disminuyen lentamente al disminuir la temperatura, pero se puede notar una anomalía en la condición 3 en las pruebas a  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $-30^{\circ}\text{C}$  la energía de absorción aumenta y puede ser debido a la temperatura ambiente del laboratorio donde se llevaron a cabo las pruebas ya que fue en tiempo de verano donde la temperatura llega hasta los  $40^{\circ}\text{C}$  en la ciudad de Monterrey.

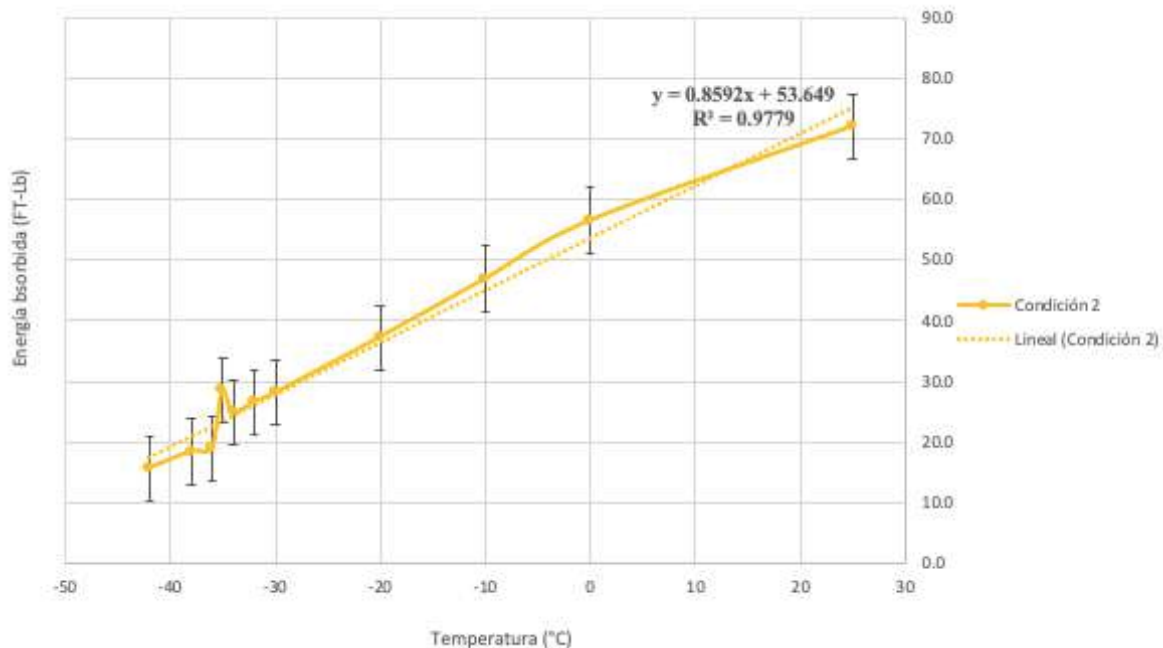


Fig. 74 Gráfica que describe el comportamiento de impacto condición 2

Como se puede observar en la gráfica de la fig. 74 a medida que disminuye la temperatura, aumenta la fractura frágil, disminuyendo la ductilidad proporcionalmente, la caída de propiedades se observa entre  $-35^{\circ}\text{C}$  y  $-38^{\circ}\text{C}$ , por lo tanto, se determina que la transición dúctil-frágil a la temperatura es  $-36^{\circ}\text{C}$ , a medida que la temperatura disminuye, la resistencia al impacto también disminuye y por tanto a la absorción de energía.

A temperaturas más bajas a partir de  $-35^{\circ}\text{C}$ , los valores de resistencia al impacto para la condición 1, se reducen hasta llegar a  $5.1 \text{ ft}\cdot\text{lb}$  ( $6.92 \text{ Joules}$ )



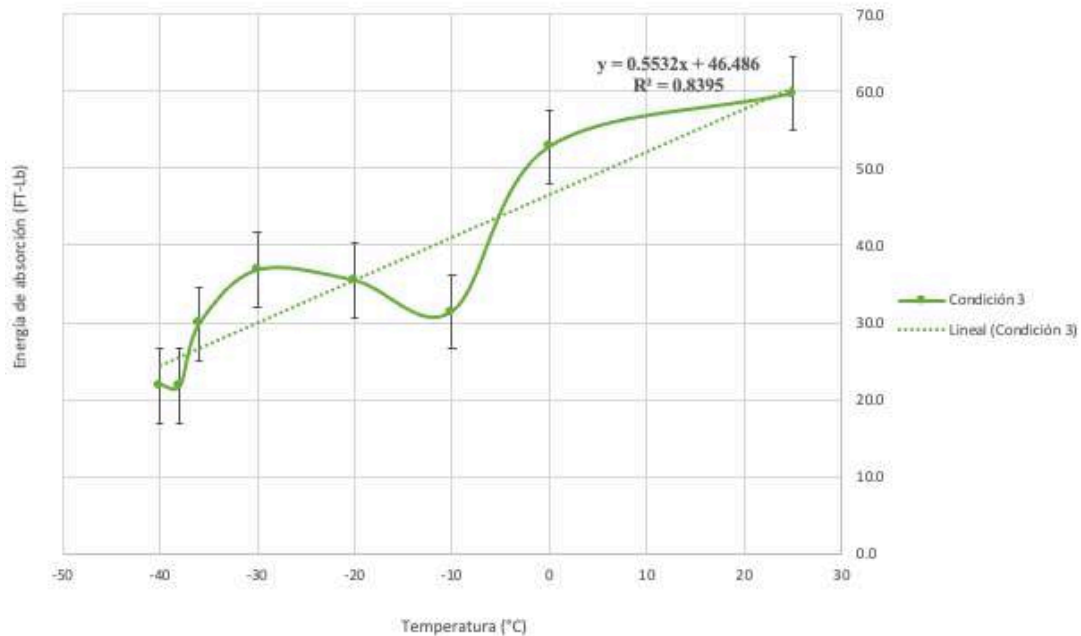


Fig. 75 Gráfica que describe el comportamiento de impacto condición 3

Como se puede observar en la gráfica de la fig. 75 a medida que disminuye la temperatura, aumenta la fractura frágil, disminuyendo la ductilidad proporcionalmente, la caída de propiedades se observa en dos puntos el primero en  $-10^{\circ}\text{C}$ , pero no se puede determinar que sea la temperatura de transición dúctil-frágil, debido a que a medida que la temperatura disminuye, se nota otra caída en  $-38^{\circ}\text{C}$ .

Hay muchos factores que pueden cambiar la temperatura de transición, si queremos que la temperatura sea lo más baja posible para maximizar la tenacidad a temperatura ambiente pero también para aumentar la tenacidad a temperatura fría, la dureza que aportan elementos como el Carbono es un factor importante como se describe, pero hay muchas otras variables a tener en cuenta como las impurezas comunes de azufre y fósforo reducen la resistencia a la fractura del acero y reducen su tenacidad.

La gran cantidad de granos pequeños aumenta la resistencia a la fractura ya que cuando una grieta crece a través del acero, cada vez que encuentra un límite de grano, la grieta tiene que reiniciarse y, por lo tanto, muchos granos pequeños significan que la fractura es más difícil de esparcirse.

La fragilidad de martensita templada disminuye la tenacidad a temperatura ambiente pero también empeora la tenacidad a baja temperatura. De hecho, a una temperatura suficientemente alta, la tenacidad del acero con y sin martensita templada es similar. Sin embargo, la temperatura de transición se ha incrementado porque la resistencia a la fractura se ha reducido debido a las placas de cementita que se vuelven quebradizas.

## 5.4 Pruebas mecánicas de tensión

La resistencia a la tensión ( $R_m$ ) se muestran en la gráfica de la fig. 79, en función del tratamiento térmico y en condición de rolado, se puede apreciar un significativo aumento del  $R_m$  si comparamos el valor en condición de rolado y después del revenido, la mayor resistencia a la tensión del acero ocurre después del temple a 405°C, el valor promedio es igual a 1247 MPa, el parámetro  $R_m$  se mantiene alto después del revenido a 1247°C y 1168°C, sin embargo, entre más aumenta la temperatura del tratamiento térmico se va reduciendo la resistencia a la tensión.

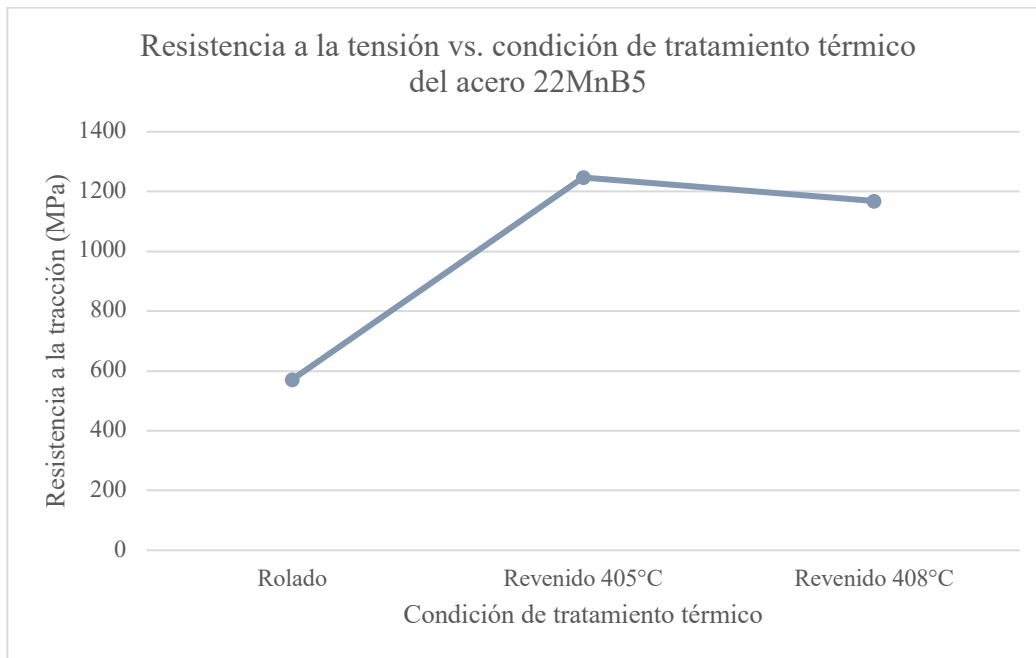


Fig.76 gráfica resultados de la resistencia a la tensión en las 3 condiciones estudiadas

Tratamiento térmico		
Rolado	Revenido 405°C	Revenido 408°C
$R_m$ (MPa)		
571	1247	1168

Tabla 8: Resultados de la resistencia a la tensión

El límite elástico ( $\sigma_{ys}$ ) del acero aumenta a medida que el acero se enfría. Otro parámetro de importancia es la resistencia a la fractura ( $\sigma_f$ ), o la tensión necesaria para que crezca una grieta. La resistencia a la fractura se ve menos afectada por la temperatura que el límite elástico. Por lo tanto, con una reducción de la temperatura el límite elástico aumenta mientras que la resistencia a la fractura es prácticamente la misma. La temperatura a la que el límite elástico es mayor que la resistencia a la fractura es el punto en el que la fractura es "más fácil" que la deformación.

## 5.5 Fractografía de muestras de impacto

Partiendo con las pruebas de la condición 1 de rolado, del acero tipo 22MnB5 a la temperatura de prueba 30°C, se obtuvo información relevante, podemos observar en la figura 76, la fractura a gran escala, un tipo de propagación de grieta súbita, se puede decir que es una fractura típica de estos ensayos de impacto, el corte que se ve en los extremos se puede asociar a una capa superficial de martensita y también en el centro de la muestra se pueden observar grietas predominantes.

Para la condición 2, la cual el tipo de propagación de grieta es la misma, sin embargo, no se aprecian cavidades tan marcadas, aunque si se logra apreciar pequeñas fisuras.



Fig. 77 Espectroscopia de fractura condición 1

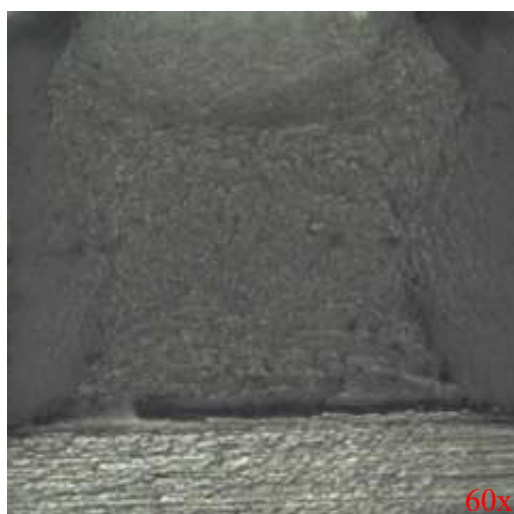


Fig. 78 Espectroscopia de fractura condición 2



Fig. 79 Espectroscopia de fractura condición 2

### 5.6.1 Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura -18°C

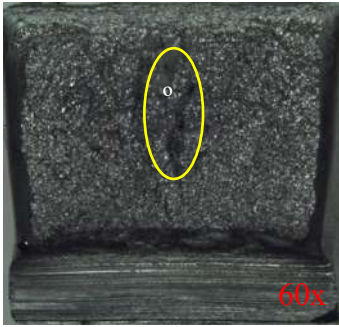


Fig. 80 Vista macroscópica de la fractura, 22MnB5, -18°C, condición 1.

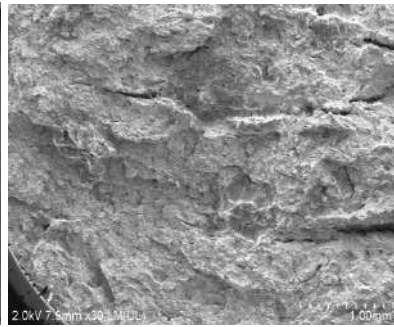


Fig. 81 Fractura frágil en la zona central, 22MnB5, -18°C. SEM, condición 1.

La tenacidad del acero 22MnB5 a una temperatura de -18°C fue igual a 29.1 ft•lb (39.45 Joules) como se observa en la fig. 80 la superficie de fractura del acero muestra un carácter frágil pero también se puede observar un pequeño porcentaje de ductilidad (92% de la superficie total de fractura).

### 5.6.2 Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura -20°C

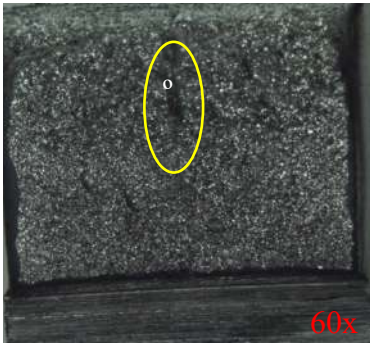


Fig. 82 Vista macroscópica de la fractura, 22MnB5, -20°C, condición 1.

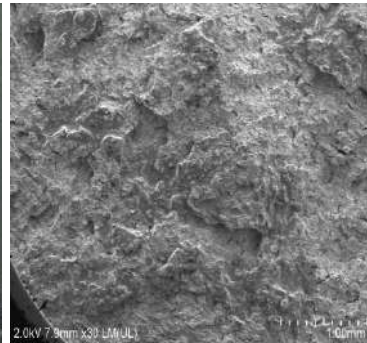


Fig. 83 Fractura frágil en la zona central, 22MnB5, -20°C. SEM, condición 1.

Se puede observar en las figuras 82, y 83 la vista macroscópica de la fractura, los círculos amarillos señalan la fractura frágil típica que ocurre en la zona central de la muestra, las zonas laterales muy estrechas indican ductilidad; significa que este acero se caracteriza por una baja resistencia a la iniciación de grietas.

### 5.6.3 Condición 1 rolado | A 22MnB5 | temperatura -22°C

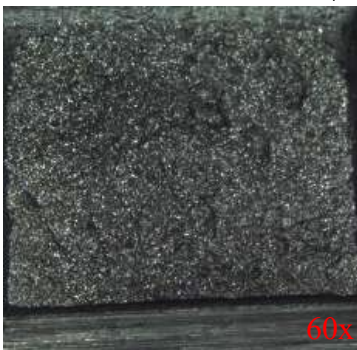


Fig. 84 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -22°C, condición 1.



Fig. 85 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -22°C. SEM, condición 1.

La tenacidad del acero 22MnB5 a una temperatura de -20°C y -22 fue igual a 18.9 y 17.4 ft•lb (25.62 y 23.59 Joules) respectivamente las superficies de fractura que muestra la fig. 84 del acero muestran un carácter frágil pero también se puede observar un pequeño porcentaje de ductilidad.

#### 5.6.4 Condición 2 Revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura -35°C

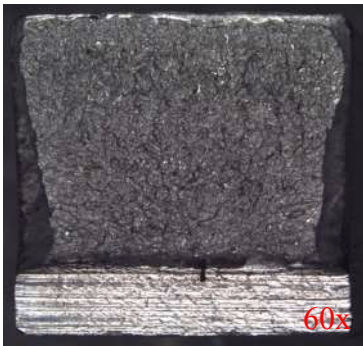


Fig. 86 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -35°C, condición 2.

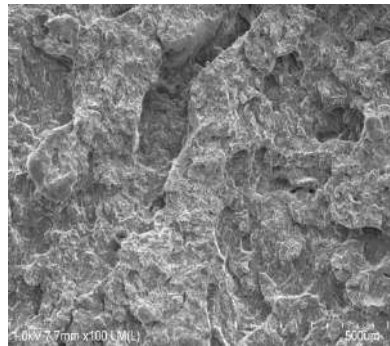


Fig. 87 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -35°C. SEM, condición 2.

La tenacidad del acero 22MnB5 después del revenido a una temperatura de -35°C fue igual a 28.4 ft•lb (38.50 Joules) la superficie de fractura que muestra la fig. 86 del acero muestra un carácter frágil pero también se puede observar un porcentaje de ductilidad.

#### 5.6.5 Condición 2 Revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura -36°C

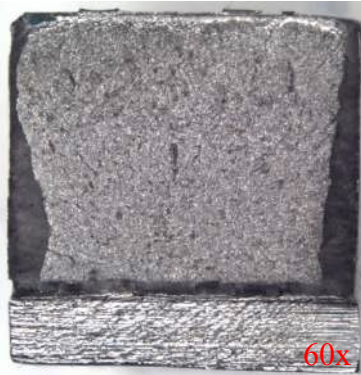


Fig. 88 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -36°C, condición 2.

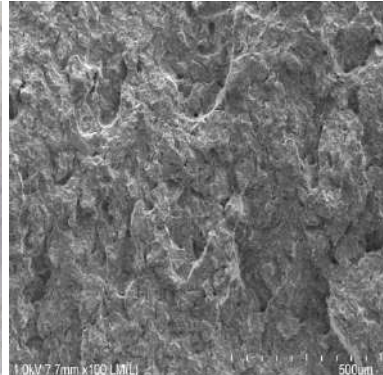


Fig. 89 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -36°C. SEM, condición 2.

La tenacidad del acero 22MnB5 después del revenido a una temperatura de -36°C fue igual a 19 ft•lb y 17.4 ft•lb (25.76 y 17.4 Joules) las superficies de fractura que se observan en la fig.88 del acero muestran un carácter frágil pero también se puede observar un pequeño porcentaje de ductilidad.

#### 5.6.6 Condición 2 Revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura -38°C

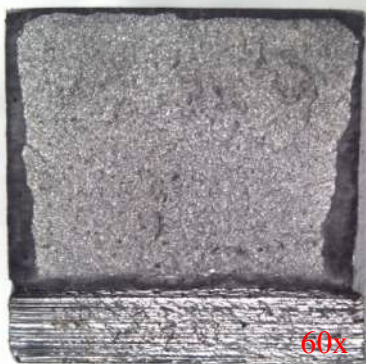


Fig. 90 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -38°C, condición 2.

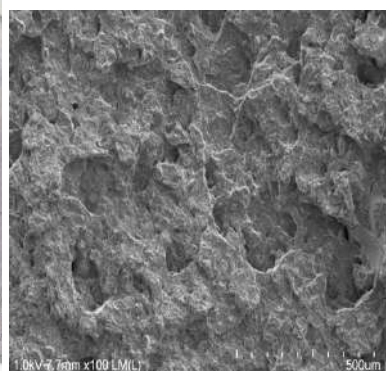


Fig. 91 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -38°C. SEM, condición 2.

La tenacidad del acero 22MnB5 después del revenido a una temperatura de -38°C fue igual a 18.4 ft•lb (24.94 Joules) las superficies de fractura que muestran las figuras 90 y 91 del acero muestran un carácter frágil pero también se puede observar un pequeño porcentaje de ductilidad.

### 5.6.7 Condición 3 Revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura -36°C



Fig. 92 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -36°C, condición 3.

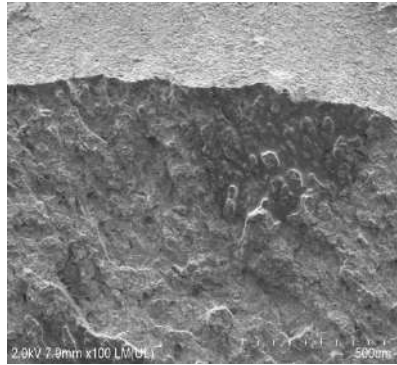


Fig. 93 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -36°C. SEM, condición 3.

La tenacidad del acero 22MnB5 después del revenido a una temperatura de -36°C fue igual a 29.8 ft•lb (40.40 Joules) como se puede observar en la fig. 92, la superficie de fractura del acero muestra un carácter frágil pero también se puede observar un porcentaje de ductilidad.

### 5.6.8 Condición 3 Revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura -38°C



Fig. 94 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -38°C, condición 3.

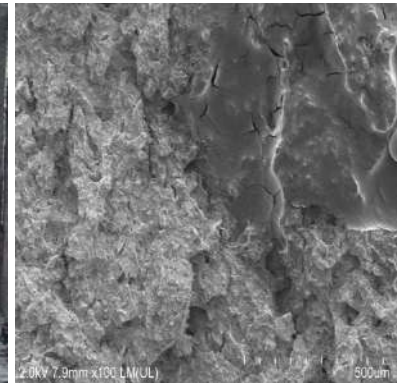


Fig. 95 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -38°C. SEM, condición 3.

En la fig. 94 se observa fractura por clivaje con facetas parcialmente deformadas y áreas de fractura dúctil, ese tipo de fractura permite obtener valores relativamente altos de tenacidad en esas temperaturas negativas en las muestras tratadas térmicamente.

### 5.6.9 Condición 3 Revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura -40°C

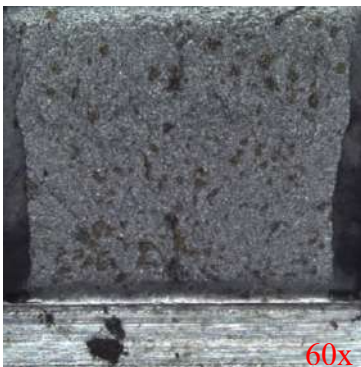


Fig. 96 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -40°C, condición 3.

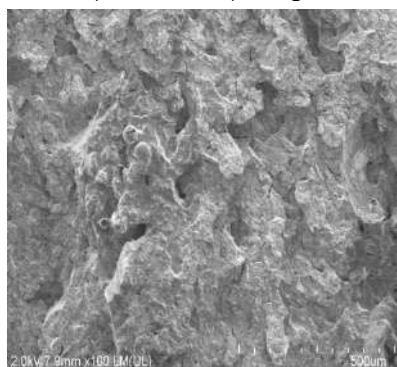


Fig. 97 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -40°C. SEM, condición 3.

La tenacidad del acero 22MnB5 después del revenido a una temperatura de -38°C y de -40°C fue igual a 21.7 y 21.8 ft•lb (29.42 y 29.55 Joules) como se observa en la fig. 96 la superficie de fractura del acero muestran un carácter frágil pero también se puede observar un pequeño porcentaje de ductilidad.

## Capítulo VI: Conclusiones

Debido a que el acero 22MnB5 es utilizado en la fabricación de componentes automotrices, que están sujetos a cargas dinámicas, es de vital importancia conocer cuál es su resistencia a la fractura frágil en las condiciones de trabajo a temperaturas subcero, obtener un acero de alta resistencia puede provocar una ductilidad insuficiente, es por ello que es de suma importancia para ciertas aplicaciones de los materiales tener suficiente resistencia al agrietamiento por fragilidad y obtener una temperatura de transición segura de dúctil a fractura por fragilidad.

De esta investigación, los resultados pueden ser de gran utilidad para la industria, ya que a pesar de que se obtuvieron valores bastante altos de la resistencia al impacto Charpy, se puede observar un agrietamiento frágil.

El acero 22MnB5 después del temple y revenido muestra una estructura de martensita templada, y sin tratamiento térmico presenta una estructura de bandas.

Los valores promedio de la resistencia al impacto con la distribución diversa de los componentes de la estructura (perlita y ferrita) en el estado de entrega provocan diferencias significativas en la resistencia al impacto de los aceros.

En esta investigación, se puede apreciar una resistencia significativamente menor al agrietamiento por fragilidad del acero en el estado de rolado en comparación con el estado después del endurecimiento y revenido a temperaturas subcero, los aceros después del tratamiento térmico retienen suficientes valores de tenacidad y suficiente resistencia a la fractura frágil hasta temperaturas de alrededor de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Los parámetros de resistencia a la tensión del acero 22MnB5, son relativamente bajos en la condición de rolado, mientras que los valores más altos de este parámetro se obtienen después del tratamiento temple a  $405^{\circ}\text{C}$  y  $408^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Los mecanismos de nucleación y propagación de grietas para el acero 22MnB5, el cual en estado rolado se comporta de forma dúctil hasta la temperatura  $-18^{\circ}\text{C}$  y después del temple y revenido, de forma frágil a partir de los  $-36^{\circ}\text{C}$ , en todas las condiciones podemos observar cavidades que son característicos de una fractura dúctil.

Existen formas de mejorar la tenacidad a bajas temperaturas. Una forma es minimizar el contenido de carbono, especialmente para una dureza determinada. Para empezar, utilizar un acero que tenga una mayor tenacidad (mayor resistencia a la fractura) también conducirá a una mayor tenacidad a bajas temperaturas. Comprar acero con mínimas impurezas también ayuda a mejorar la tenacidad a bajas temperaturas.

## Referencias

- [1] Barajas Aguilar, García Lara, Camporredondo Saucedo, Tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz (2016), <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos>
- [2] Perez Ipiña, Transición dúctil frágil de aceros ferríticos, (2007) <http://materiales-sam.org.ar>
- [3] S. Pallaspuro, On the Factors Affecting the Ductile-Brittle Transition in As-Quenched fully and Partially Martensitic Low-Carbon Steels, no. May. 2018.
- [4] Sociedad Histórica del Titanic, 1963.
- [5] Marine Technology, CANMET Laboratories, Ottawa, 1992.
- [6] Ashby, Michael; Hugh Shercliff; David Cebon (2007). Materiales: ingeniería, ciencia, procesamiento y diseño (1ª ed.). Butterworth-Heinemann.
- [7] William D. Callister, David G. Rethwisch. Ciencia e Ingeniería de Materiales: Introducción 9ª Edición, Wiley; 9a edición (4 de diciembre de 2013)
- [8] Nunez, Guralnick, Erber (2015) Revista Ingeniería de la construcción.
- [9] Effect of Structure of Boron Steels on Their Resistance to Brittle Fracture, Dr. Eng, Frydman, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 2011.
- [10] Effect of Structure of Boron Steels on Their Resistance to Brittle Fracture, page 12, Dr. Eng, Frydman, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 2011.
- [11] Properties of Boron Steel after Different Heat Treatments, page 12 Dr. Eng. Frydman, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 2012.
- [12] Properties of Boron Steel after Different Heat Treatments, page 72, Dr. Eng. Frydman, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 2012.
- [13] Properties of Boron Steel after Different Heat Treatments, page 73 Dr. Eng. Frydman, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 2012.
- [14] Effect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristics of Low Carbon Steel, page 11, Mohamed El-Shennawy, Department of mechanical engineering, Helwan University, Cairo, Egypt, 2016.



[15] Effect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristics of Low Carbon Steel, page 12, Mohamed El-Shennawy, Department of mechanical engineering, Helwan University, Cairo, Egypt, 2016.

[16] Influence of Boron Content on the Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation Kinetics of Bainitic Steels, K.F. Rodríguez-Galeano, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2016

[17] Damage prediction of hot stamped boron steel 22MnB5 with a microscopic motivated ductile fracture criterion, experiment and simulation, Bingtao Tang, International Journal of Mechanical Sciences, 2019.

[18] Numerical modeling of ductile fracture of hot stamped 22MnB5 boron steel parts in three-point bending, Bingtao Tang, International Journal of Mechanical Sciences, 2020.

[19] Cracks and Fracture, K Bertram Broberg, Academic Press, 1999.

[20] F. V. Lawrence, Mechanisms of Fatigue Crack Initiation and Growth.

[21] Morris Jr, J. W. “The influence of grain size on the mechanical properties of steel.” (2001).

[22] Roberts, G A, and Robert A. Cary. *Tool Steels*. Beachwood, Ohio: American Society for Metals, 1980.

[23] ASTM E 23-12c, “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” Standards, vol. i, pp. 1–25, 2013.

[24] ASTM E 23-12c, “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” Standards, vol. i, pp. 1–25, 2013.

[25] Andreiev A, Grydin O, Schaper M. Evolution of Microstructure and Properties of Steel 22MnB5 due to Short conversion tenitization with Subsequent Quenching. *Steel Res Int* 2016;87:1733–41,

- [26] Wayman, M. L., P. Dumoulin, and M. Guttman. "On the Role of Molybdenum in Preventing Temper Embrittlement." *Canadian Metallurgical Quarterly* 16, no. 1 (1977): 57-60.
- [27] Jean-Hubert Schmitta, Thierry Lung, New developments of advanced high-strength steels for automotive applications, *C. R. Physique*, 19, (2018) 641-656
- [28] Estimation of Impact Toughness Transition Temperatures of As-quenched Steels, *Mater. Sci. Forum*, vol. 941 MSF, no. December, pp. 498–503, 2018.
- [29] M. Emami, M. Askari-Paykani, E. Farabi, H. Beladi, and H. R. Shahverdi (2019), "Development of New Third-Generation Medium Manganese Advanced High-Strength Steels Elaborating Hot- Rolling and Intercritical Annealing", *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 9, pp. 4261-4274.
- [30] P.D. Deeley, K.J.A. Kundig, *Review of Metallurgical Applications of Boron Steels*, Shield alloy Corporation, Newfield, New Jersey.
- [31] Stefan Golling, Rickard Östlund, Mats Oldenburg, Characterization of ductile fracture properties of quench- hardenable boron steel: Influence of microstructure and processing conditions, *Materials Science and Engineering: A*, Available online 5 February 2016.
- [32] M. Naderi, M. Ketabchi, M. Abbasi, W. Bleck<sup>b</sup>, Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Different High Strength Carbon Steels after Hot Samping, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 211, Issue 6, 1 June 2011, Pages 1117–1125.
- [33] Hu ML, Xuan FZ, Wang GZ. Effect of microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior in a Steam Turbine Rotor Steel. *Mater Sci Eng, A* 2009; 515: 85-92.
- [34] Merklein M, Wieland M, Lechner M, Bruschi S, Ghiotti A. Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: a review. *J Mater Process Technol* 2016;228:11–24,
- [35] Hu K, Zhou S, Han R, Gao J, Yang Y. Microstructure Evolution and Simulation in 22MnB5 Steel During Hot Stamping. *J Mater Sci Chem Eng* 2018;06:9–14,
- [36] Hoke, J. H., P. G. Mabus, and G. N. Goller. "Mechanical properties of stainless steels at subzero temperatures." *Metal Progress* 55 (1949): 643.
- [37] Armstrong, T., and L. Warner. "Low-Temperature Transition of Normalized Carbon-Manganese Steels." In *Symposium on Impact Testing*. ASTM International, 1956.

[38] Standard, A. S. T. M. "E23-09: Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials." *Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA*(2009).

[39] Schwartzbart, H., and J. P. Sheehan. *The effects of carbon, phosphorous, and alloy contents on the notched bar impact properties of quenched and tempered steels*. No. IITRI-TR-39. IIT RESEARCH INST CHICAGO IL, 1953.

## Lista de figuras y tablas

### Capítulo I: Introducción

Fig. 1 Diagrama clásico de aceros avanzados

Fig. 2 Diagrama de temperatura de transición dúctil-frágil

Fig. 3 El Titanic en construcción en el astillero de Harland and Wolff en Irlanda

Tabla 1. Composición química del acero de la estructura del Titanic

### Capítulo II: Estado del arte

Fig.4 Tipos de fractura: (a) fractura dúctil, (b) fractura mixta, (c) fractura frágil

Fig.5 Modos de fractura: (a) modo I apertura, (b) modo II deslizamiento, (c) modo III desgarro

Fig. 6 (a) fractura intergranular, (b) fractura transgranular

Fig. 7 (a) Microestructura B27

Fig. 8 (b) Microestructura 28MCB5

Tabla 2. Valores medios de tenacidad de los aceros ensayados en un rango de temperatura de  $20 \div -40^{\circ}\text{C}$ .

Fig. 9 (a) Microestructura acero B27, estado de entrega (b) normalizado

Fig. 10 (c) Microestructura acero B27, templado (d) templado y revenido  $200^{\circ}\text{C}$

Fig. 11 (c) Microestructura acero B27, templado y revenido  $400^{\circ}\text{C}$

(d) templado y revenido  $600^{\circ}\text{C}$

Fig. 12 Microestructura 0.0003%B

Fig. 13 Microestructura 0.005%B

Fig. 14 Microestructura 0.007%B

Fig. 15 Microestructura 0.02%B

Fig. 16 Histograma de Dureza Vickers

Fig. 17 Resistencia a la tensión del acero con diferente % B

Fig. 18 Comportamiento de impacto frente al contenido de %B

Fig. 19 SEM de áreas de fractura generadas por la prueba de impacto

Fig. 20 Los lugares de fractura construidos optimizados con las deformaciones de fractura

a) Calculado por método híbrido; b) calculado por el método DIC (GOM ARIMIS)

Fig. 21 Dos lugares de fractura de acero al boro templado 22MnB5 construidos en las coordenadas de las tensiones principales.

Fig. 22 Límite elástico vs diferentes condiciones de tratamiento térmico

Fig. 23 Mapa de resistencia a la tensión en función de la temperatura de mantenimiento y el método de tratamiento térmico

Fig. 24 Elongación vs diferentes condiciones de tratamiento térmico

Fig. 25 Dureza vs diferentes condiciones de tratamiento térmico

Fig. 26 El lugar de fractura construido basado en la deformación de fractura calculada en varios estados de tensión

- Fig. 27 Lugar de fractura construido en el espacio de deformación principal de ( $\epsilon_I$ ,  $\epsilon_{II}$ ,  $\epsilon_{III}$ )
- Fig. 28 Lugar geométrico de la fractura construido en el espacio principal de tensión 3D de ( $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$ ,  $\sigma_{III}$ )
- Fig. 29 Mecanismo de apilación
- Fig. 30 Mecanismo intersección
- Fig. 31 Mecanismo de incompatibilidad elástica
- Fig. 32 Mecanismo de deslizamiento de fronteras de grano
- Fig. 33 Propagación de grieta por partículas de segunda fase
- Fig. 34 Mecanismo de nucleación y propagación de grietas por fatiga

#### **Capítulo IV: Metodología experimental**

- Fig. 35 Diagrama de bloques
- Tabla 3: Composición química nominal en porcentaje para el material objeto del estudio propuesto
- Fig. 36 Rollo de acero 22MnB5
- Fig. 37 Bobina de acero laminada en rieles
- Fig. 38 Recepción de material 22MnB5 en forma de viga
- Fig. 39 Cortadora sierra cinta
- Fig. 40 Muestras cortadas para experimentación posterior
- Fig. 41 Diagrama temperatura-dureza acero AISI 1030
- Fig. 42 Diagrama temperatura-dureza acero AISI 1030
- Fig. 43 Mufla, Modelo: FE-340, Serie: 1903073, Voltaje 120 V, Potencia: 1500W, Frecuencia: 60 Hz.
- Fig. 44 Termopar tipo K utilizado para corroborar la temperatura de la mufla
- Fig. 45 Procedimiento paso a paso de la preparación metalografica
- Fig.46 Cortadora de materiales metálicos
- Fig. 47 Montadora marca bainmount
- Fig. 48 Pulidora marca struers
- Fig. 49 Lijado de muestra
- Fig. 50 Reactivos para preparar ataque químico
- Fig. 51 Ataque químico de la muestra
- Fig. 52 Análisis microestructural a través de microscopio óptico
- Fig. 53 Durómetro Wilson / Rockwell Modelo: B504-T, Serie: 83028904
- Fig. 54 Especímenes de prueba de impacto Charpy, muesca en V Tabla 4. Descripción de las dimensiones del espécimen para prueba de impacto Charpy
- Tabla 4. Descripción de las dimensiones del espécimen para prueba de impacto Charpy
- Fig. 55 Especímenes de prueba de impacto Charpy, muesca en V maquinadas
- Tabla 5. Temperaturas de prueba
- Fig. 56 Péndulo probador de impacto

- Fig. 57 Cámara criogénica de alta energía
- Fig. 58 Descripción de las partes del estereoscopio
- Fig. 59 Probetas en diferente condición para ensayo de tensión maquinadas
- Fig. 60 Máquina universal de ensayo
- Fig. 61 Microscopio Electrónico de Barrido
- Fig. 62 Cortadora para pequeñas muestras
- Fig. 63 Porta muestras para ingresar a MEB
- Fig. 64 Computadora para visualizar imágenes del MEB

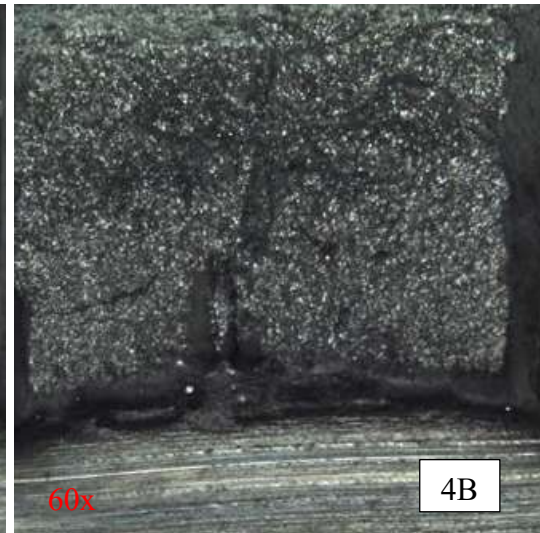
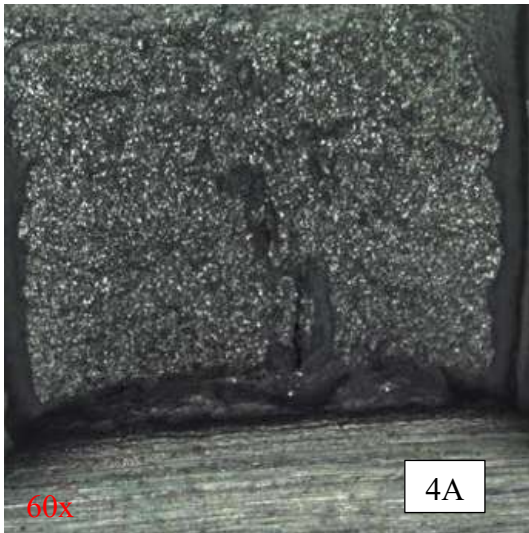
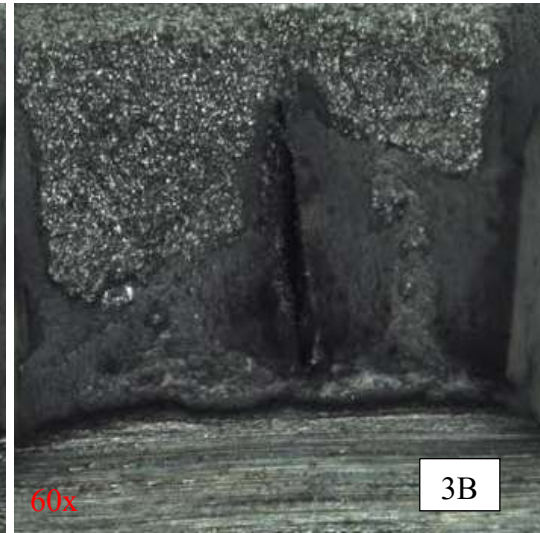
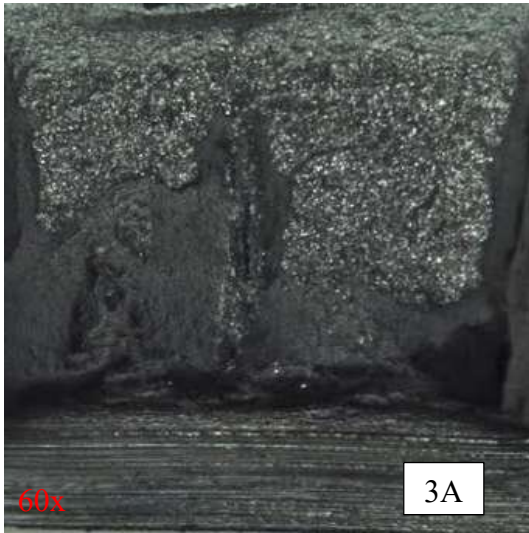
## **Capítulo V: Resultados y discusión**

- Fig. 65 Microestructura 22MnB5 condición 1 (rolado), 100x
- Fig. 66 Fracción de volumen de fase de ferrita-perlita de acero 22MnB5
- Fig. 67 Microestructura 22MnB5 condición 2 (Temple y revenido 405°C), 100x
- Fig. 68 Fracción de volumen de fase de martensita y ferrita de acero 22MnB5
- Fig. 69 Microestructura 22MnB5 condición 3 (Temple y revenido 408°C), 100x
- Fig. 70 Fracción de volumen de fase de martensita y ferrita de acero 22MnB5
- Fig. 71 Gráfica de resultados de dureza
- Fig. 72 Gráfica que describe el comportamiento de impacto de las tres condiciones estudiadas
- Tabla 6. Desviación estándar por condición
- Tabla 7: Valores promedio de tenacidad del acero en diferentes condiciones ensayado en un rango de temperatura de 25 ÷ -42°C.
- Fig. 73 Gráfica que describe el comportamiento de impacto en condición de rolado
- Fig. 74 Gráfica que describe el comportamiento de impacto condición 2
- Fig. 75 Gráfica que describe el comportamiento de impacto condición 3
- Fig. 76 Espectroscopia de fractura condición 1
- Fig. 77 Espectroscopia de fractura condición 2
- Fig. 78 Espectroscopia de fractura condición 2
- Fig. 79 gráfica resultados de la resistencia a la tensión en las 3 condiciones estudiantes
- Tabla 8: Resultados de la resistencia a la tensión
- Fig. 80 Vista macroscópica de la fractura, 22MnB5, -18°C, condición 1
- Fig. 81 Fractura frágil en la zona central, 22MnB5, -18°C. SEM, condición 1
- Fig. 82 Vista macroscópica de la fractura, 22MnB5, -20°C, condición 1
- Fig. 83 Fractura frágil en la zona central, 22MnB5, -20°C. SEM, condición 1
- Fig. 84 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -22°C, condición 1
- Fig. 85 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -22°C. SEM, condición 1
- Fig. 86 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -35°C, condición 2
- Fig. 87 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -35°C. SEM, condición 2
- Fig. 88 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -36°C, condición 2
- Fig. 89 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -36°C. SEM, condición 2

- Fig. 90 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -38°C, condición 2
- Fig. 91 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -38°C. SEM, condición 2
- Fig. 92 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -36°C, condición 3
- Fig. 93 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -36°C. SEM, condición 3
- Fig. 94 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -38°C, condición 3
- Fig. 95 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -38°C. SEM, condición 3
- Fig. 96 Vista macroscópica de la fractura 22MnB5, -40°C, condición 3
- Fig. 97 Fractura frágil en la zona central 22MnB5, -40°C. SEM, condición 3

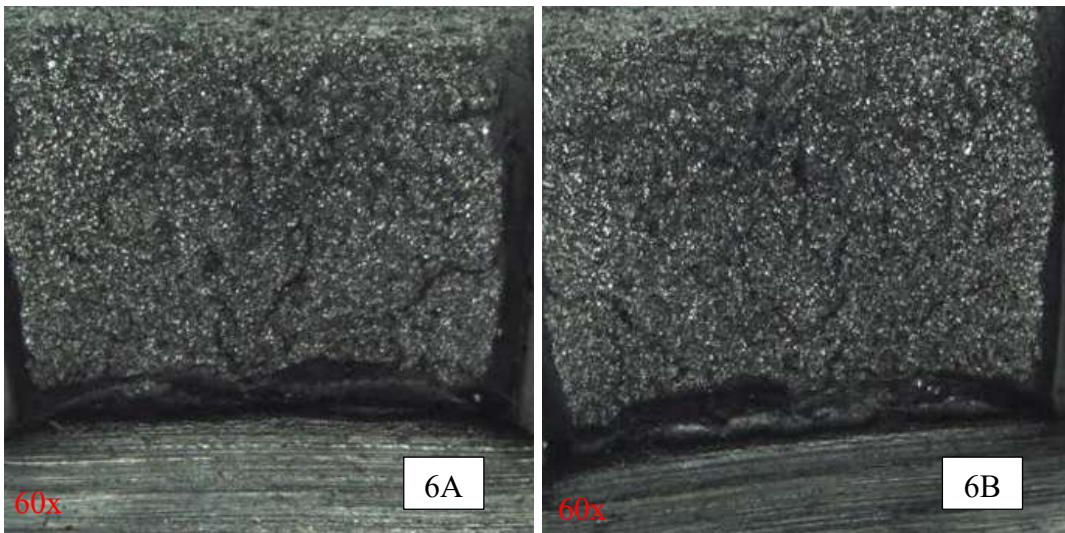
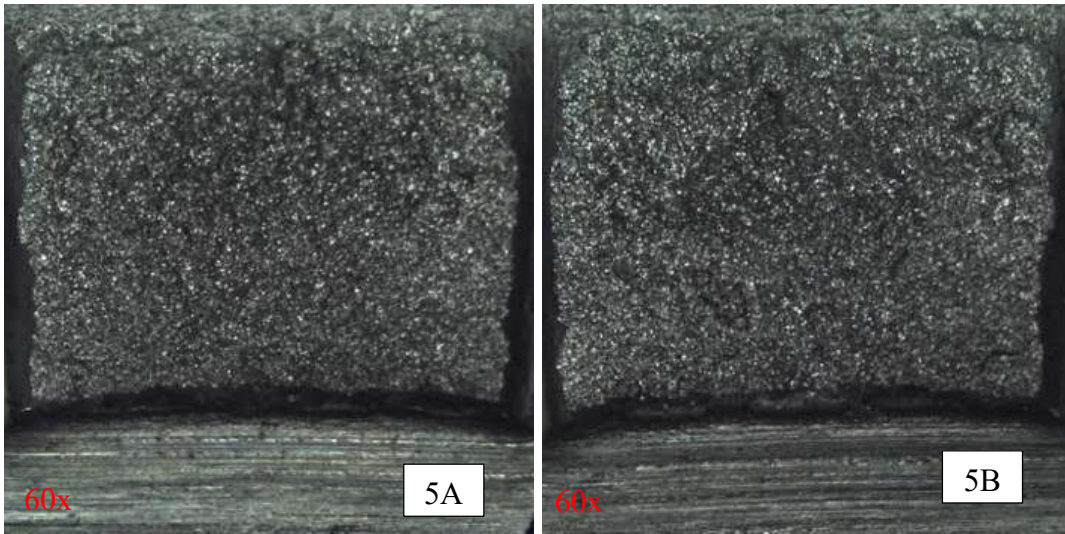
## Anexo

Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba 0°C

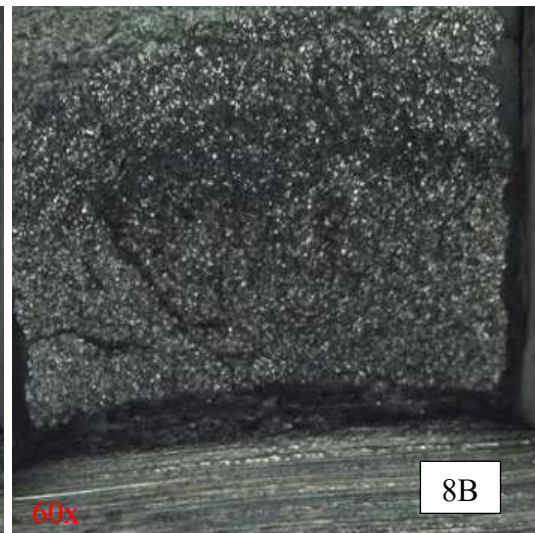
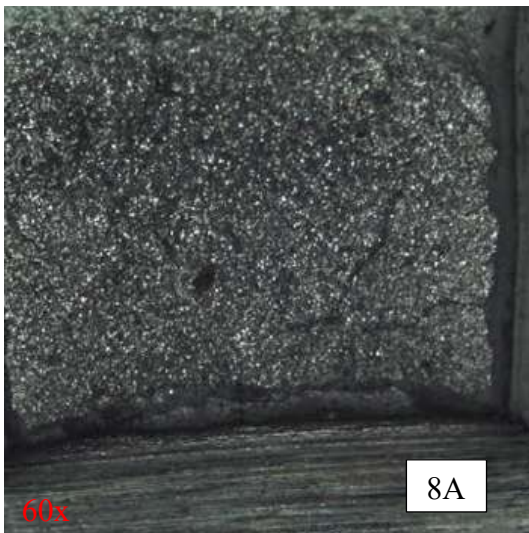
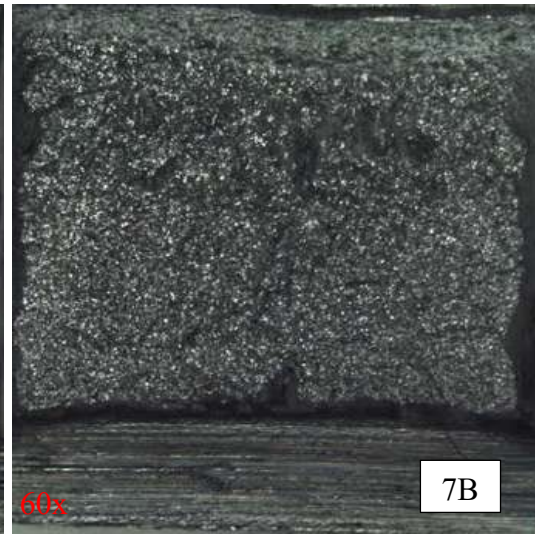
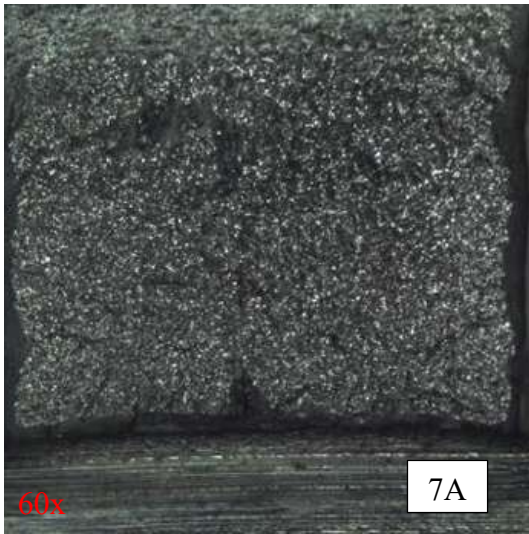




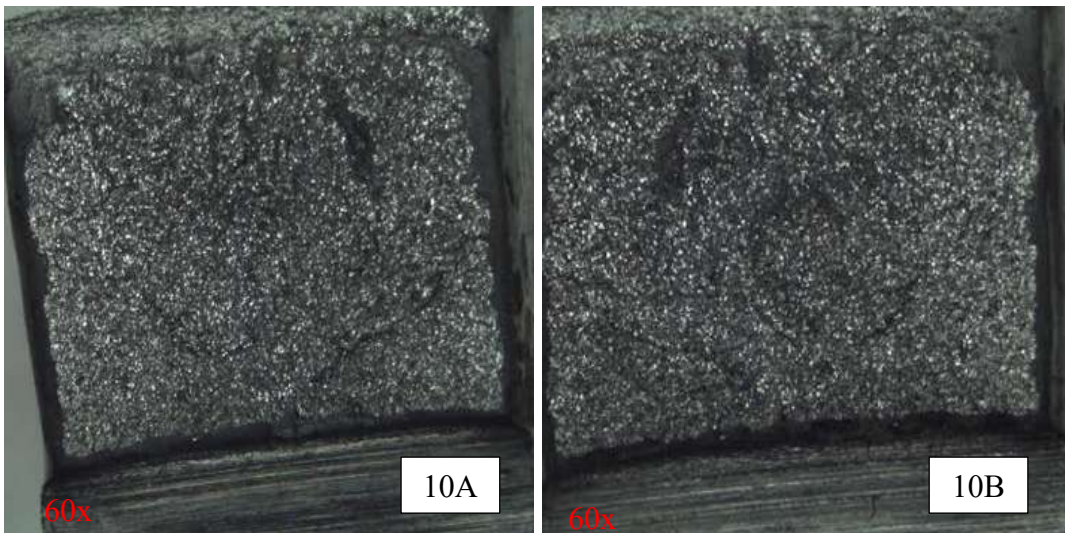
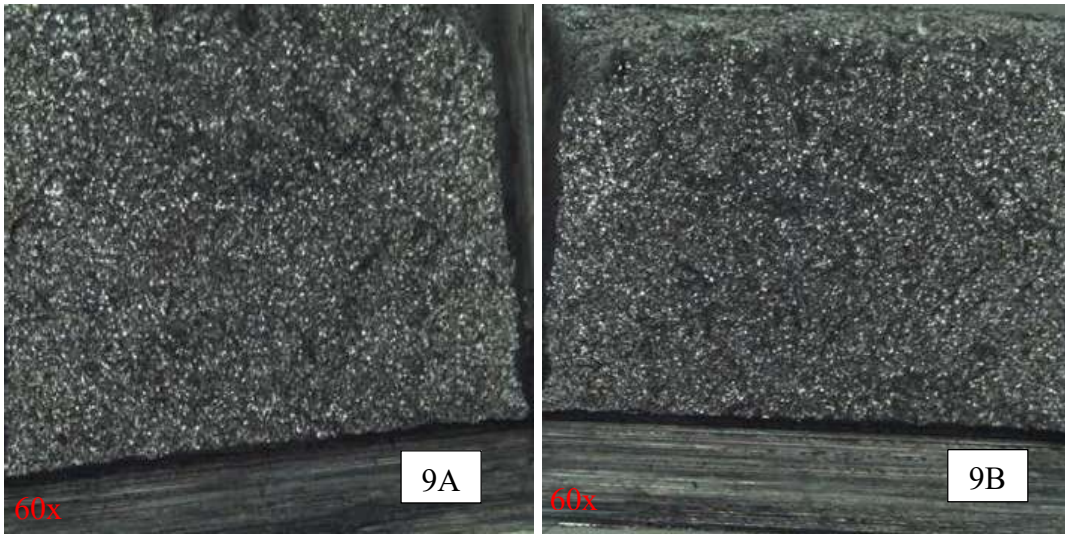
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -10°C



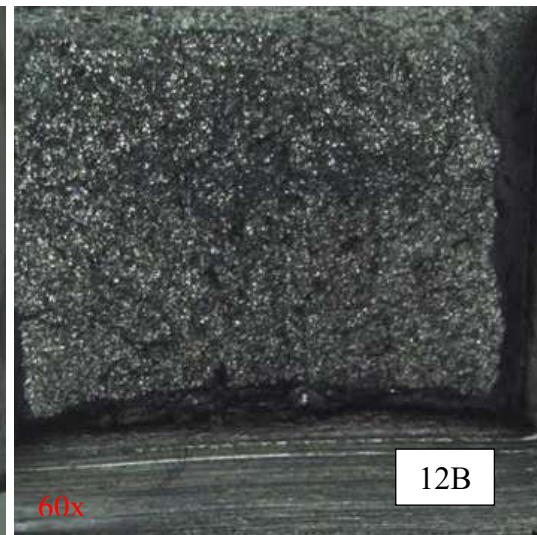
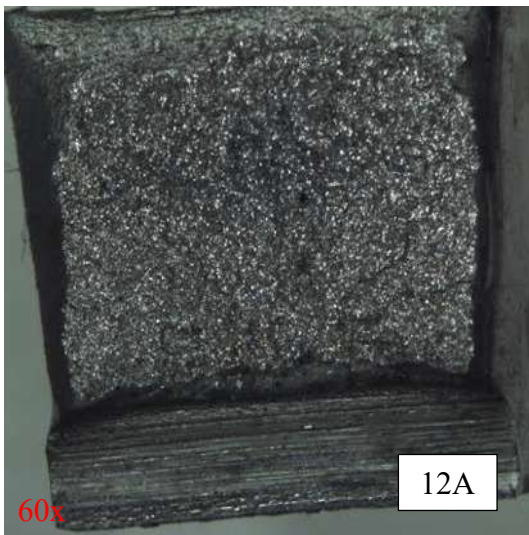
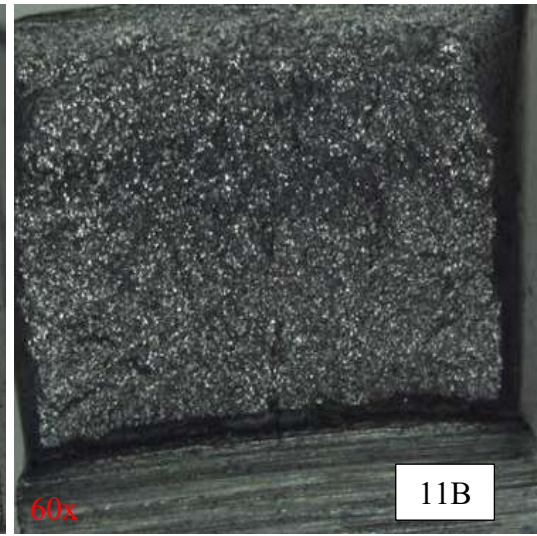
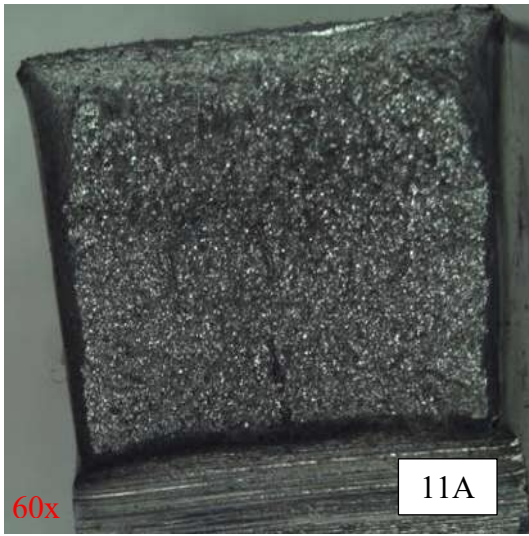
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -15°C



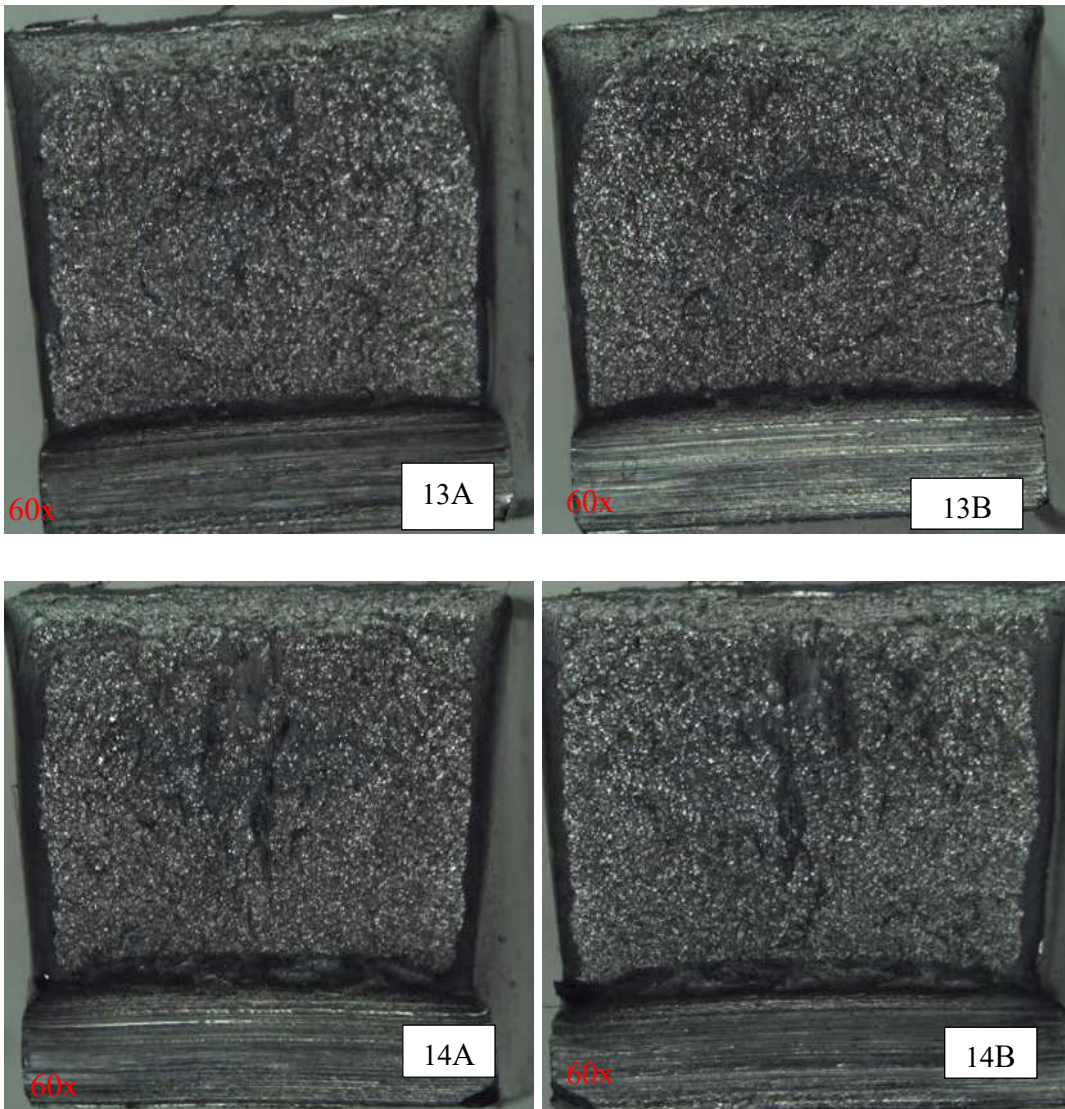
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -15°C



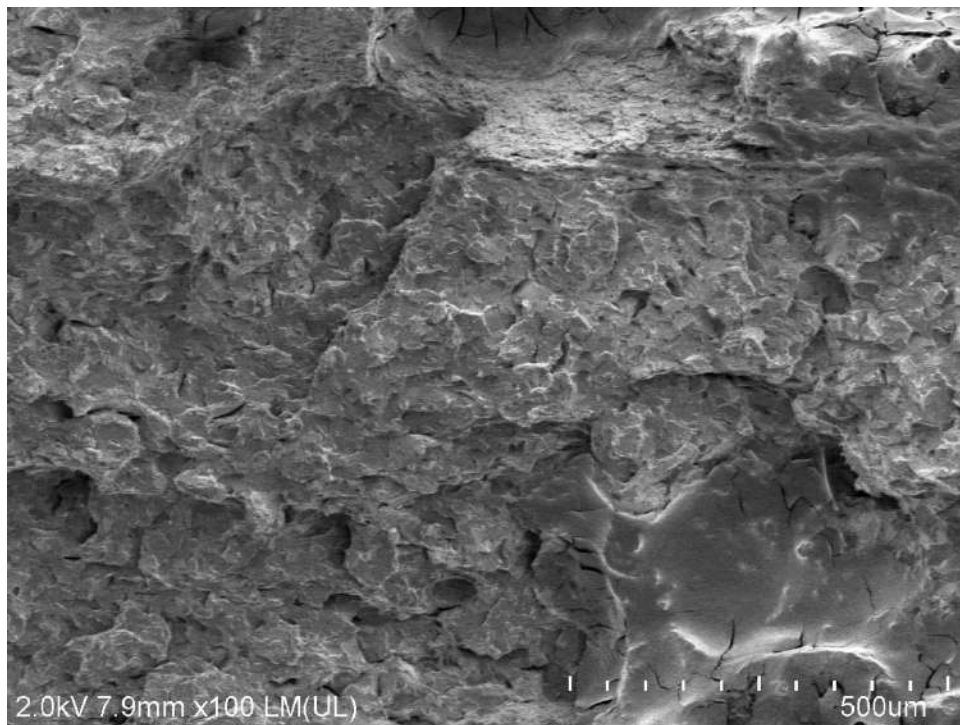
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -16°C



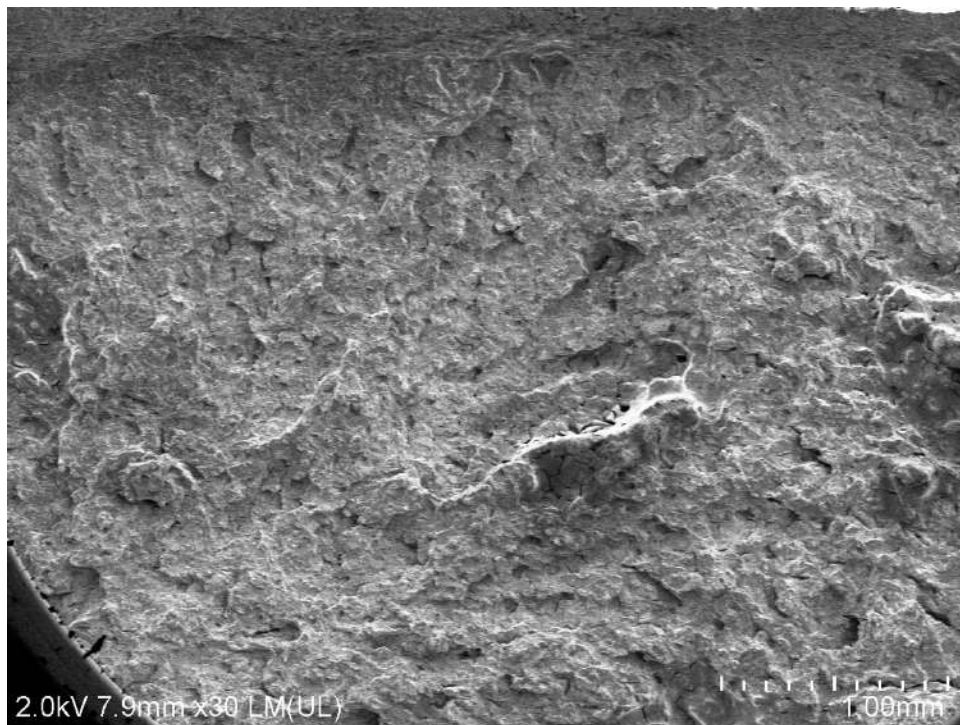
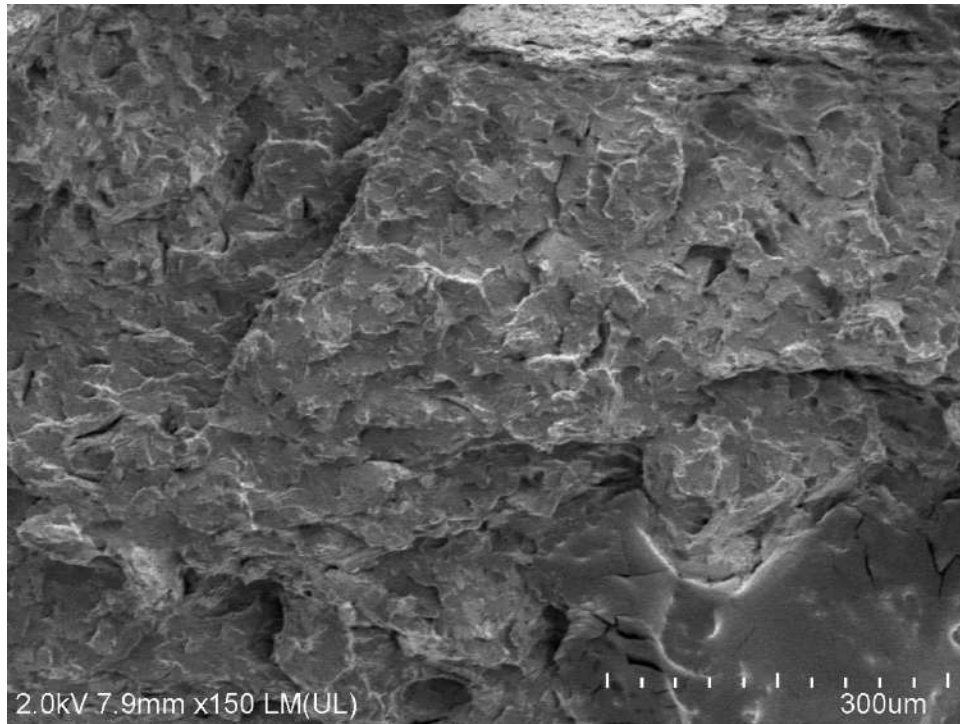
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C



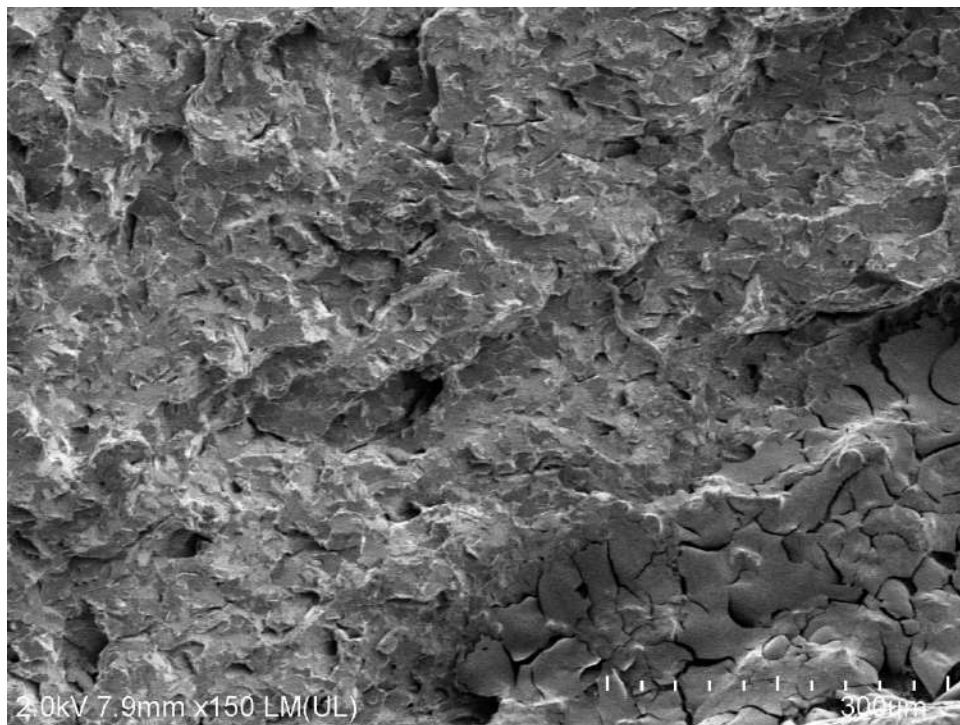
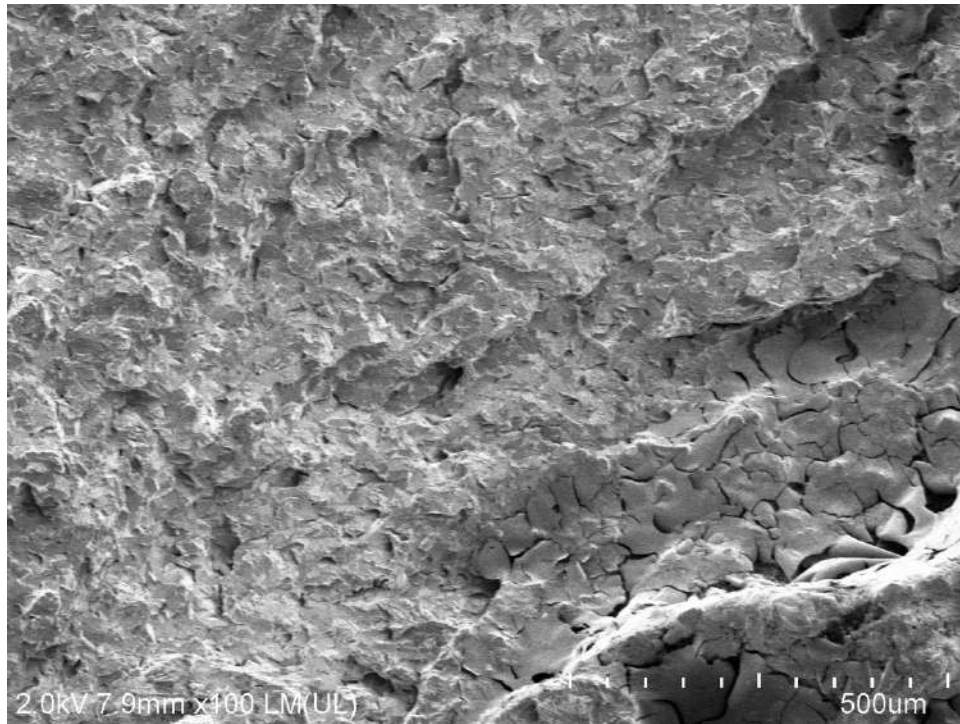
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C



Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C

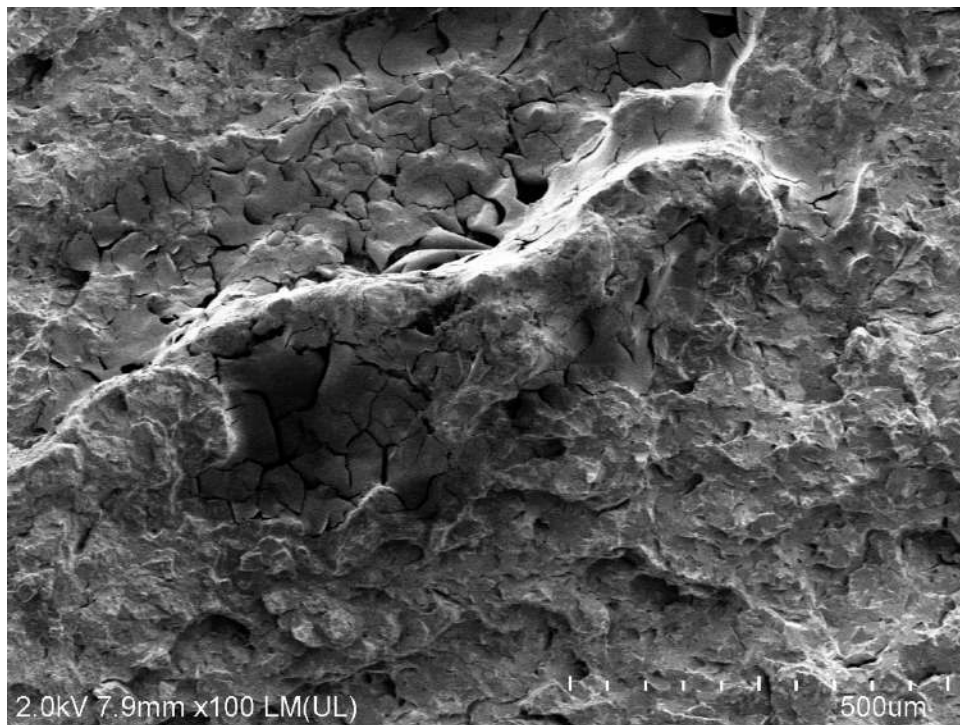
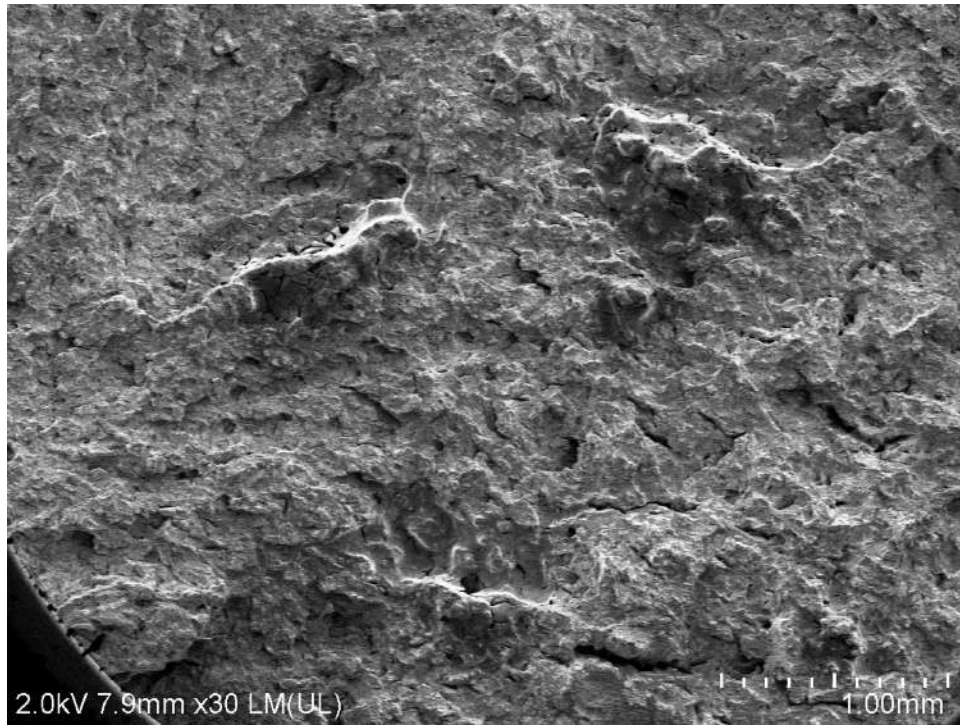


Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C

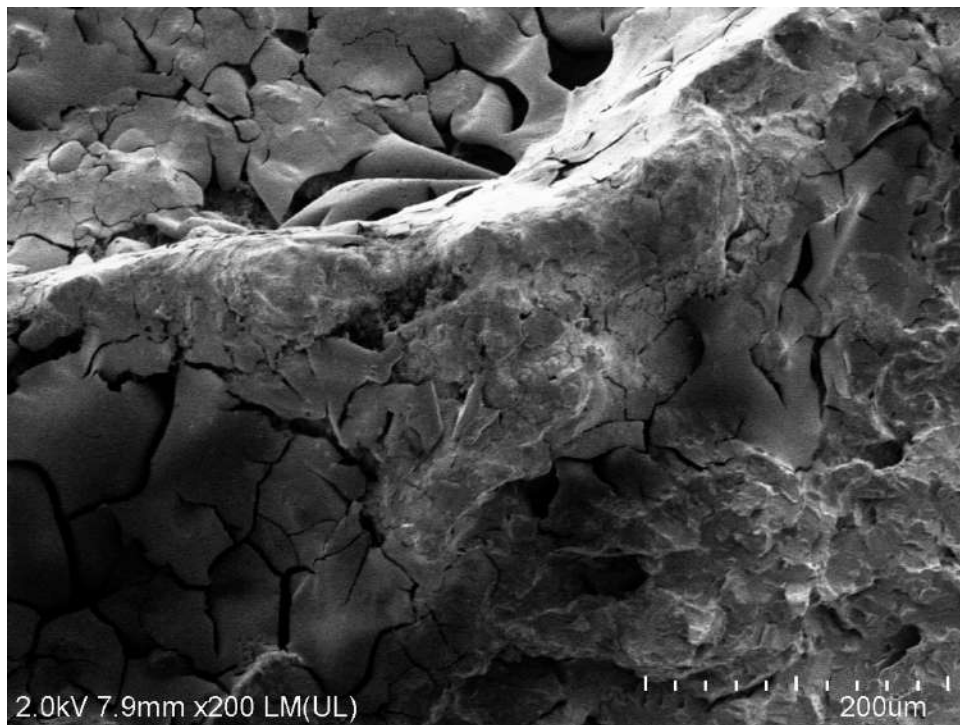
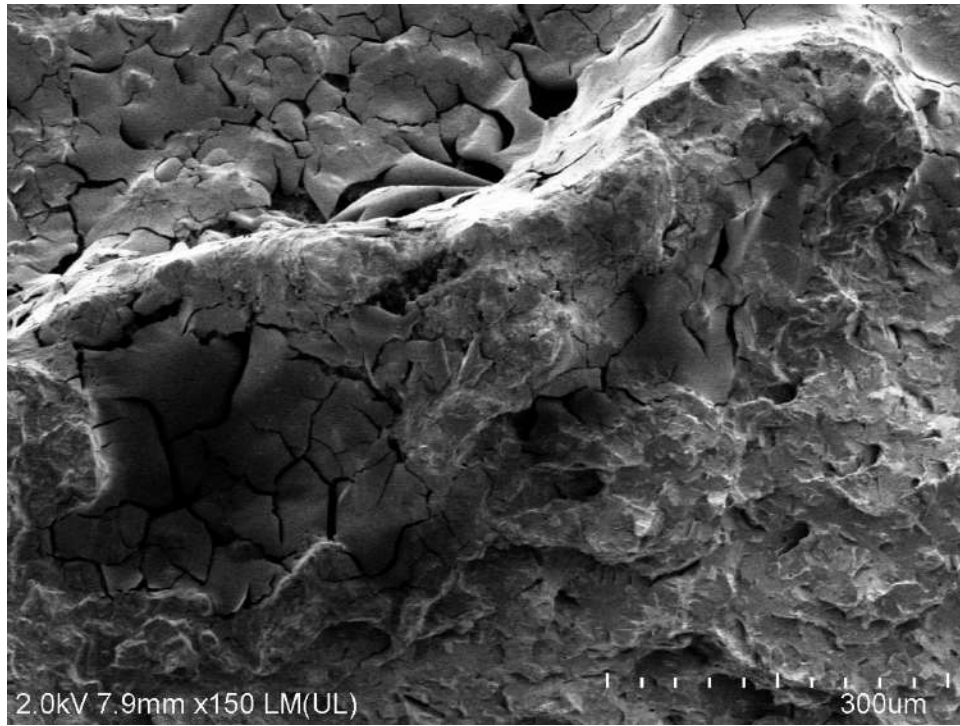




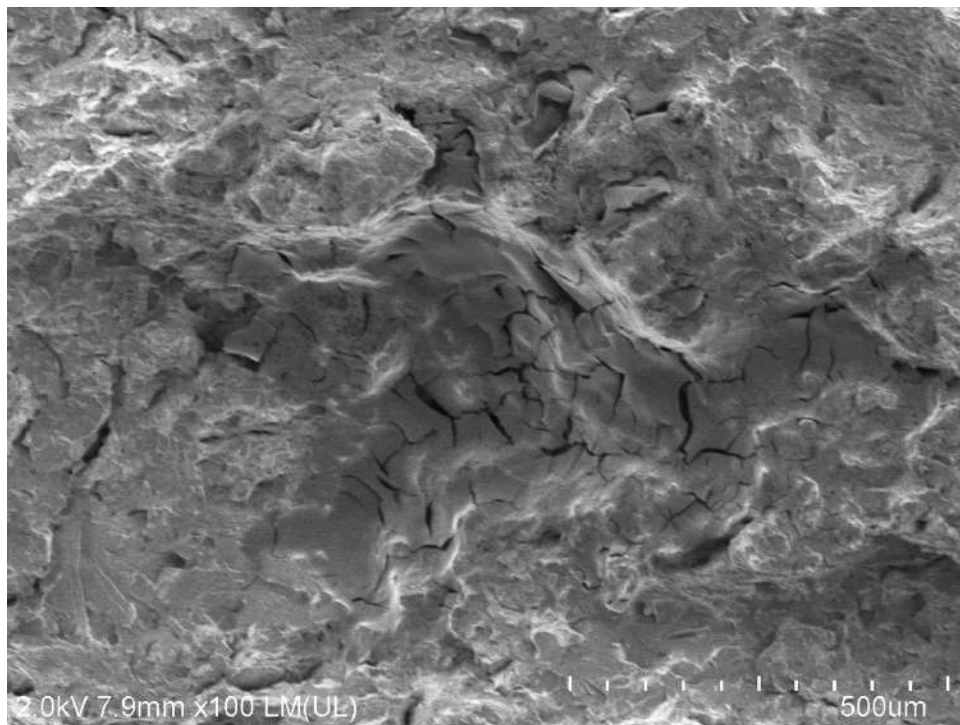
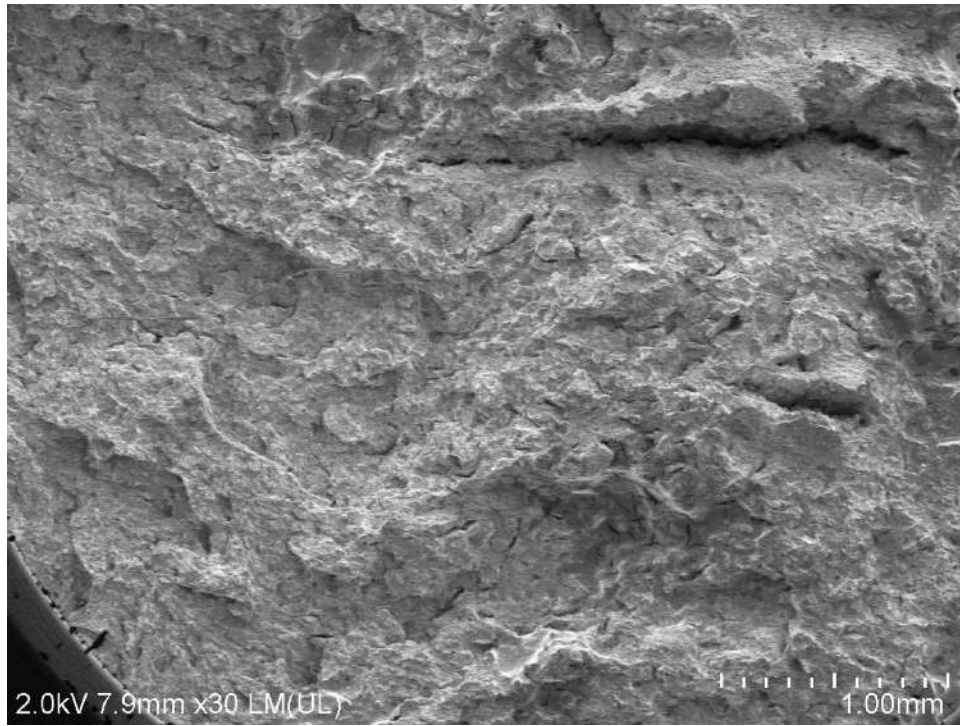
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C



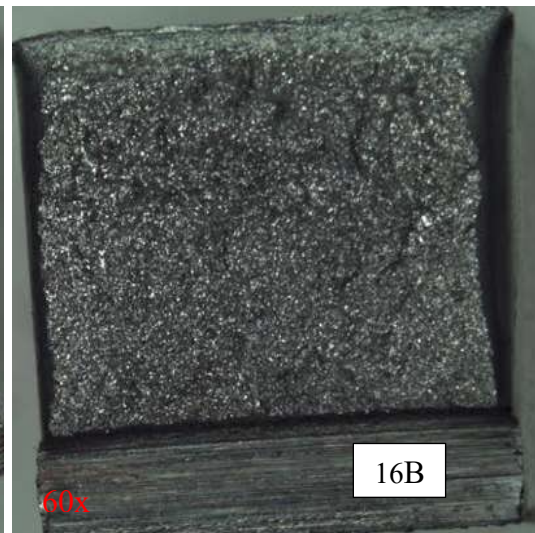
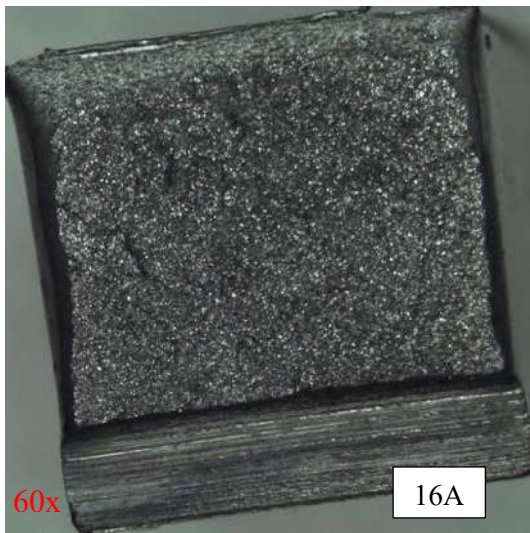
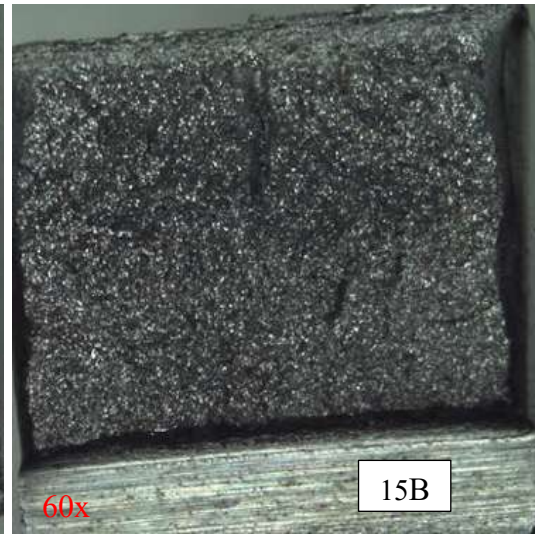
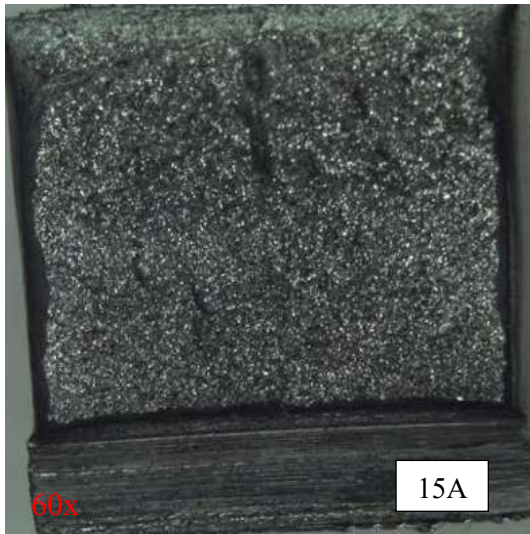
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C



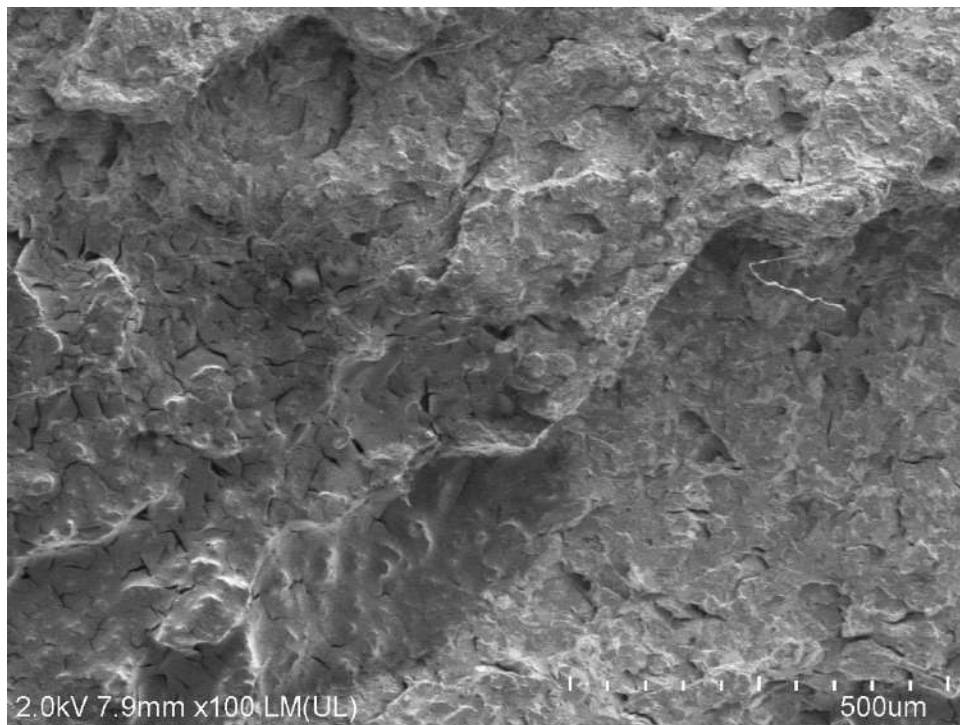
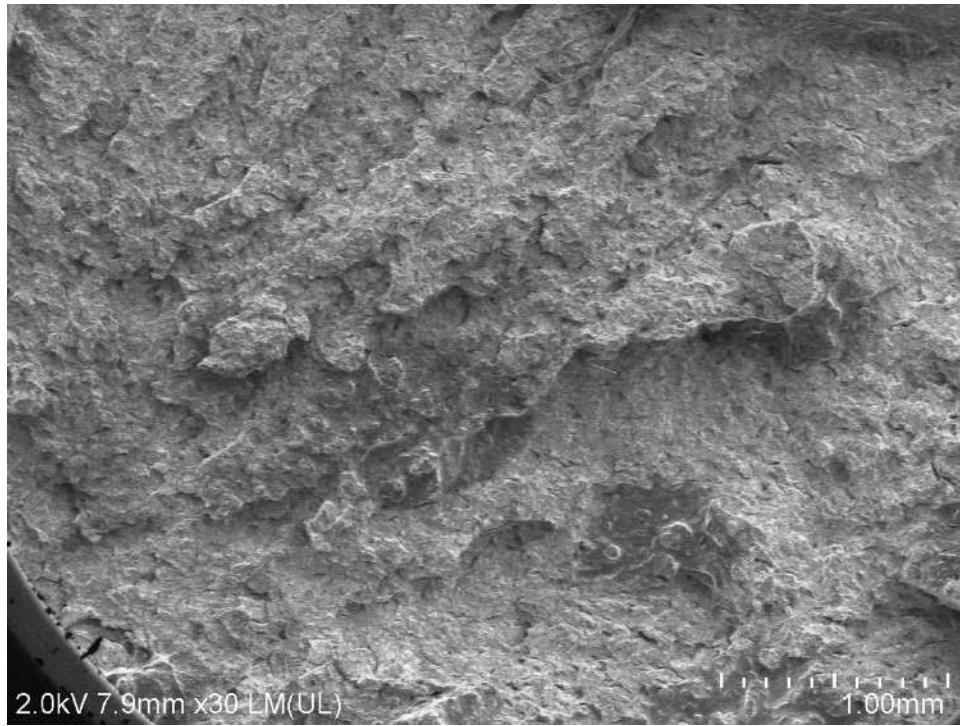
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -18°C



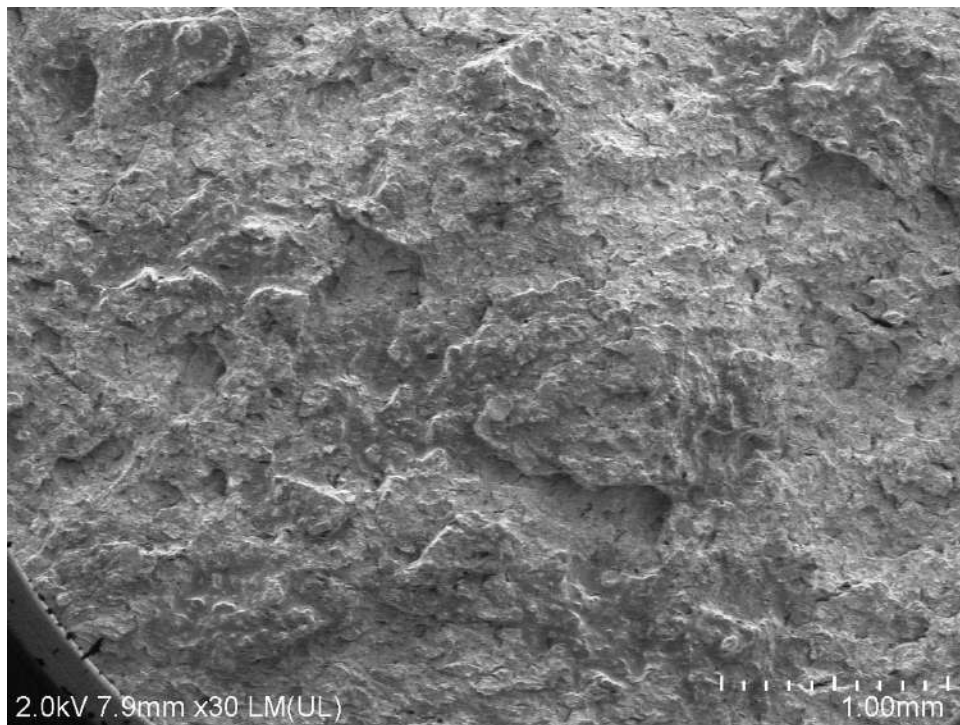
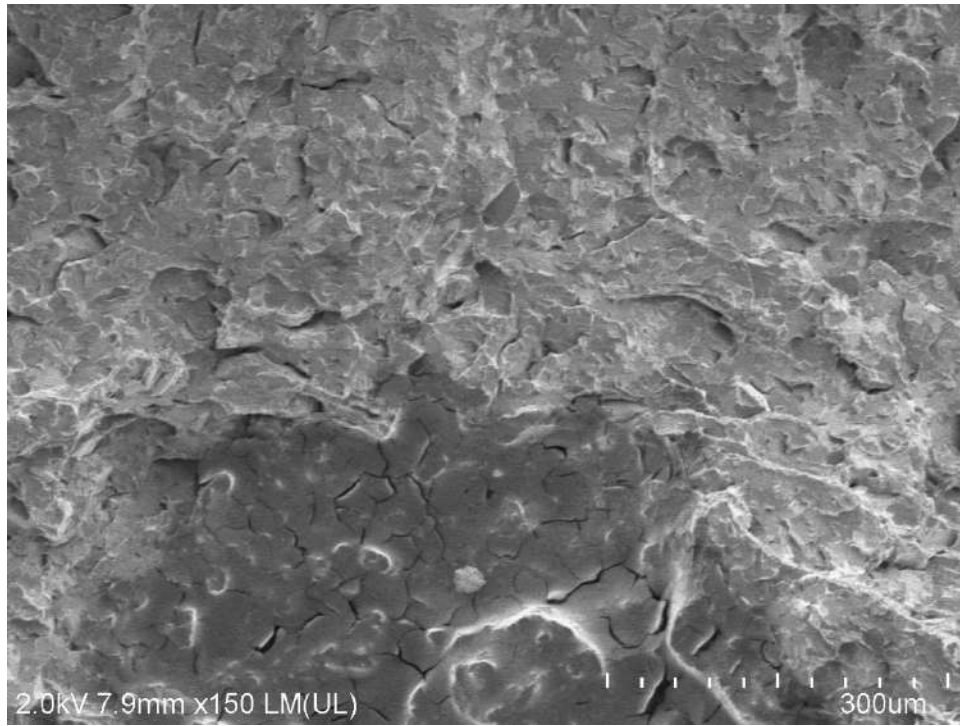
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C



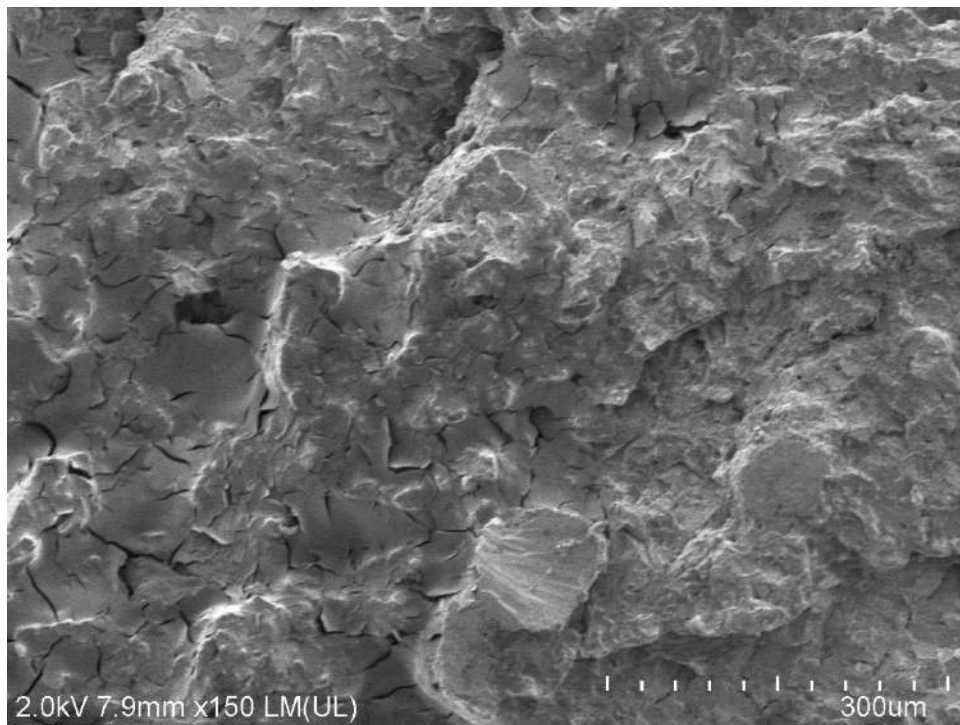
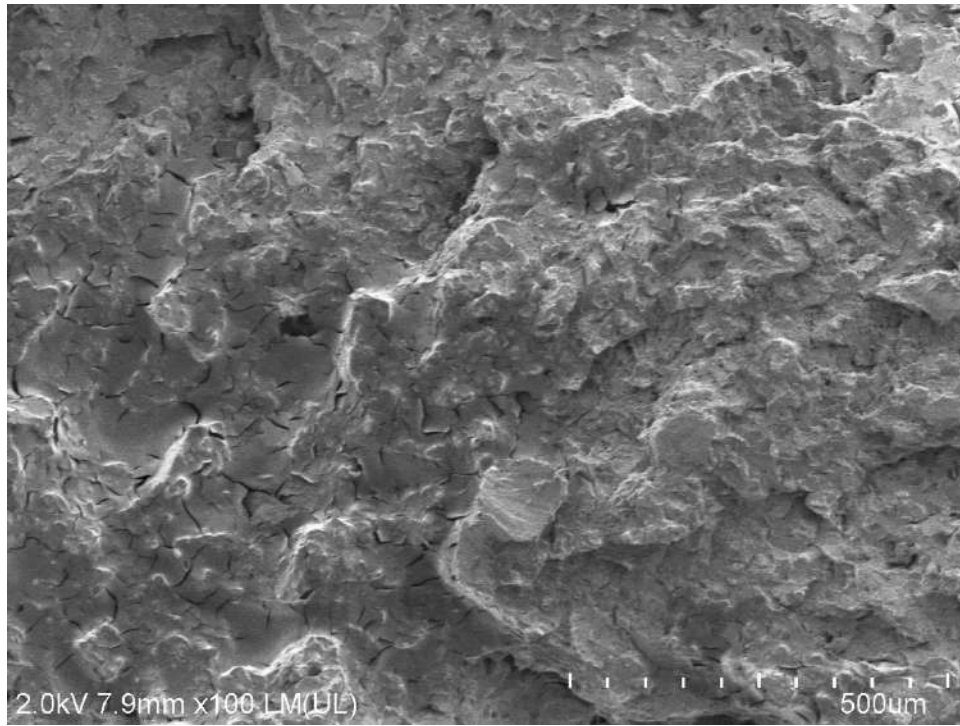
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C



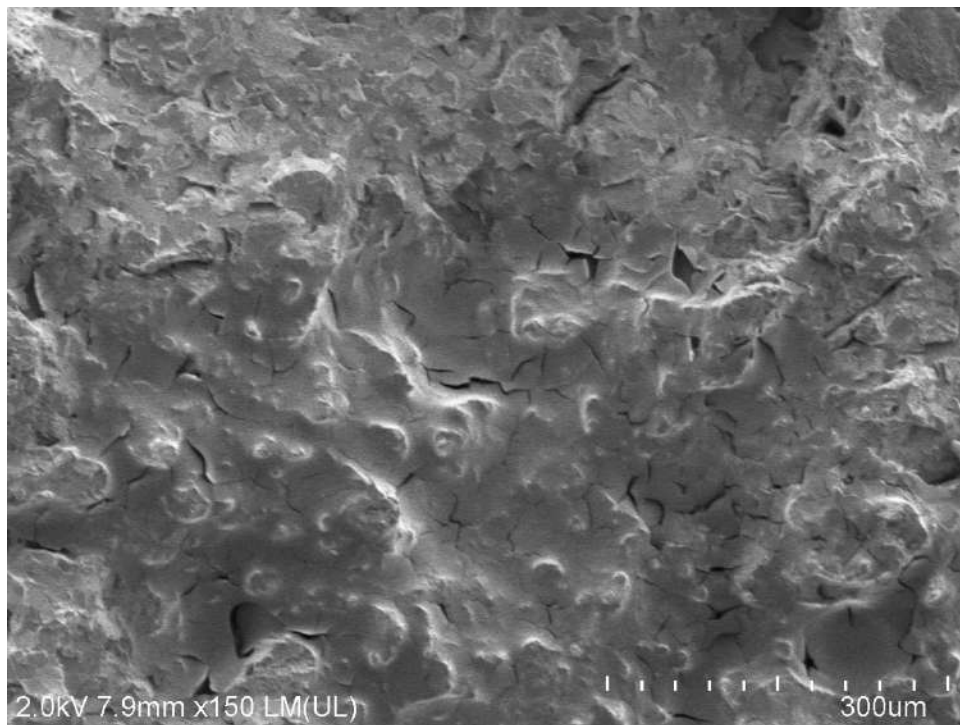
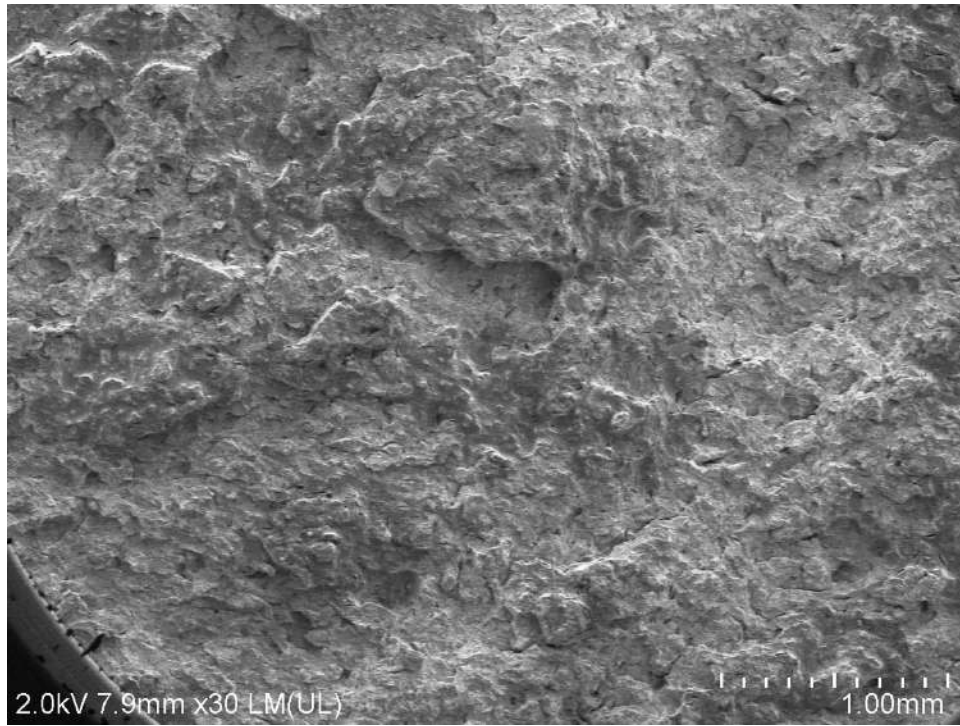
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C



Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C

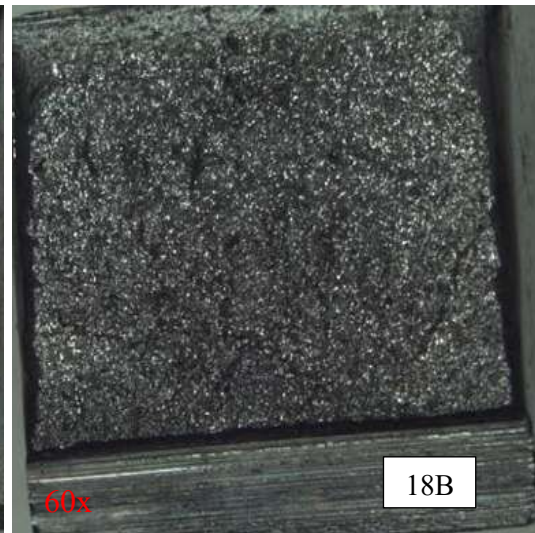
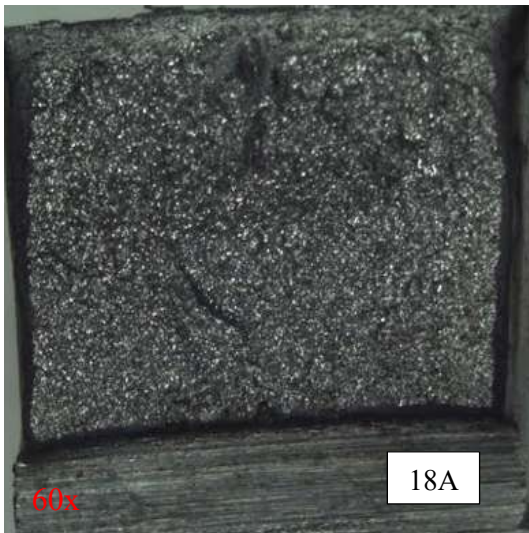
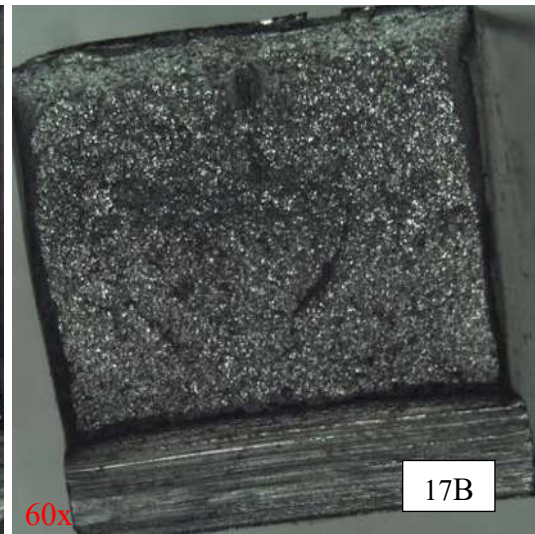
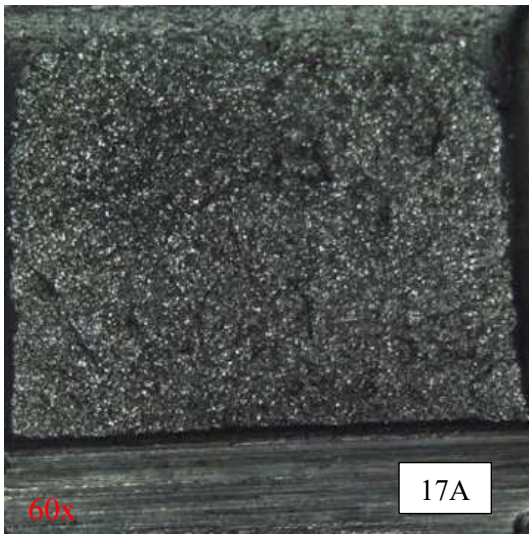


Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C

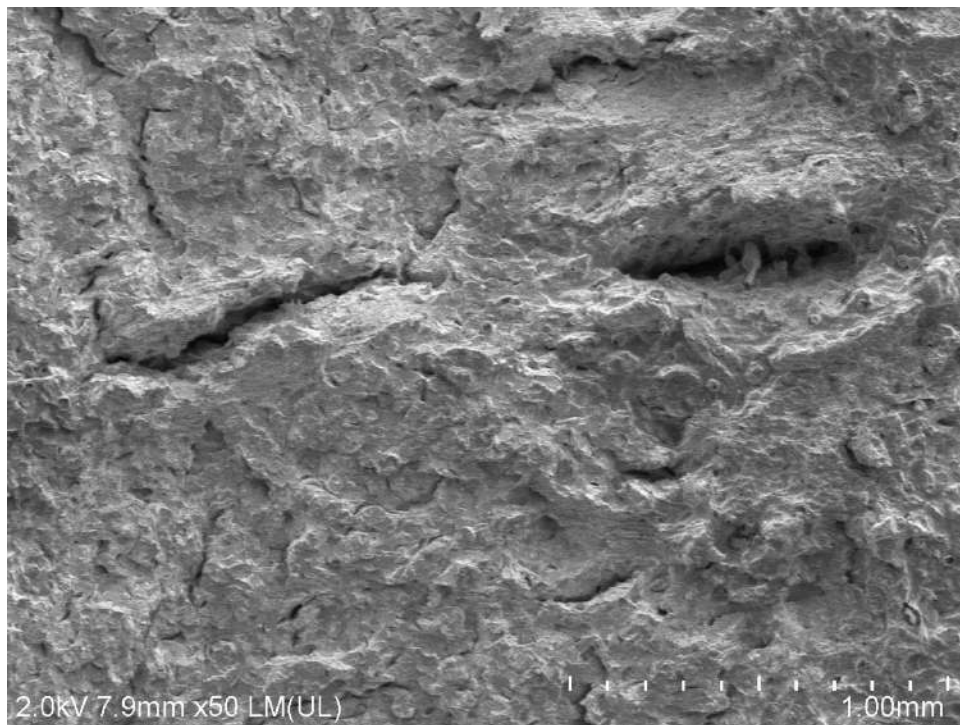
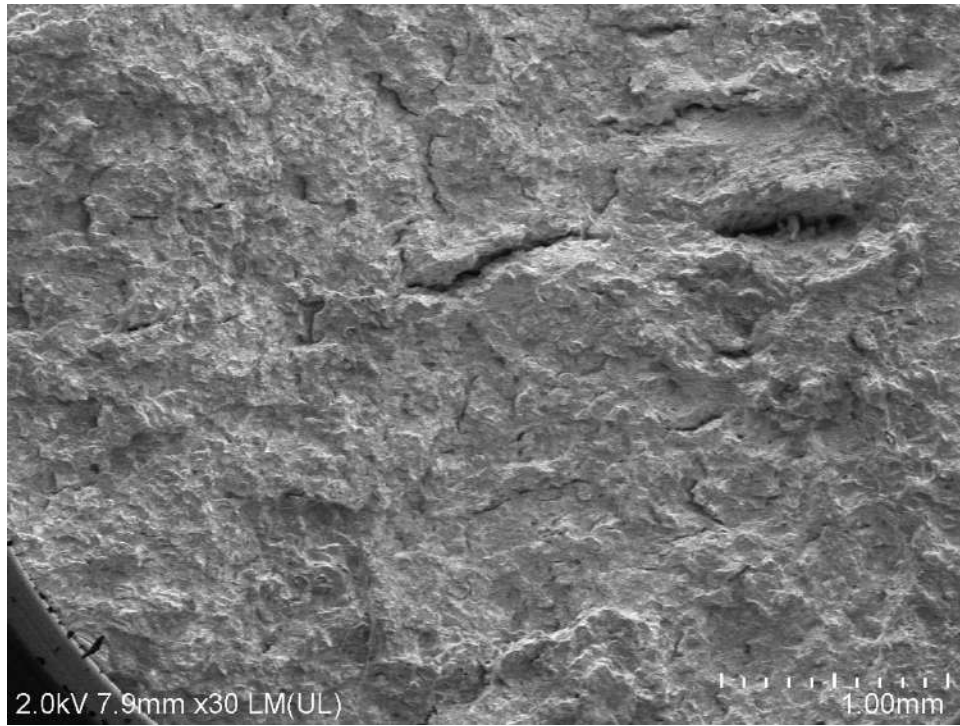




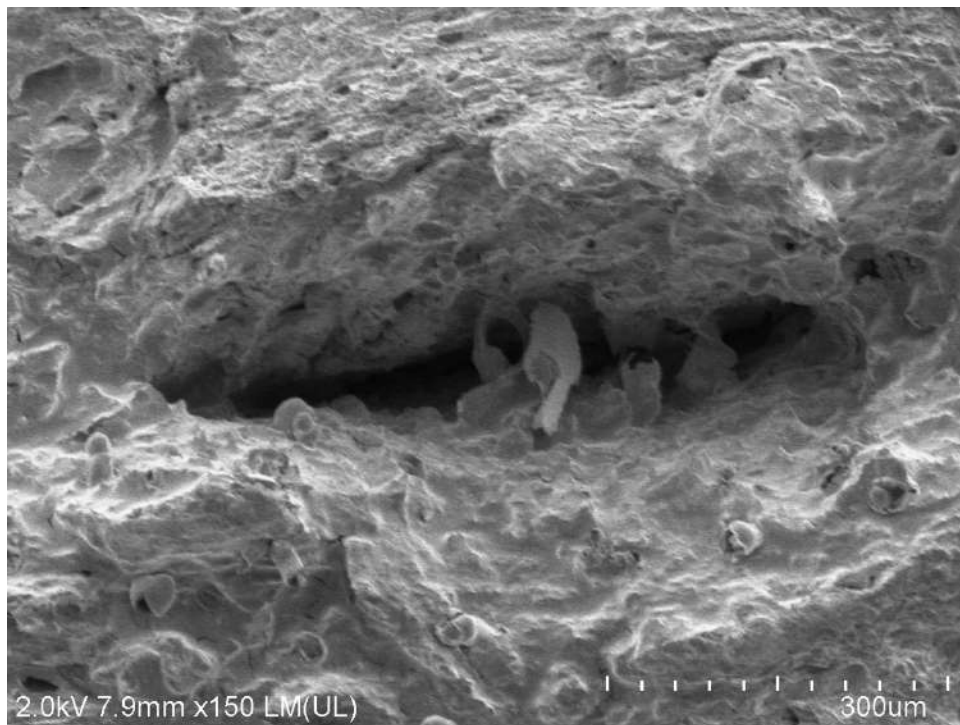
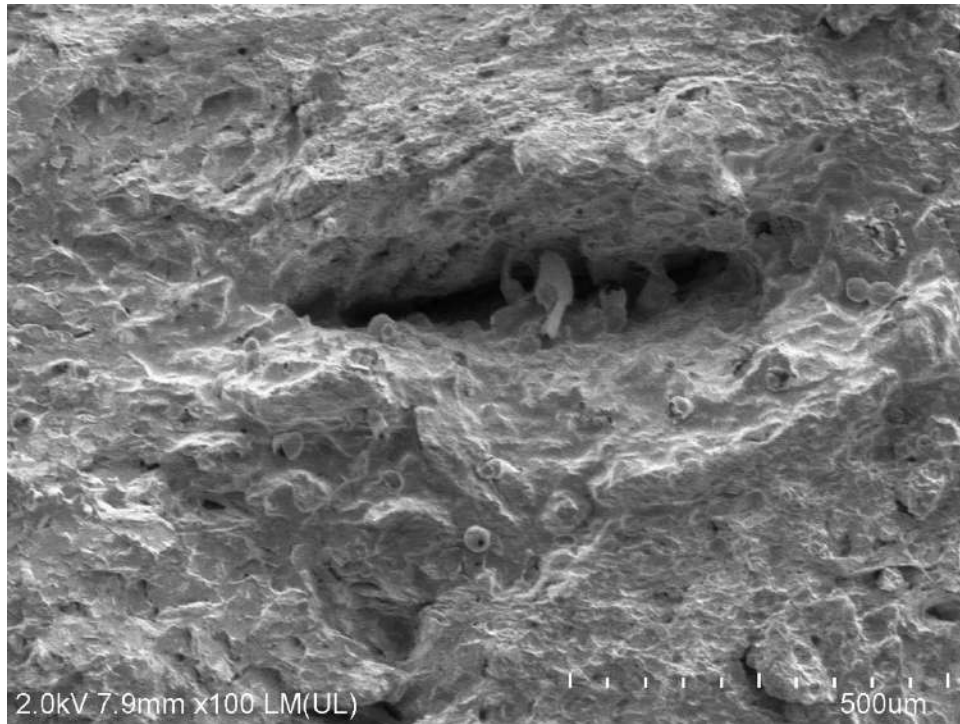
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -22°C



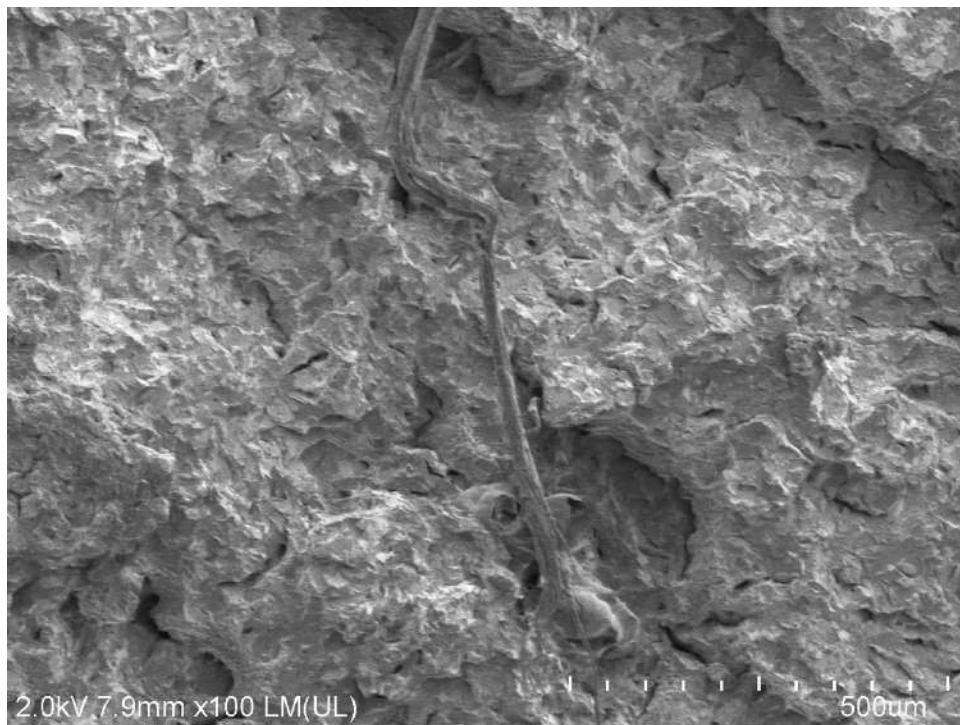
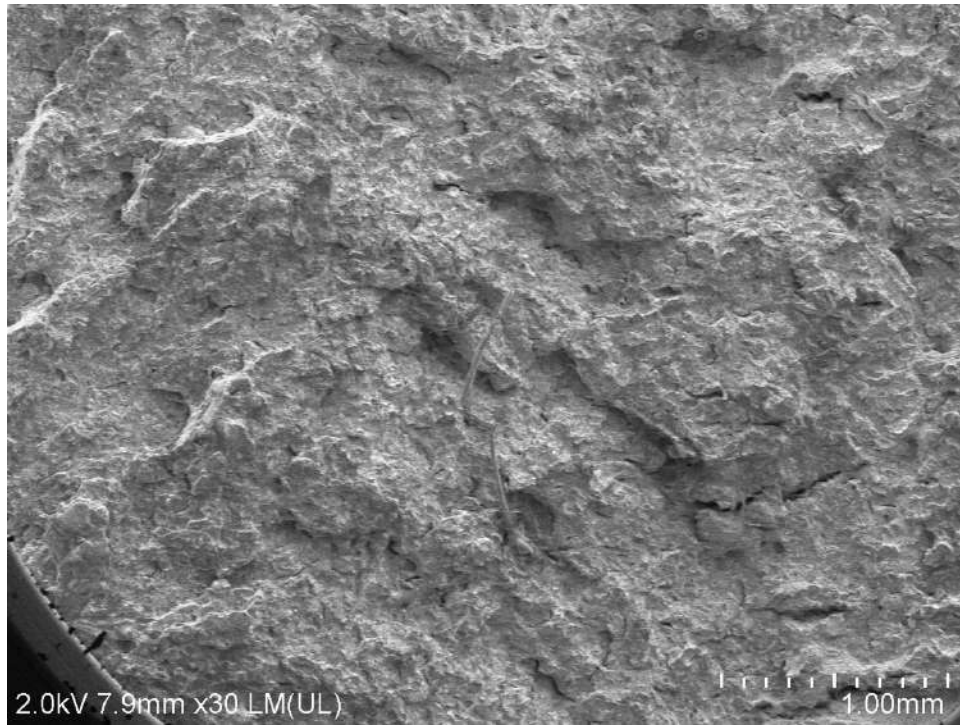
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -22°C



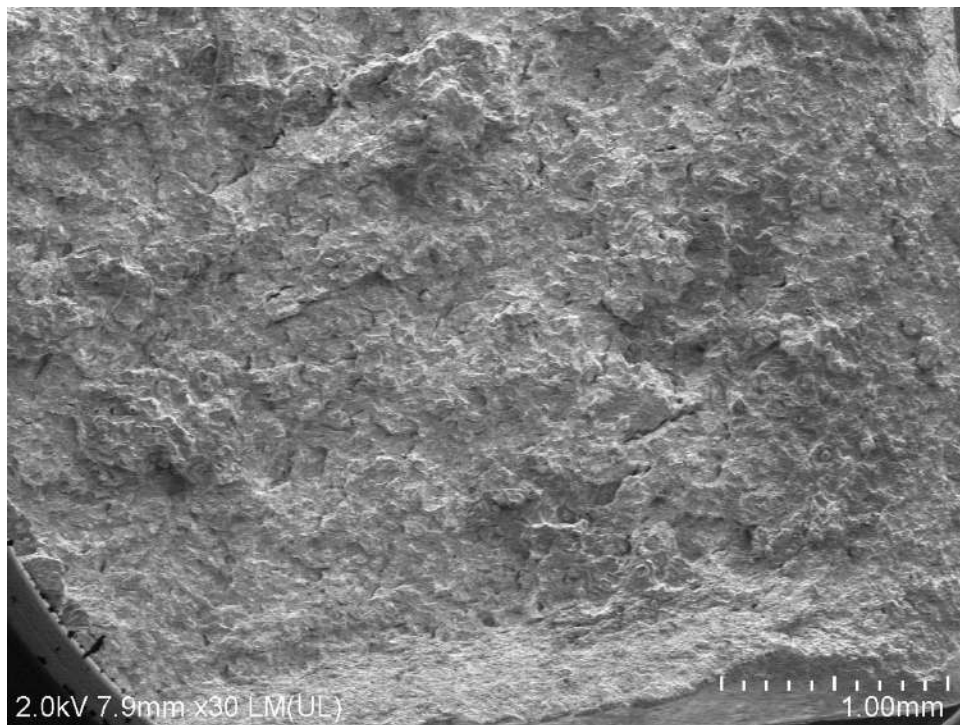
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -22°C



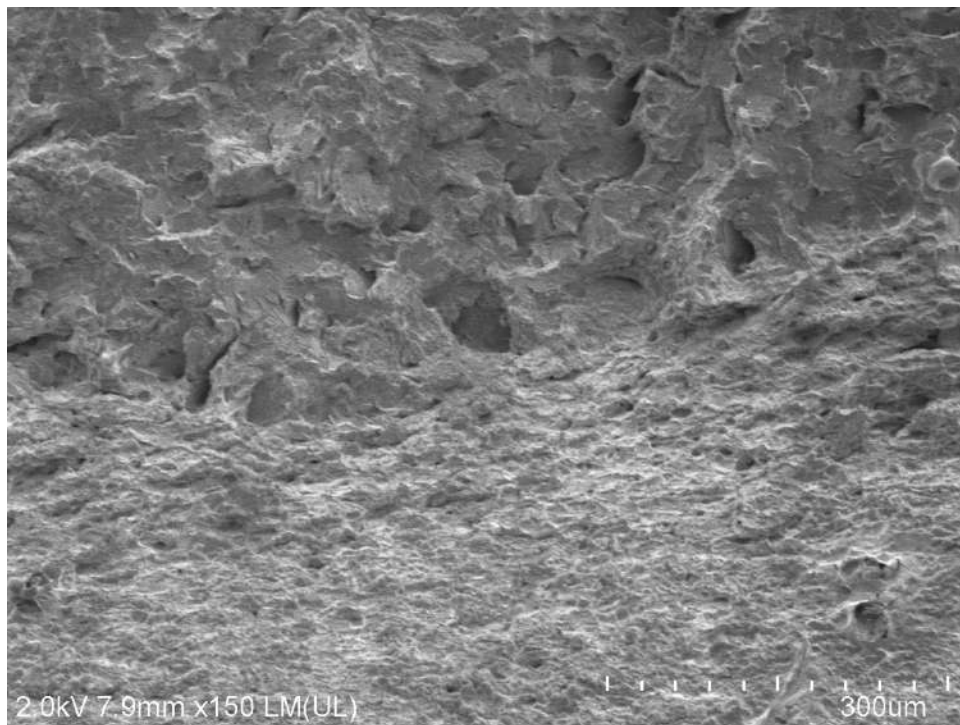
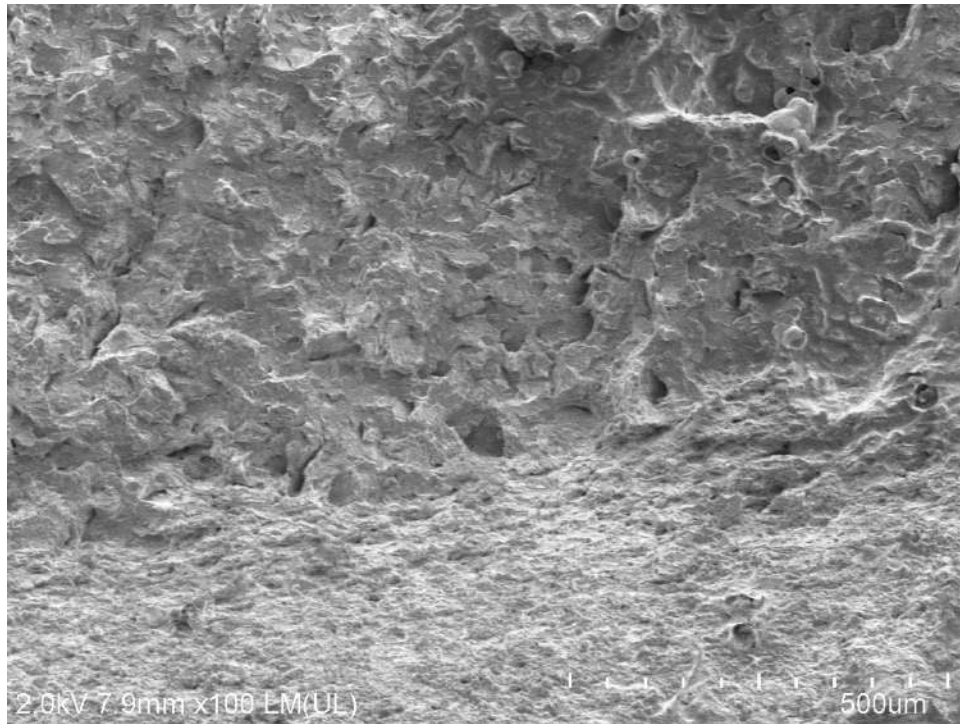
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -22°C



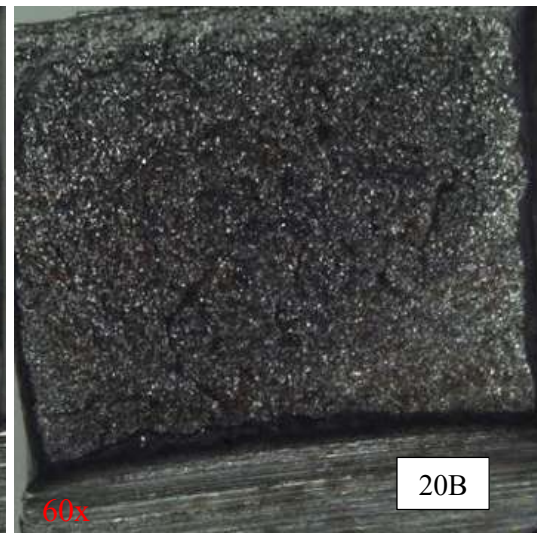
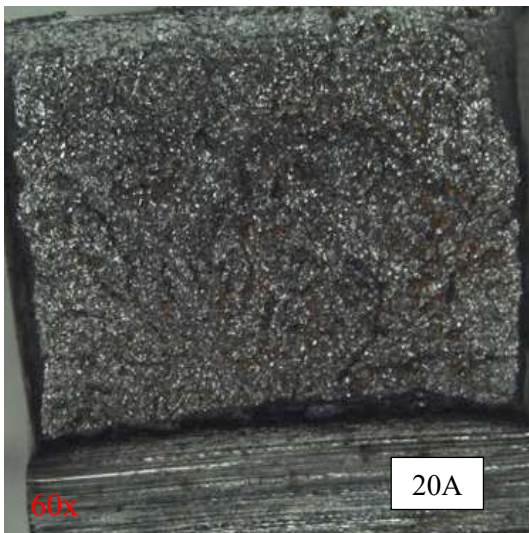
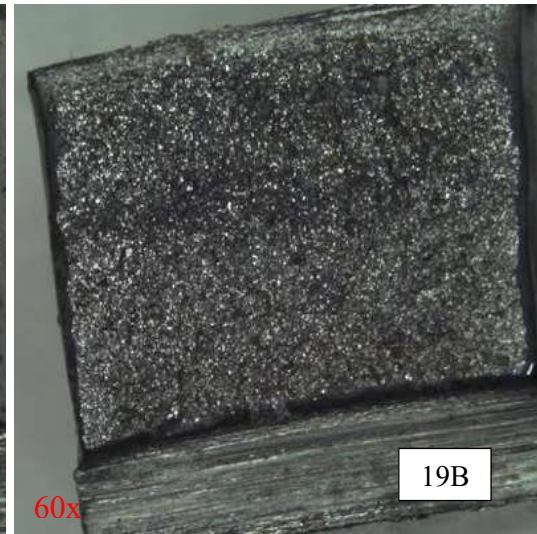
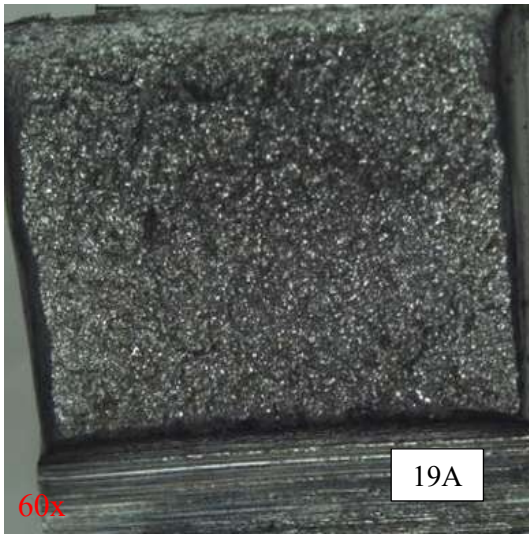
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -22°C



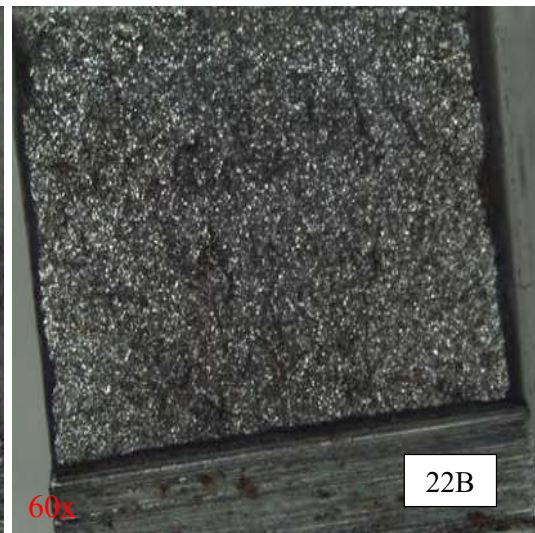
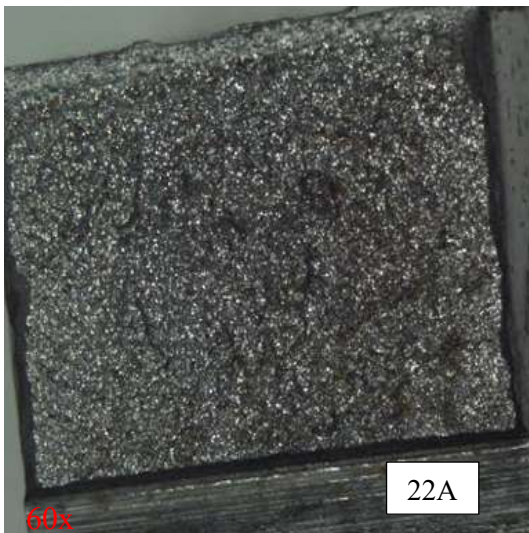
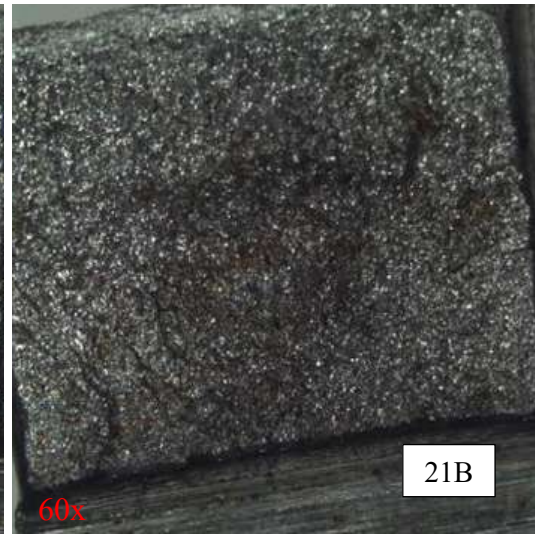
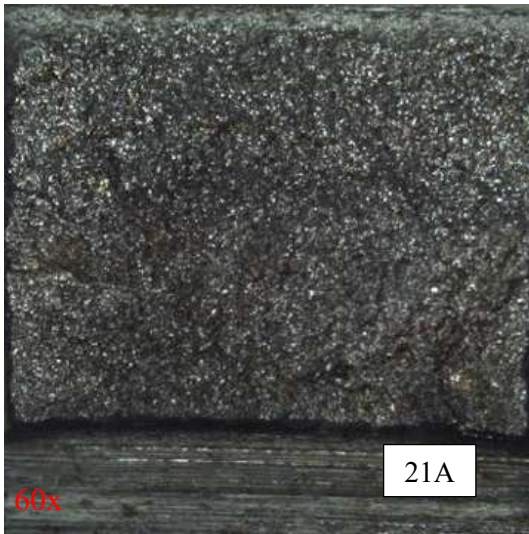
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -22°C



Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -25°C

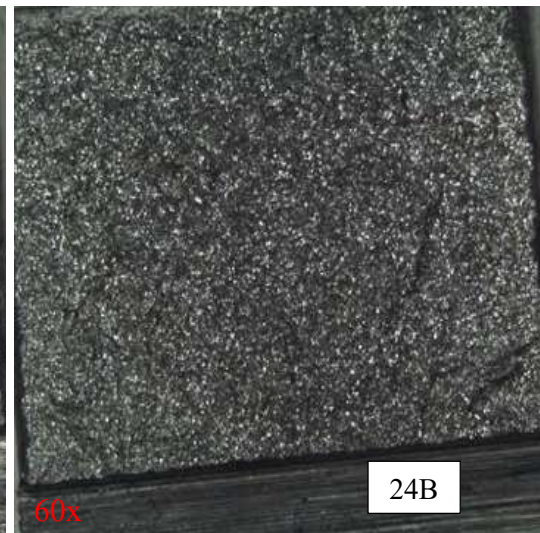
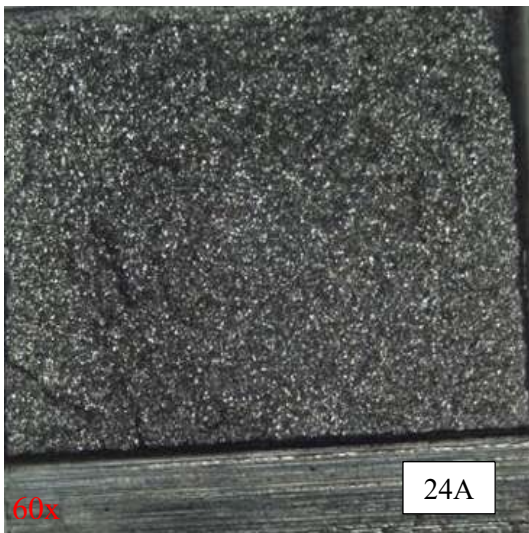
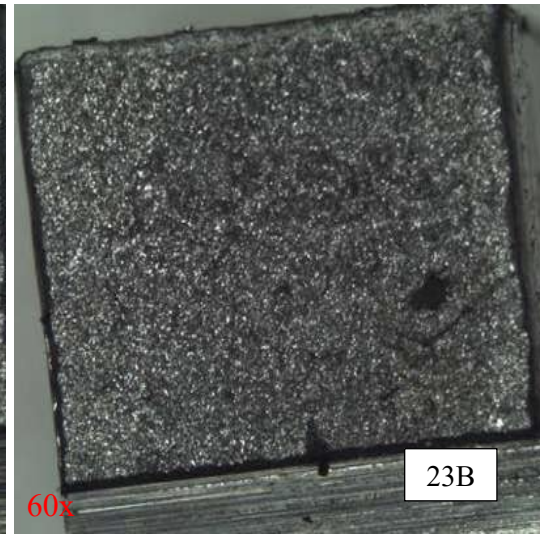
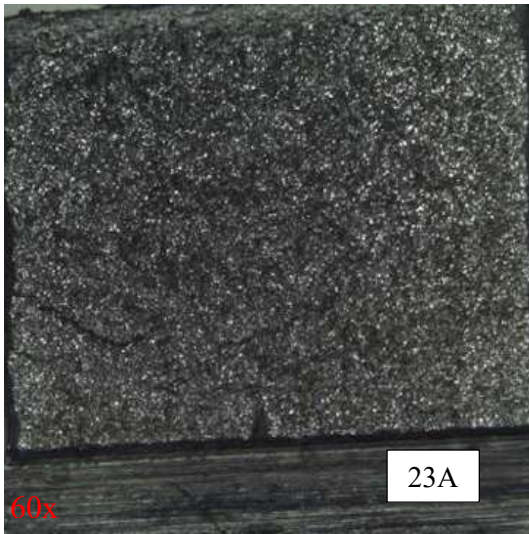


Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -30°C

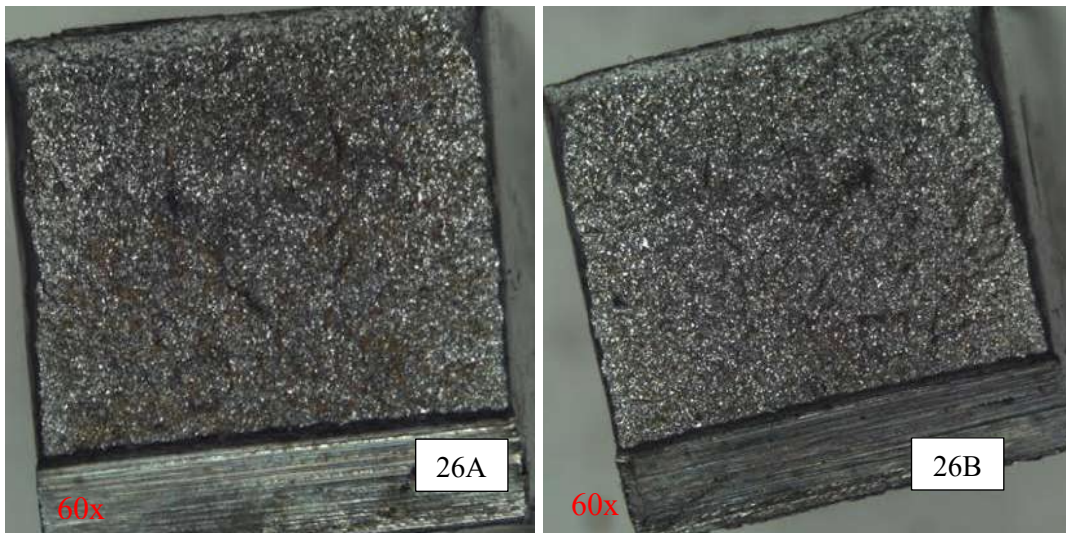
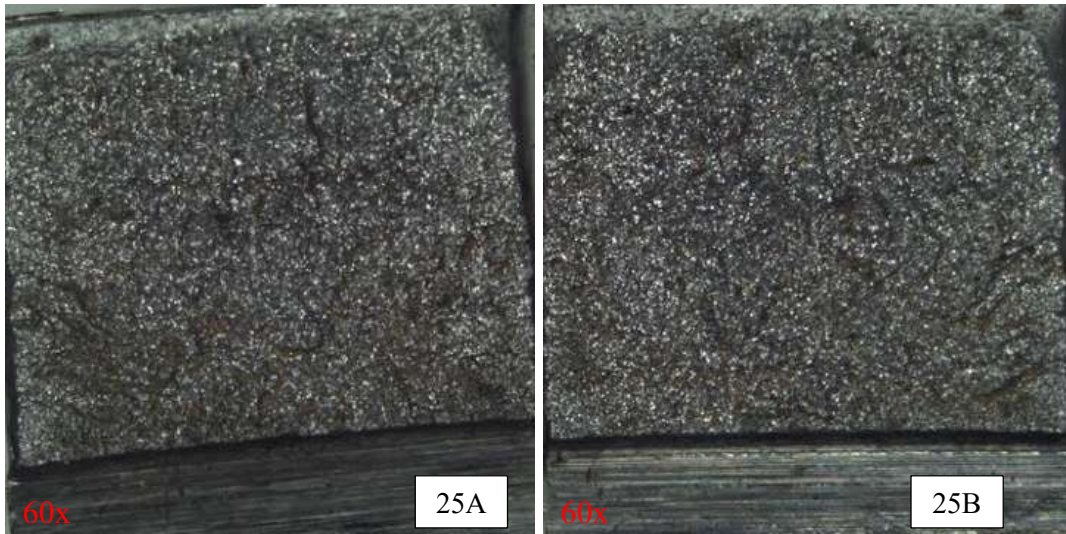




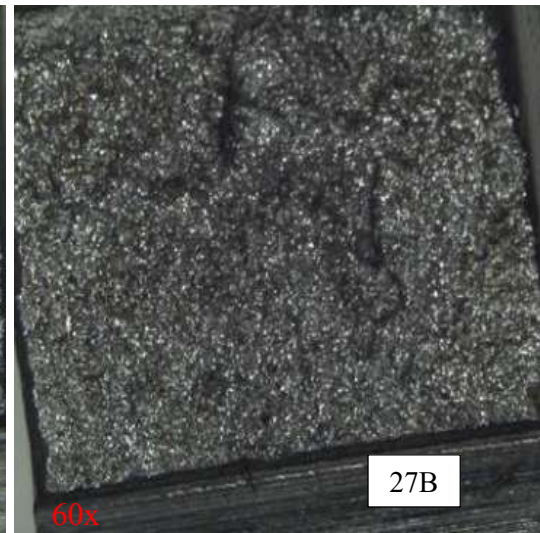
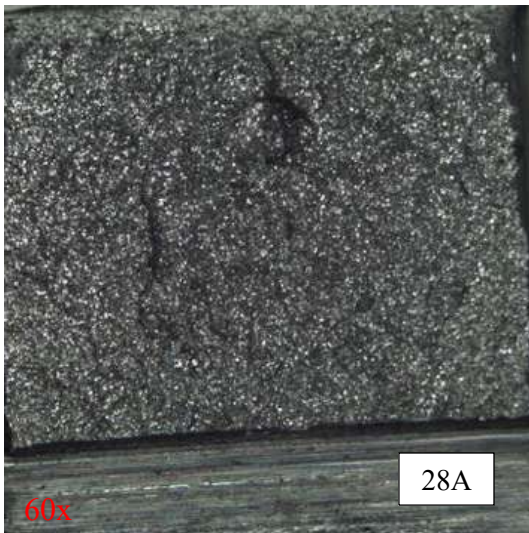
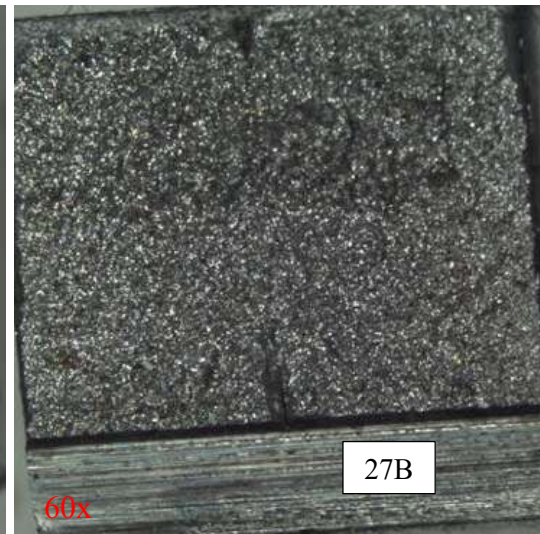
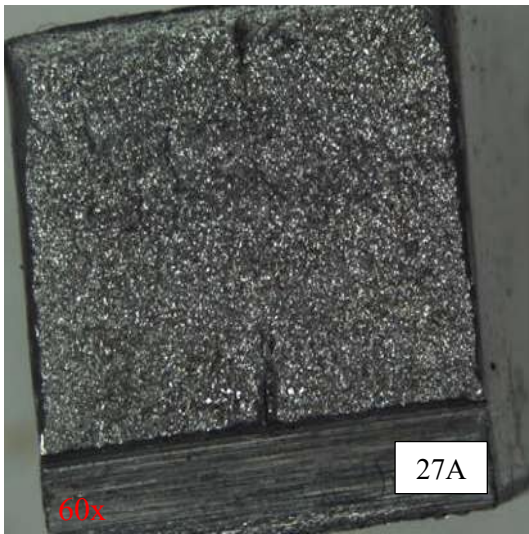
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



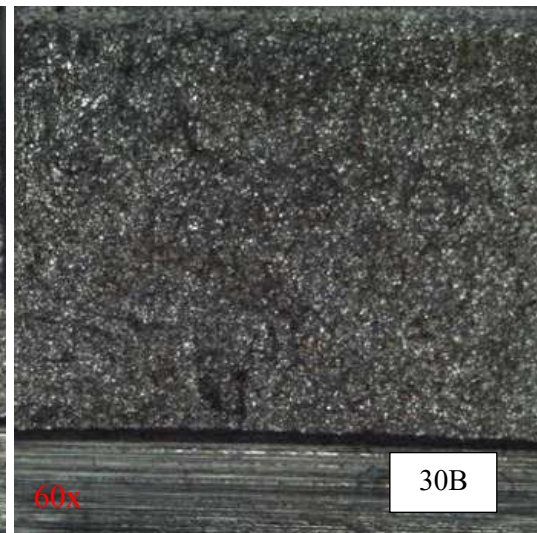
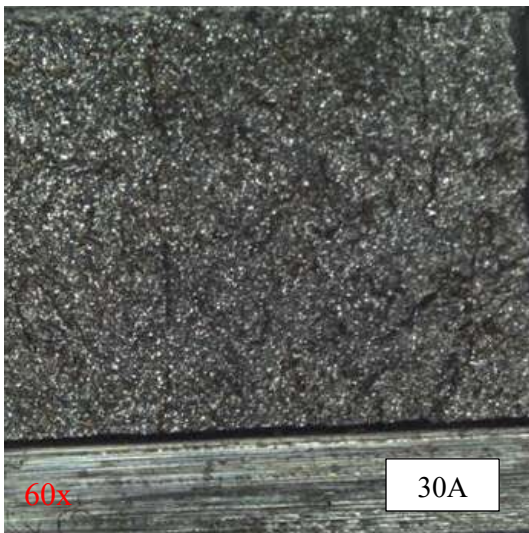
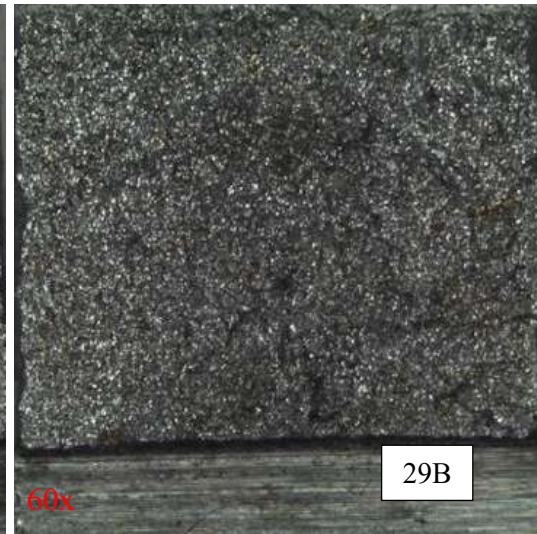
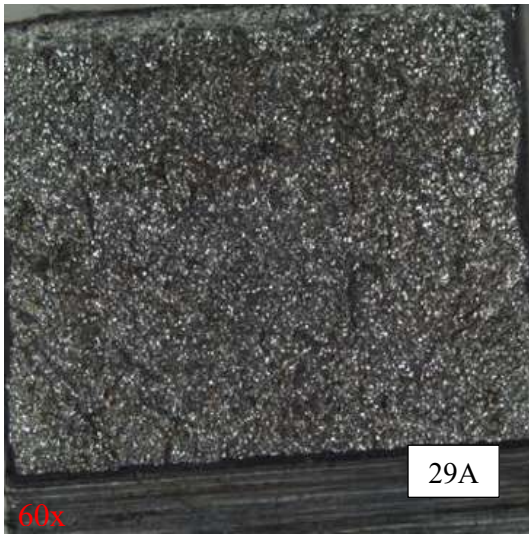
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



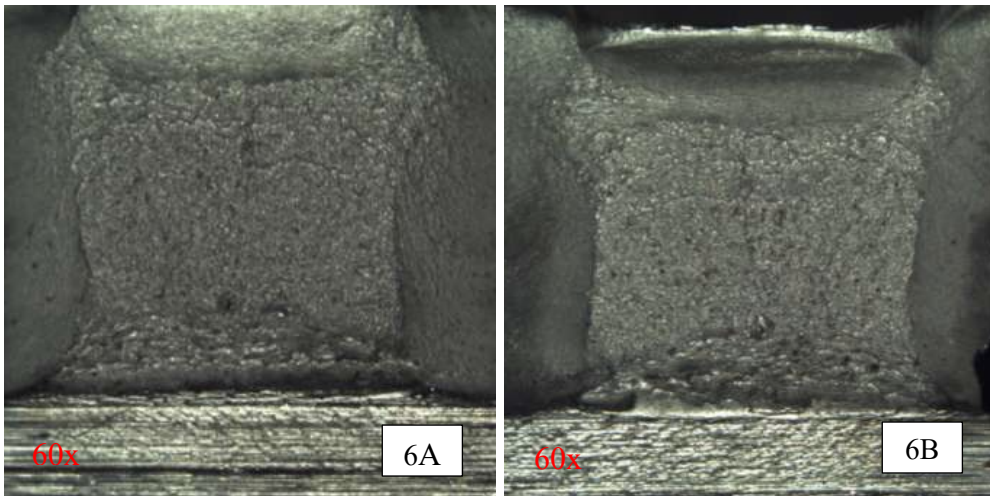
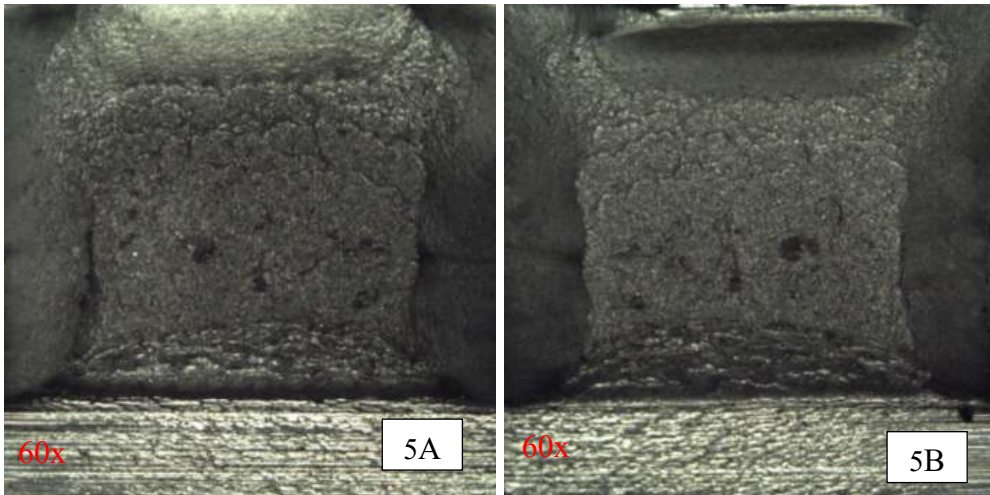
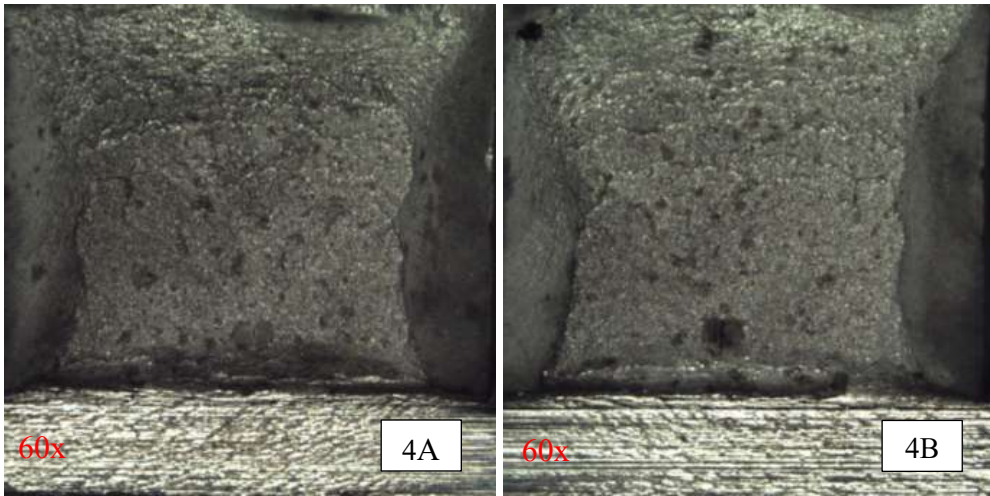
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



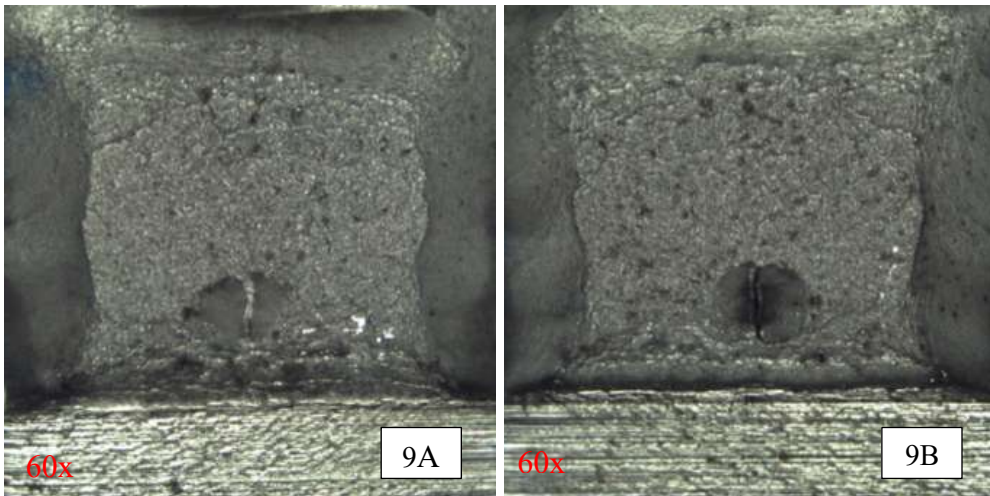
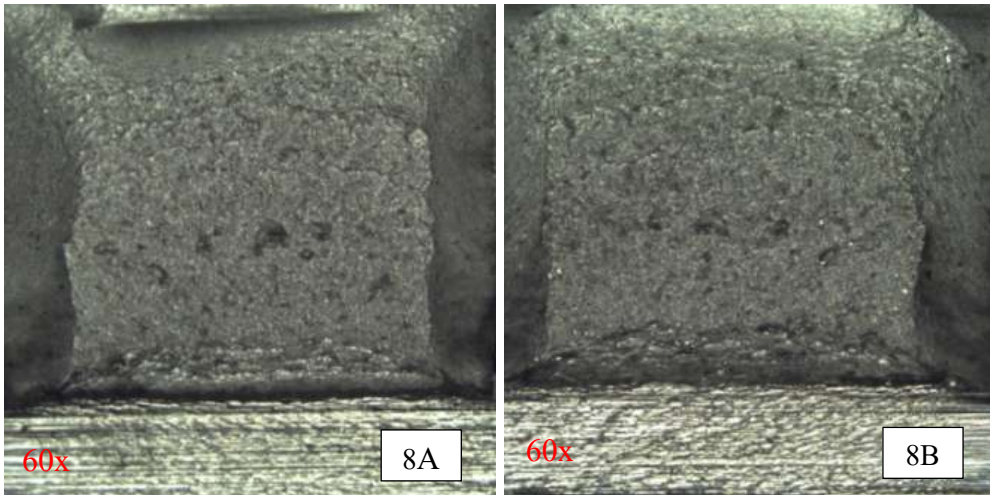
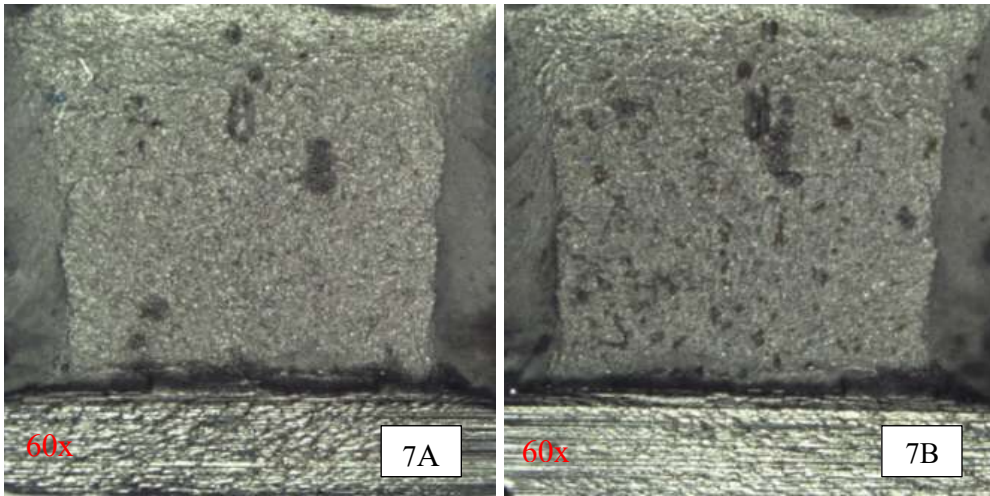
Condición 1 rolado | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C



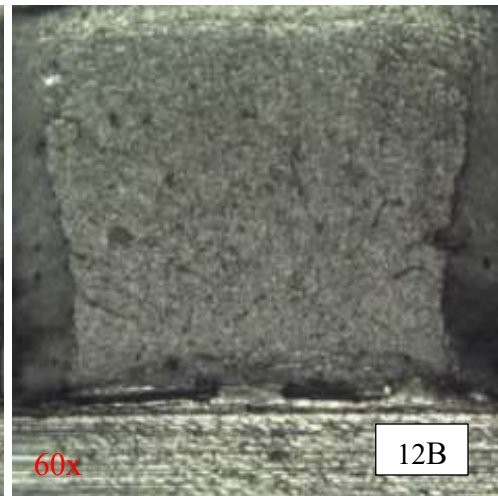
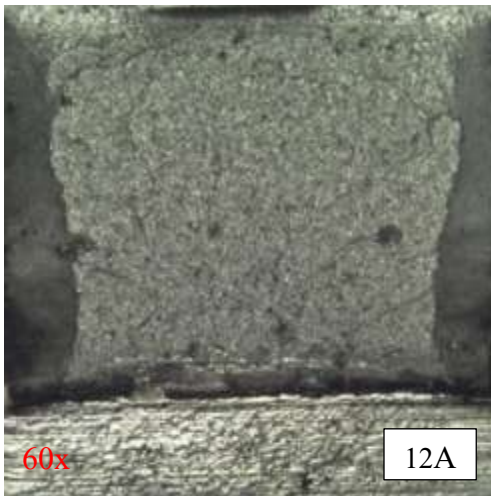
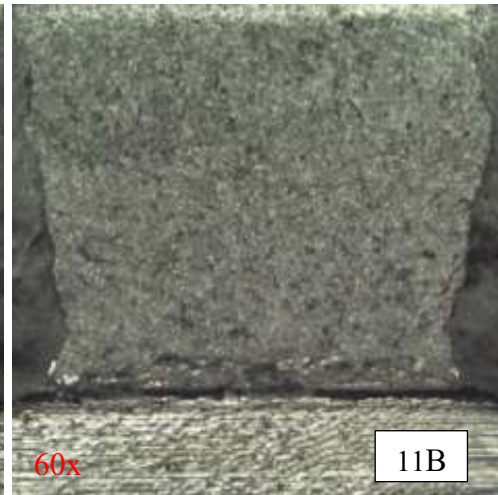
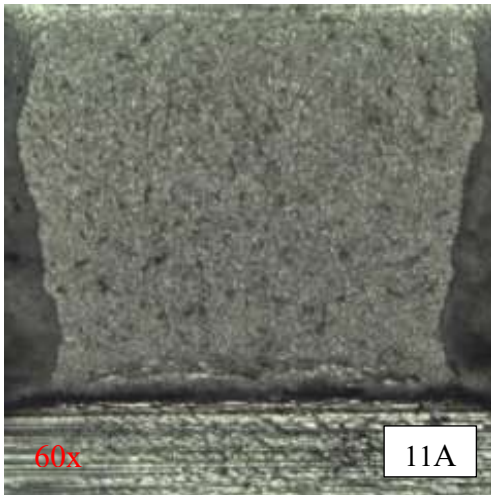
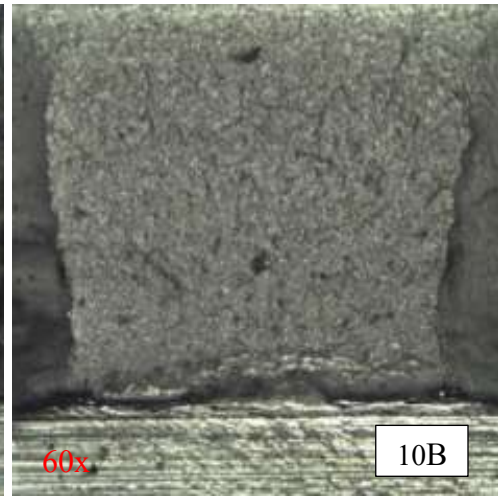
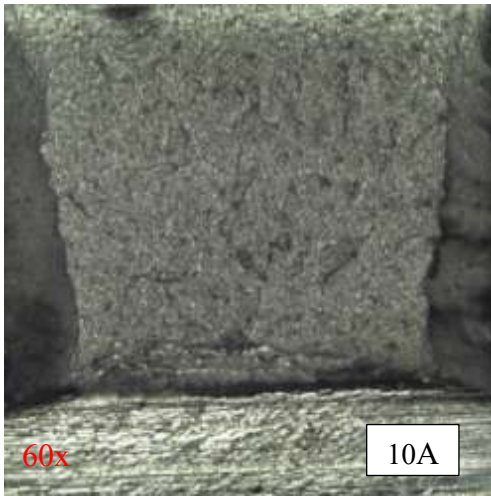
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba 0°C



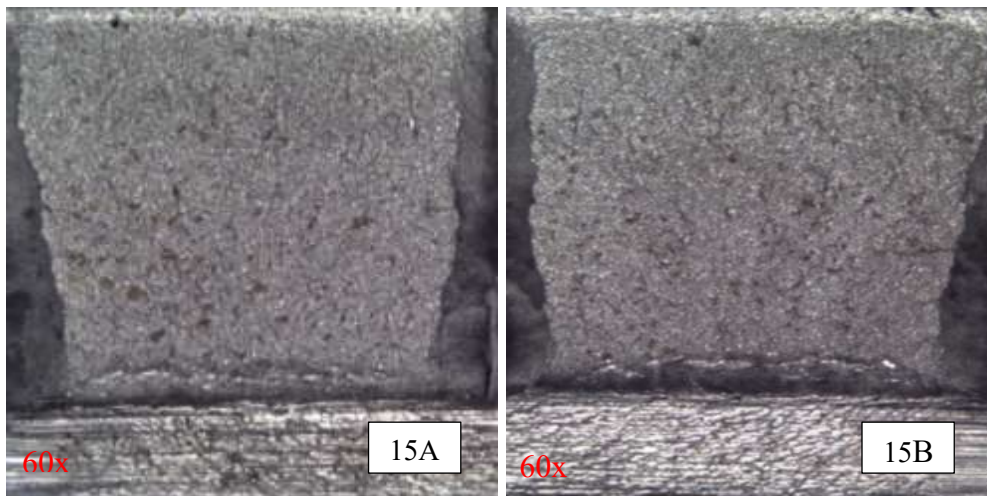
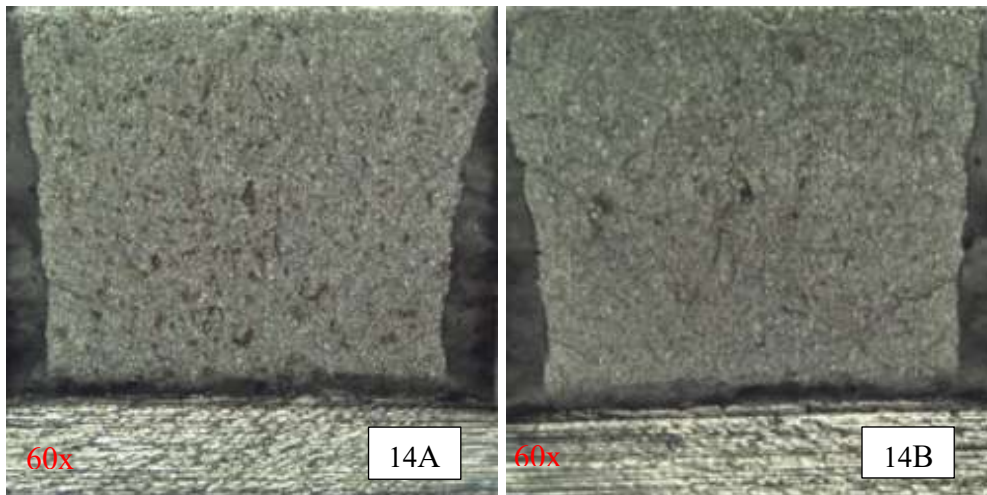
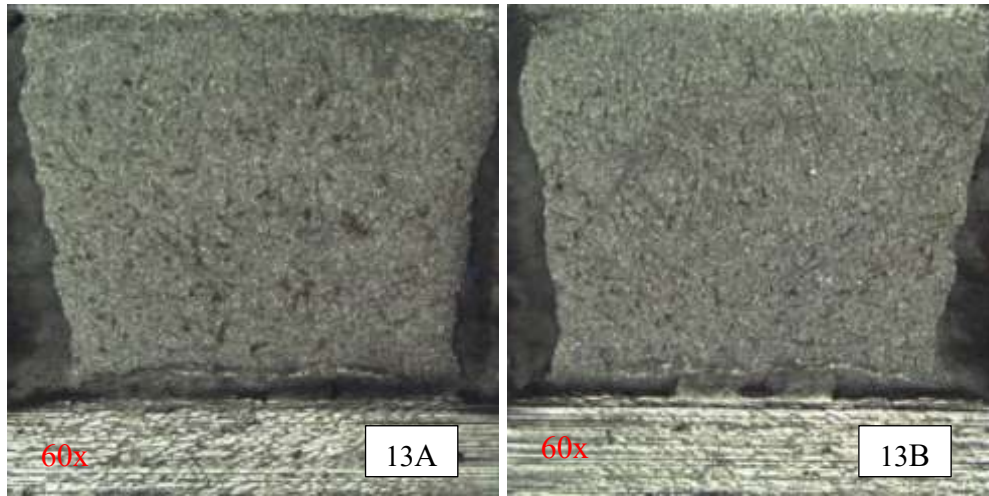
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -10°C



Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C

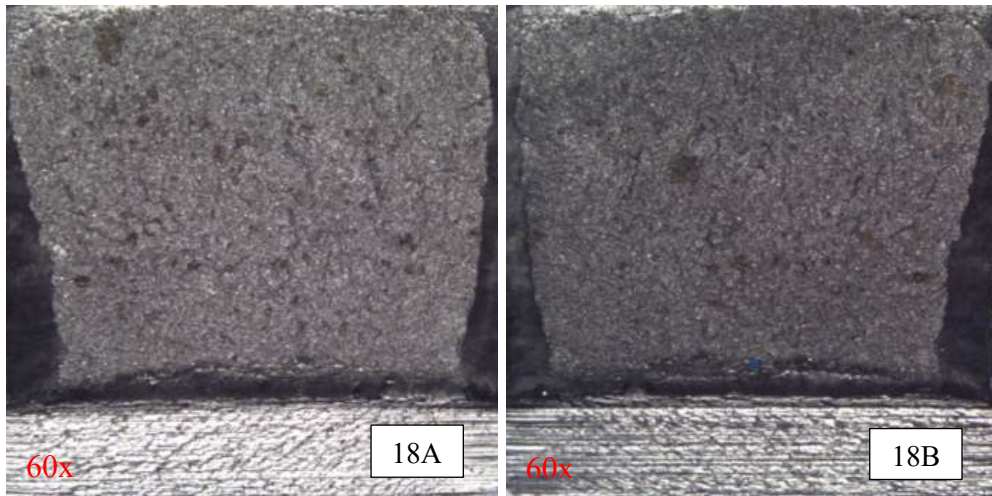
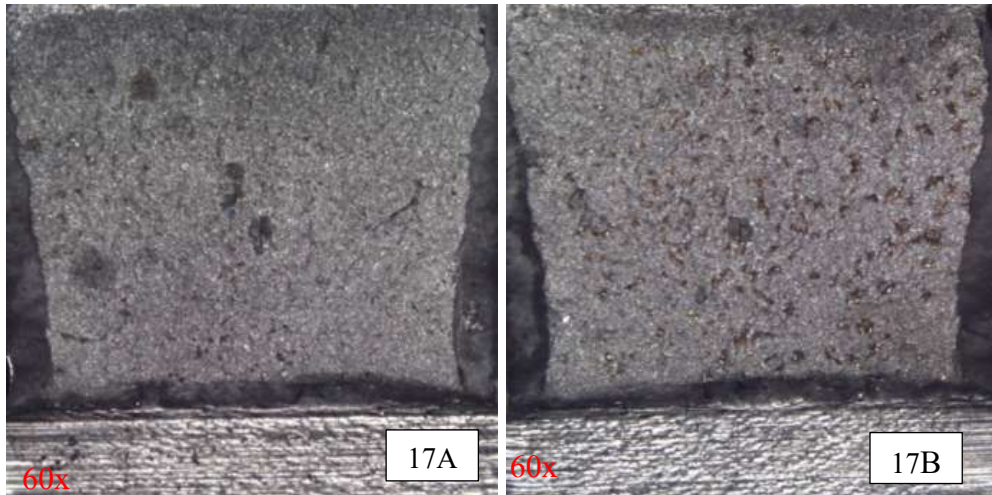
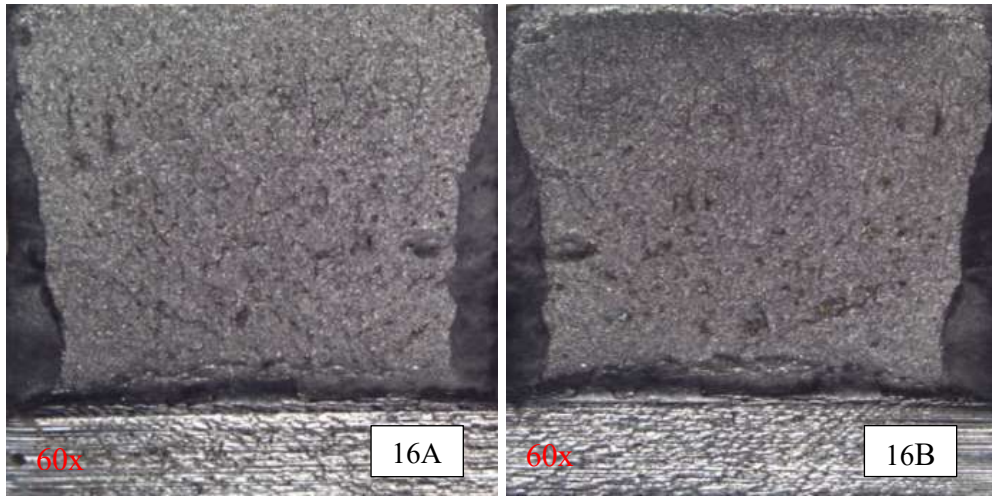


Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -30°C

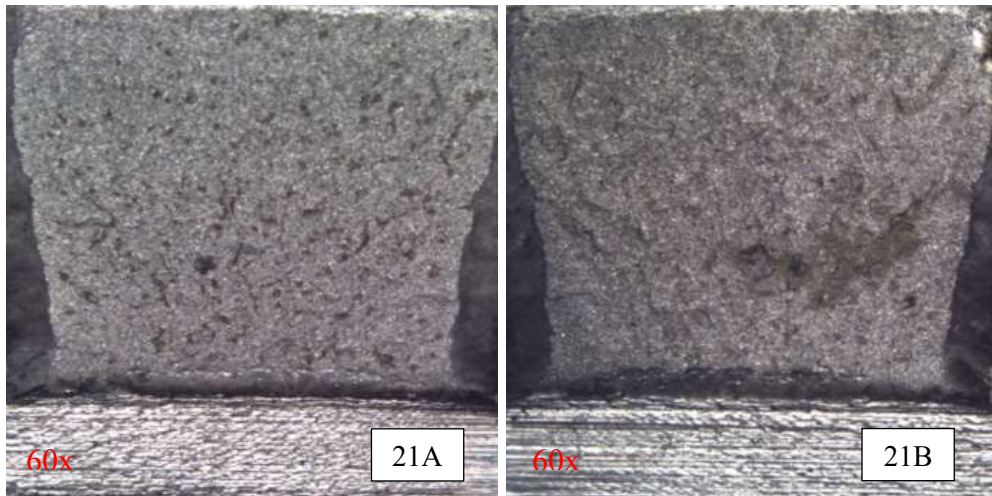
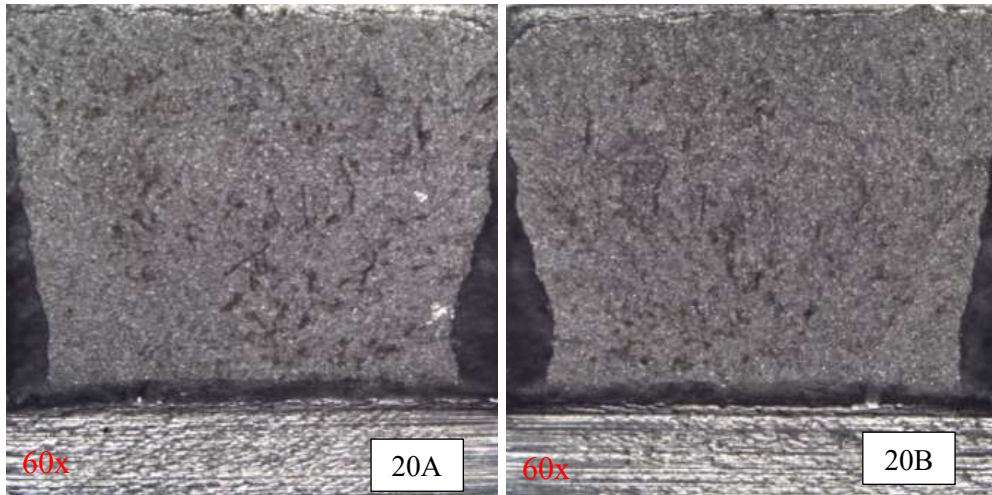
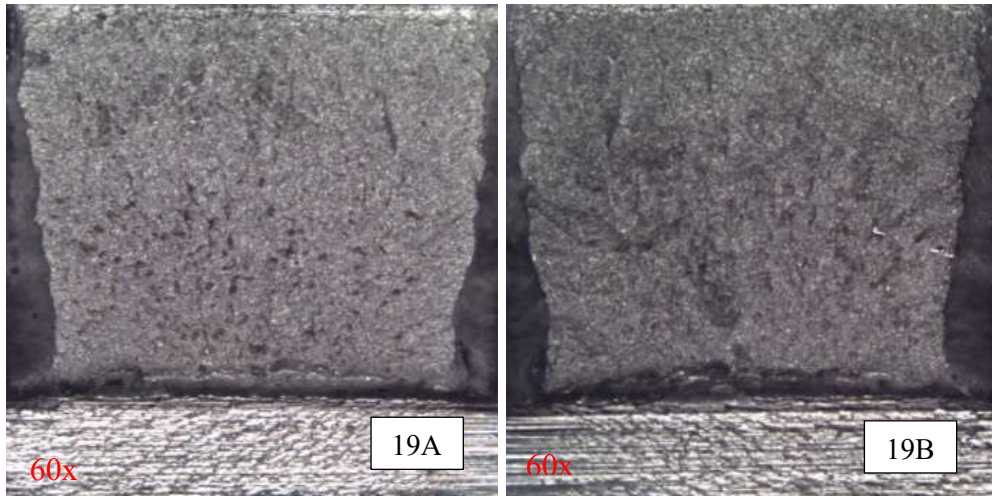




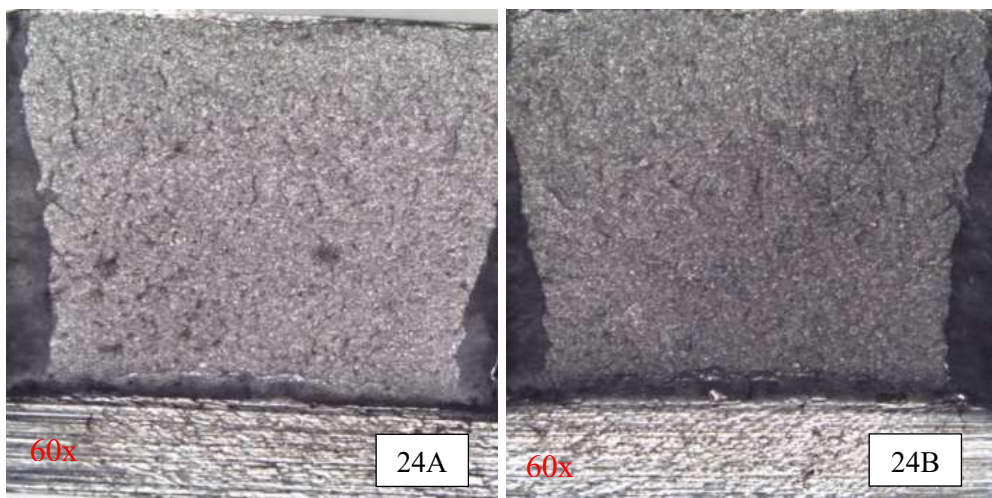
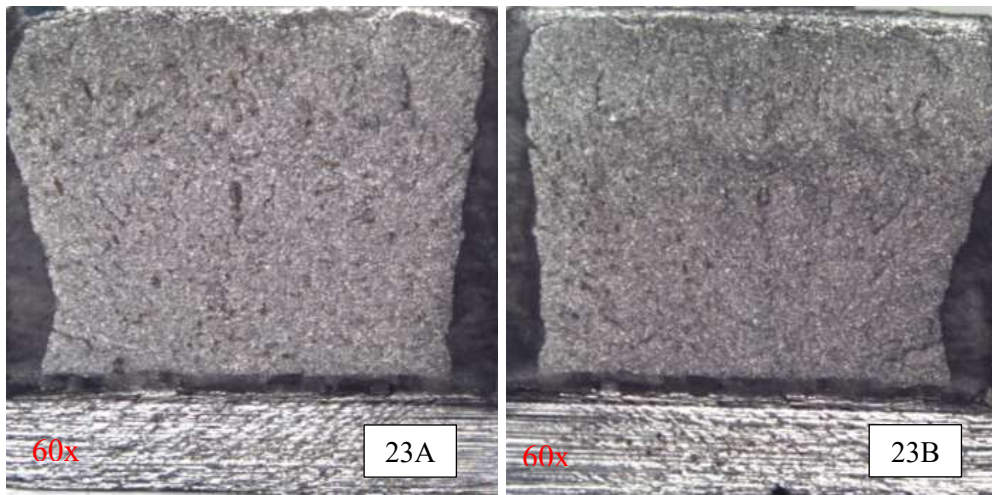
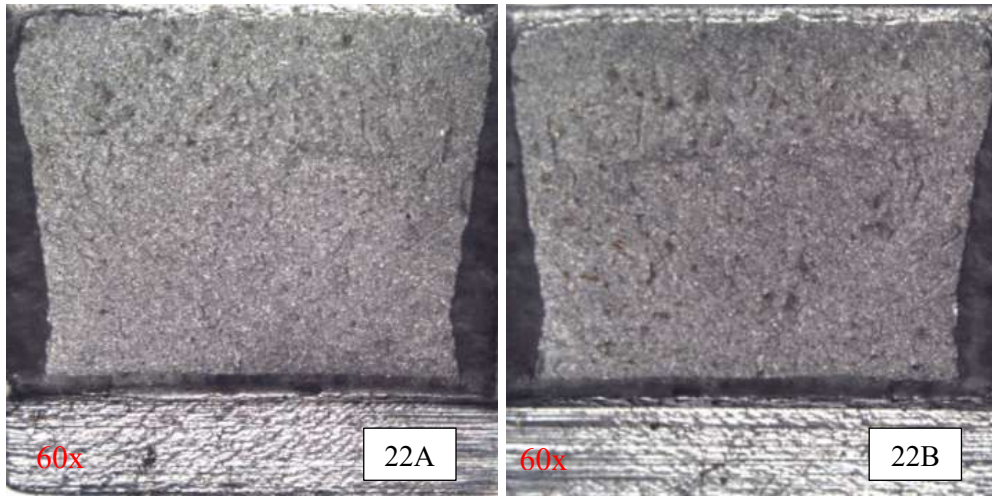
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -32°C



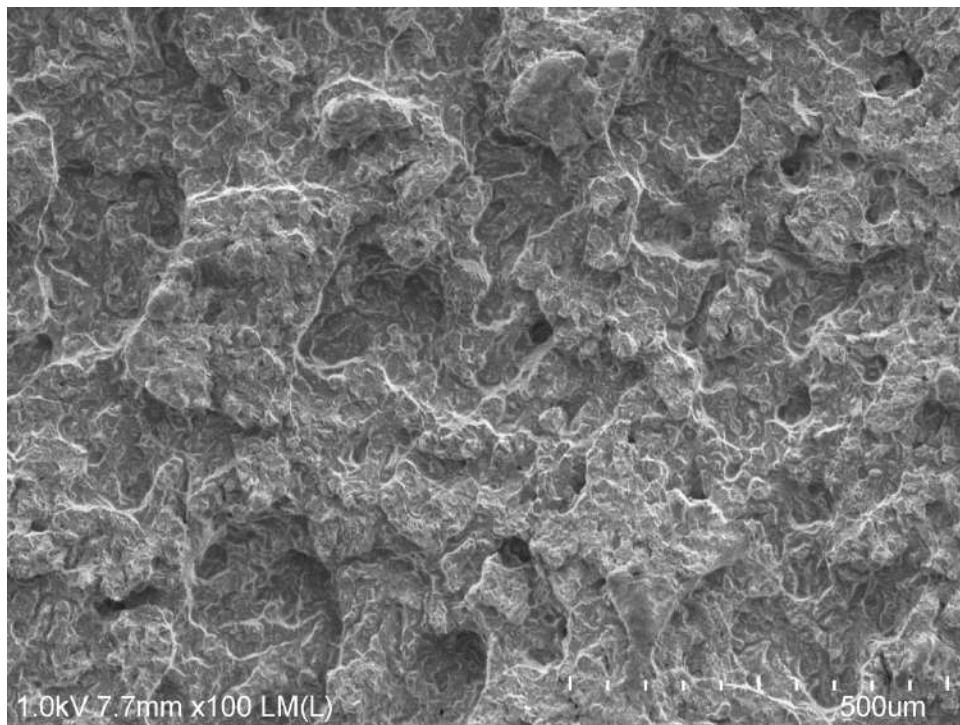
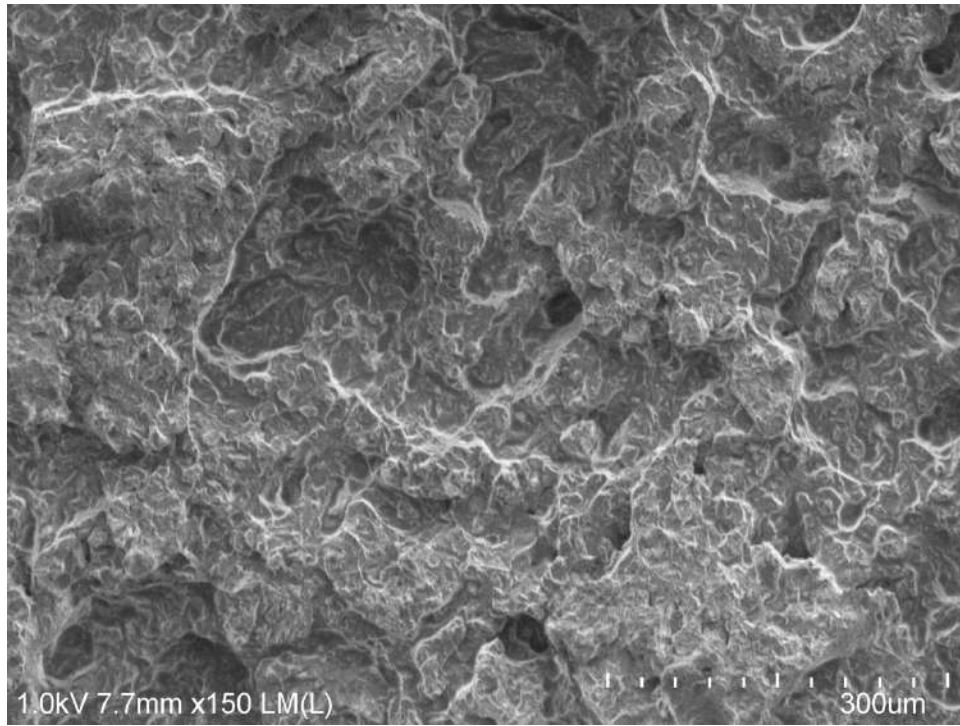
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -34°C



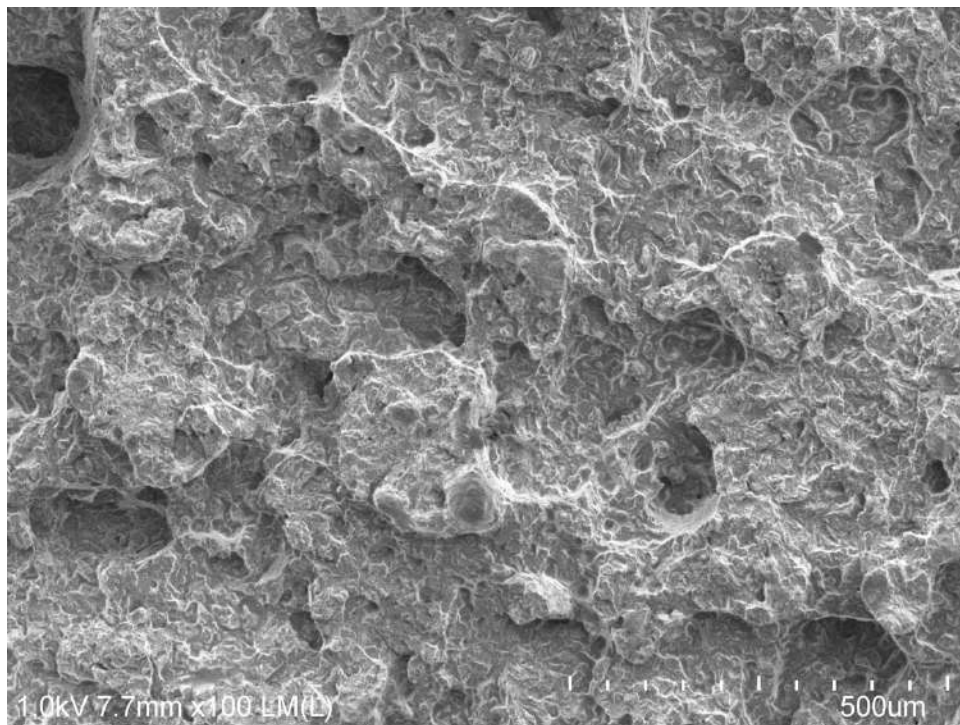
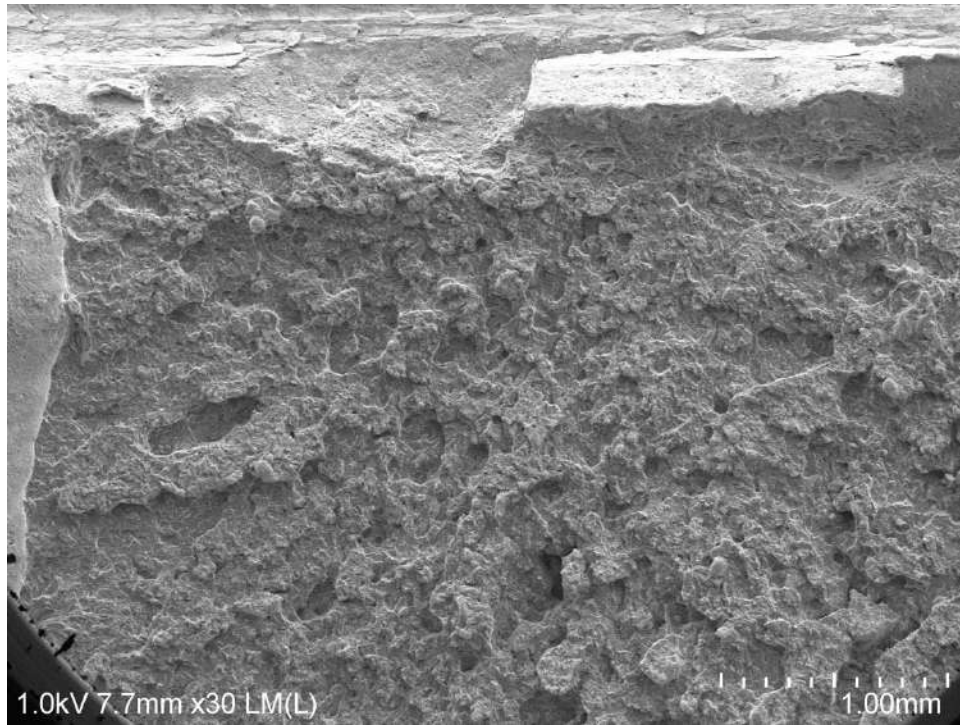
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



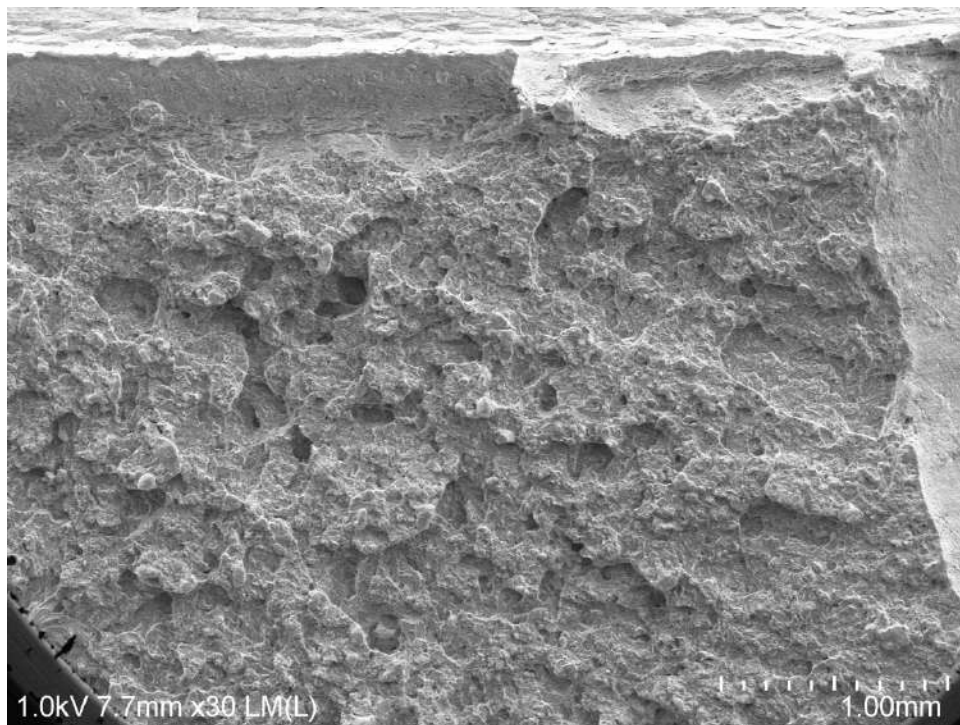
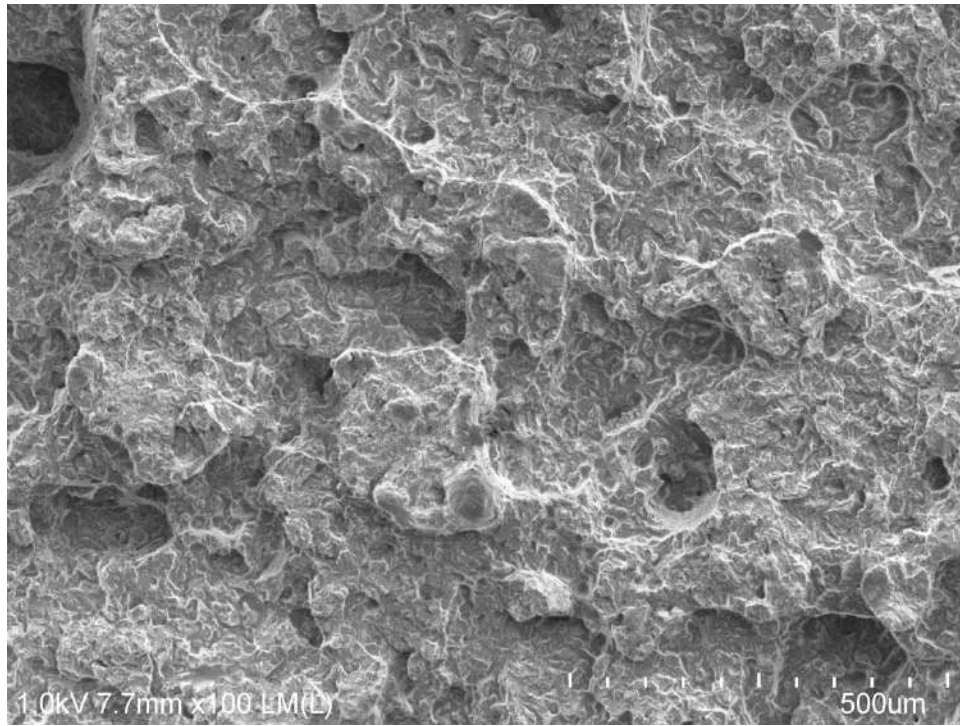
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



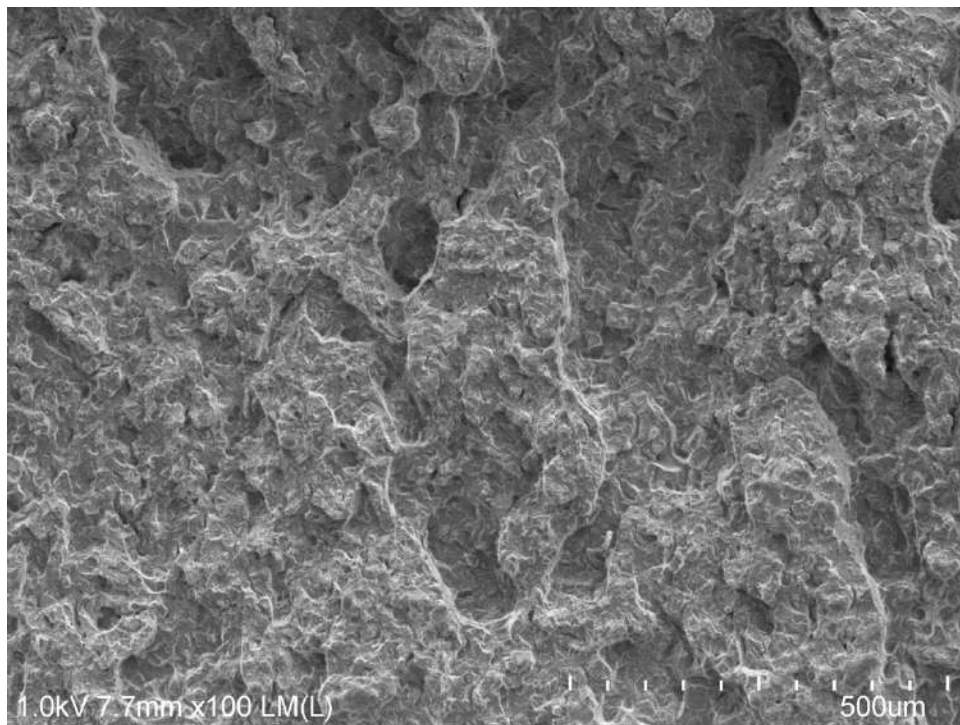
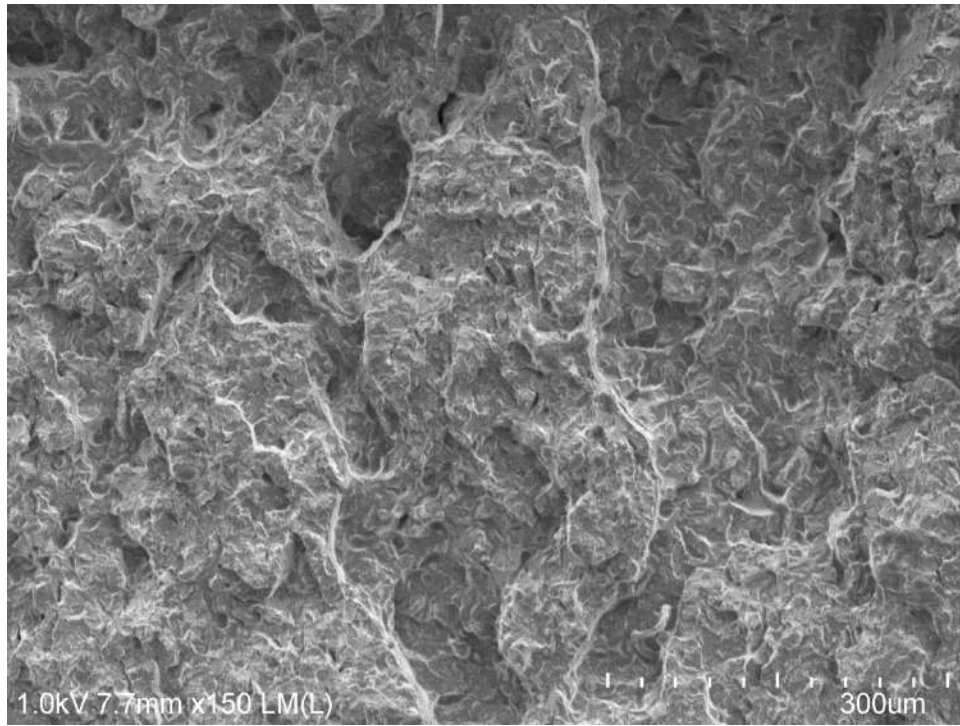
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



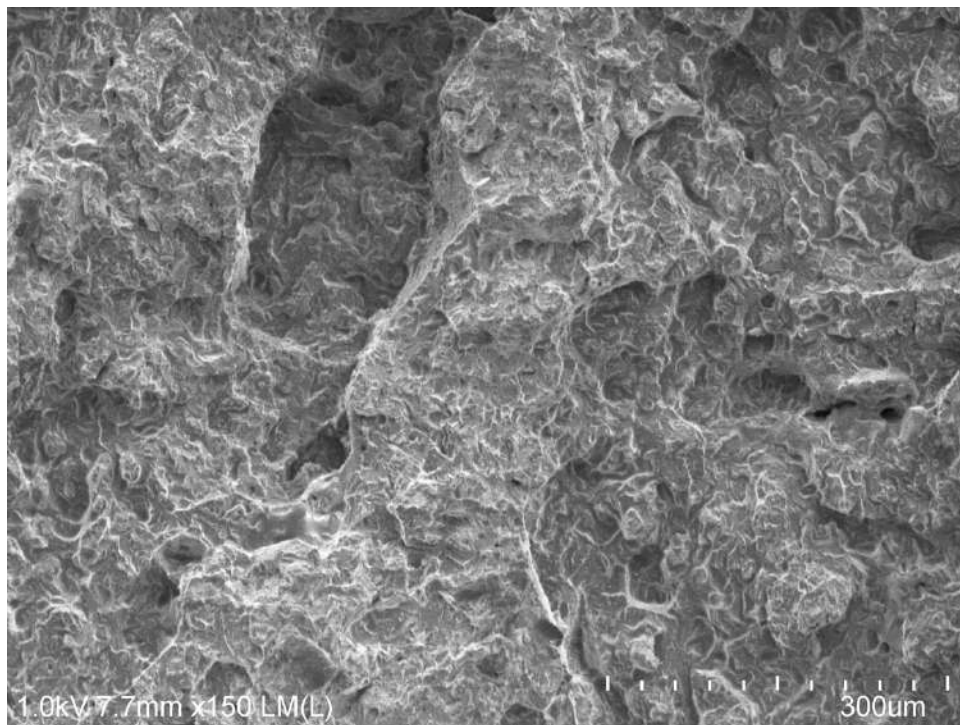
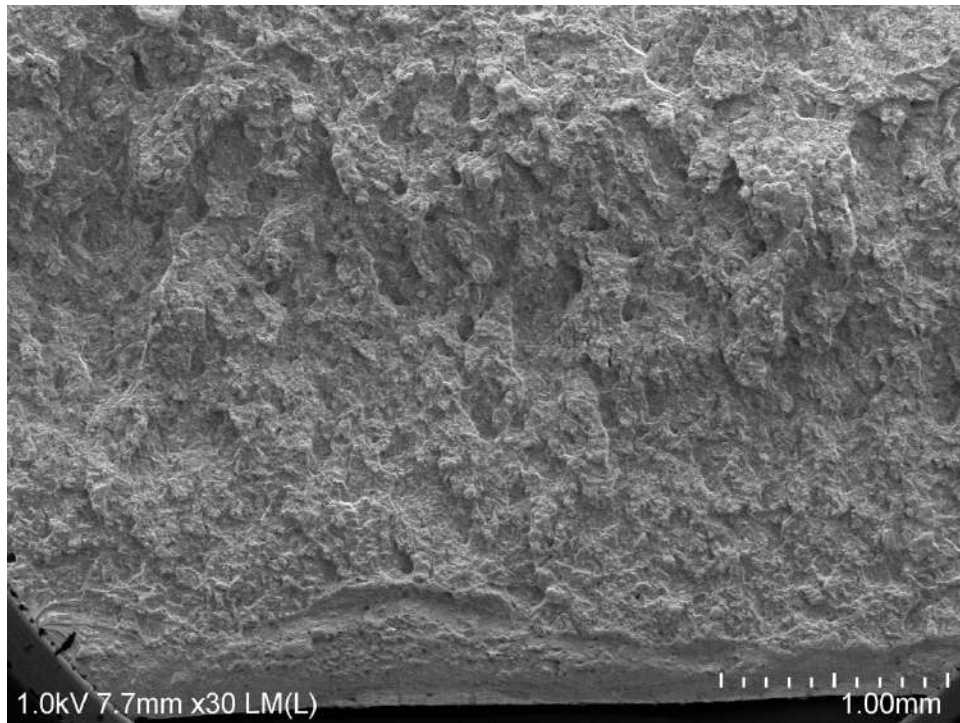
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C

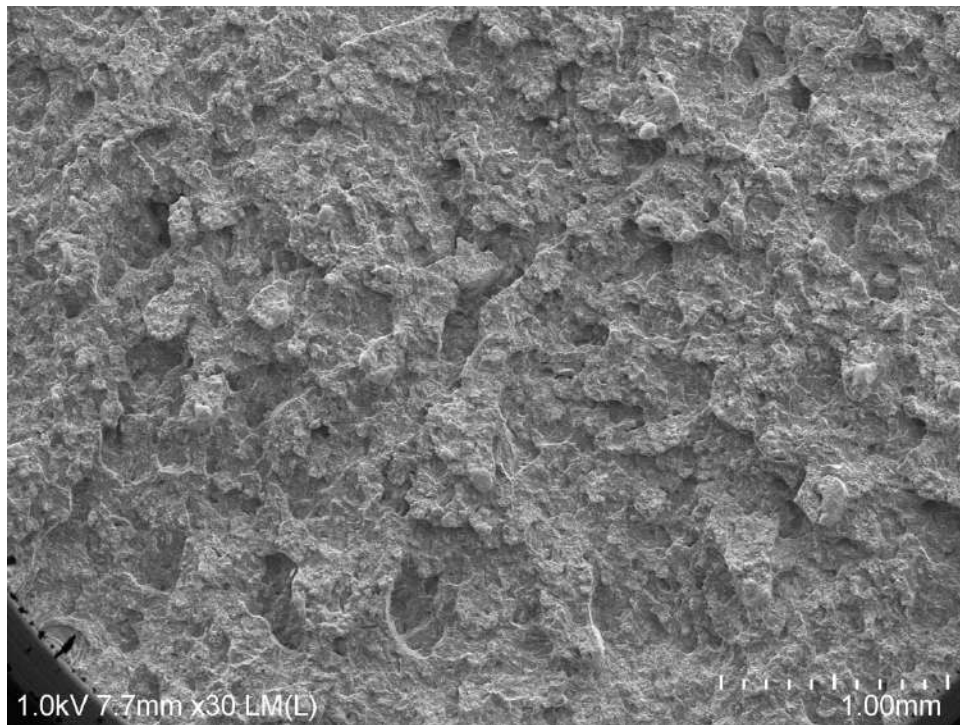
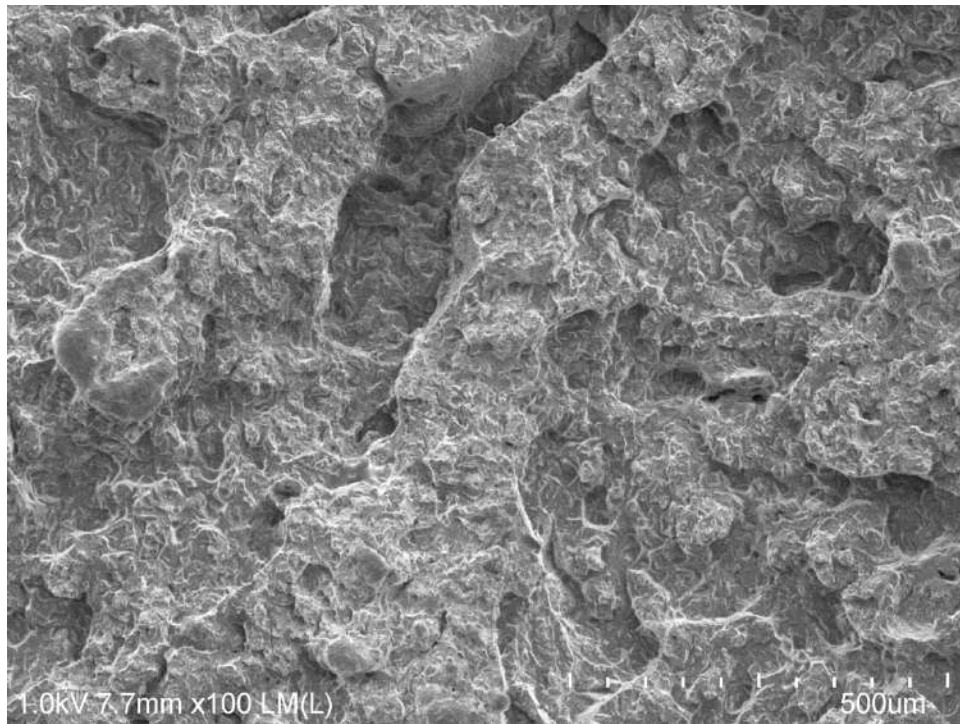


Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C

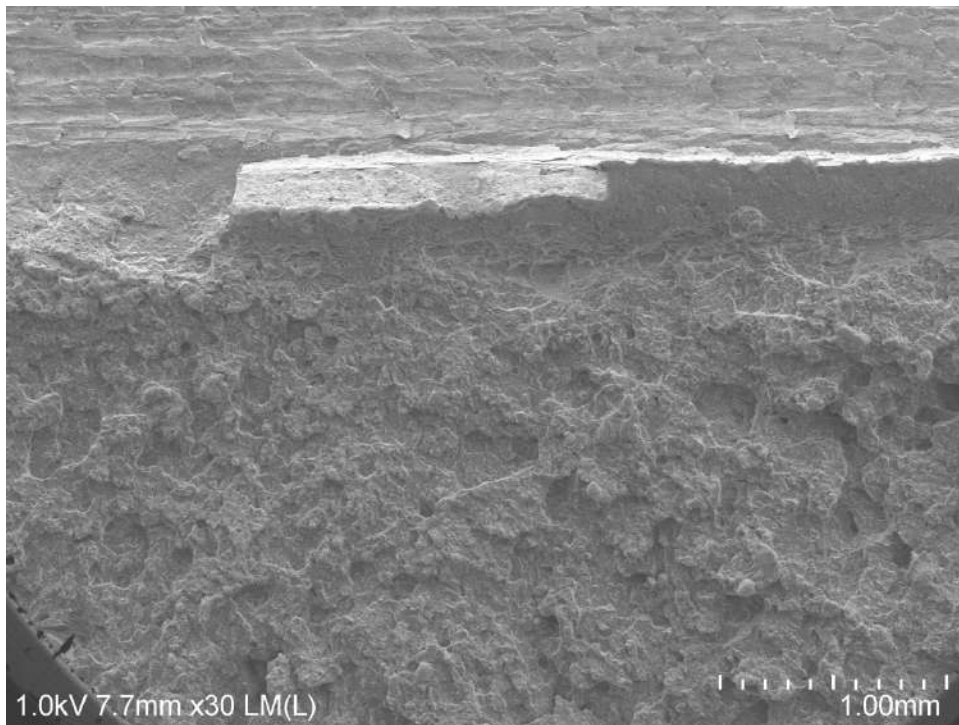
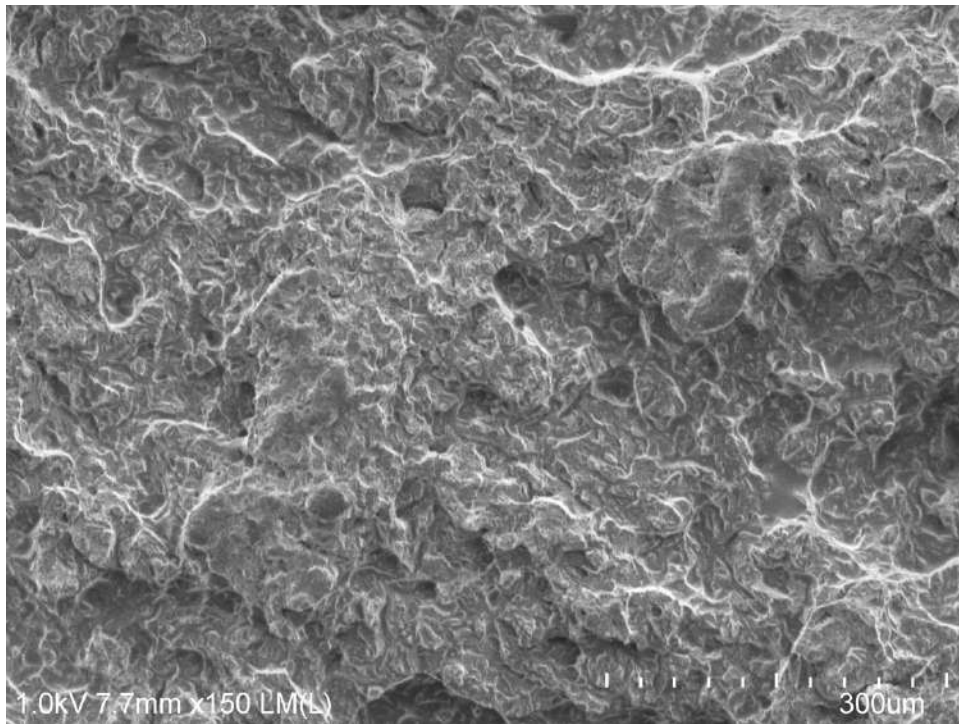




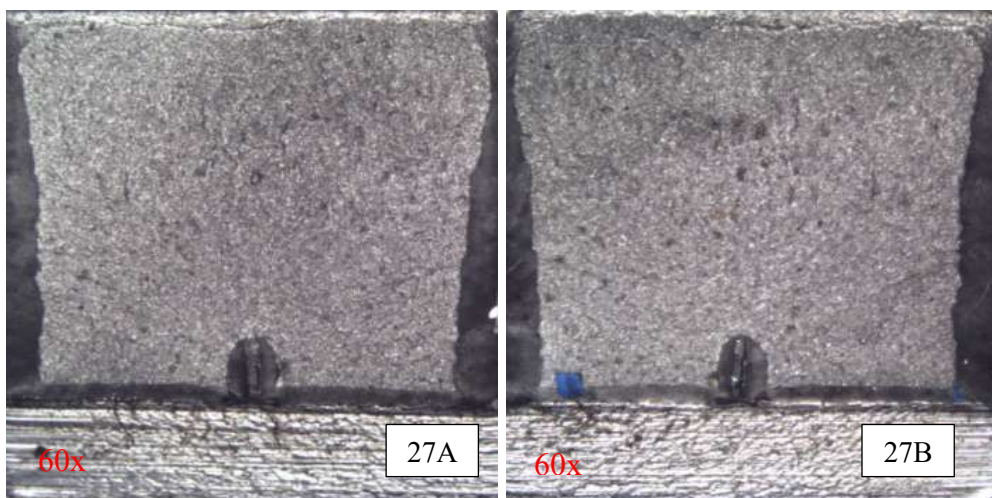
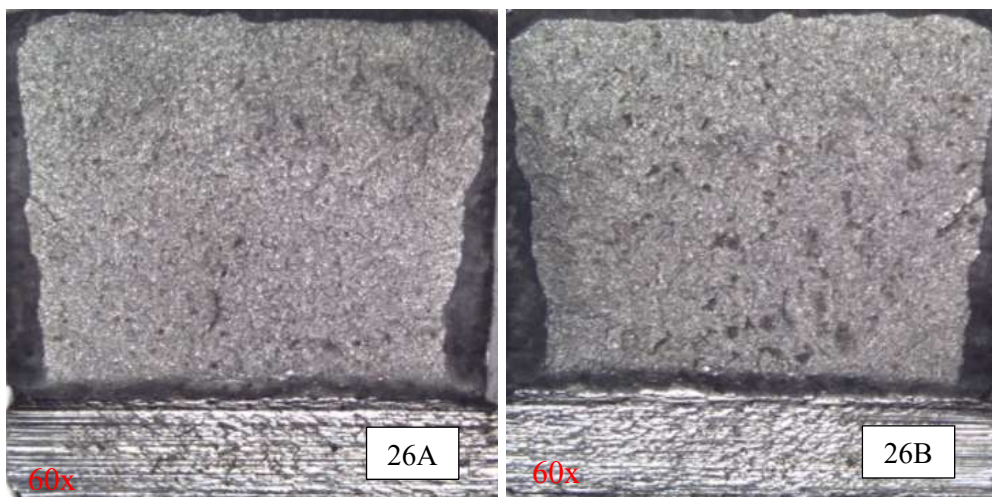
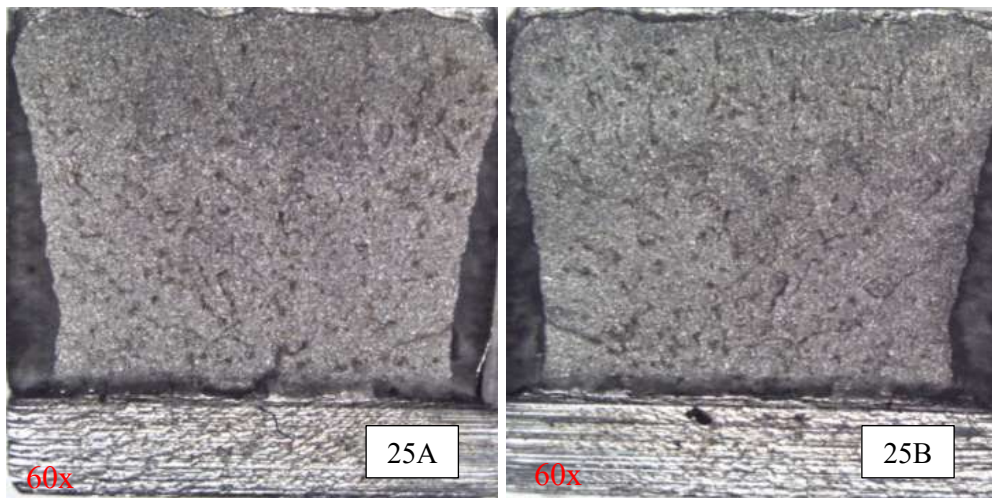
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



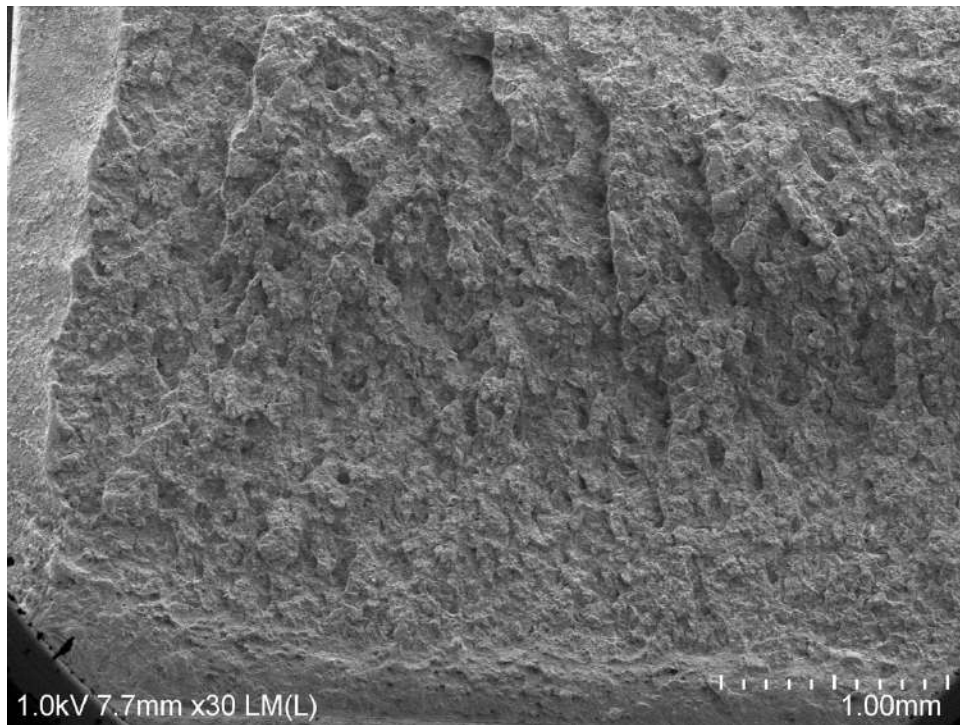
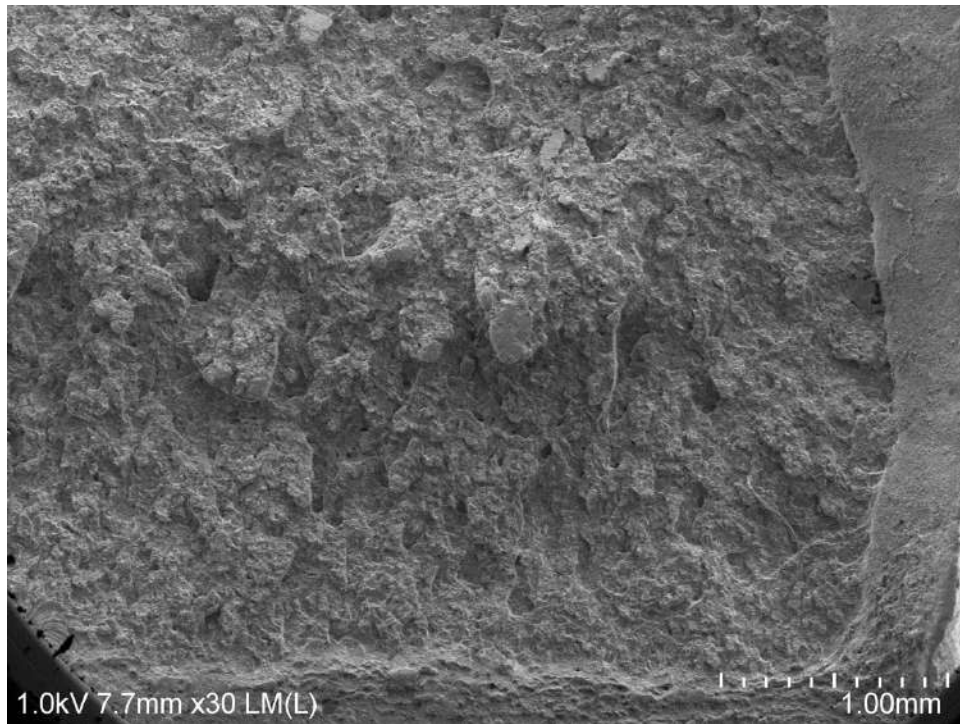
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -35°C



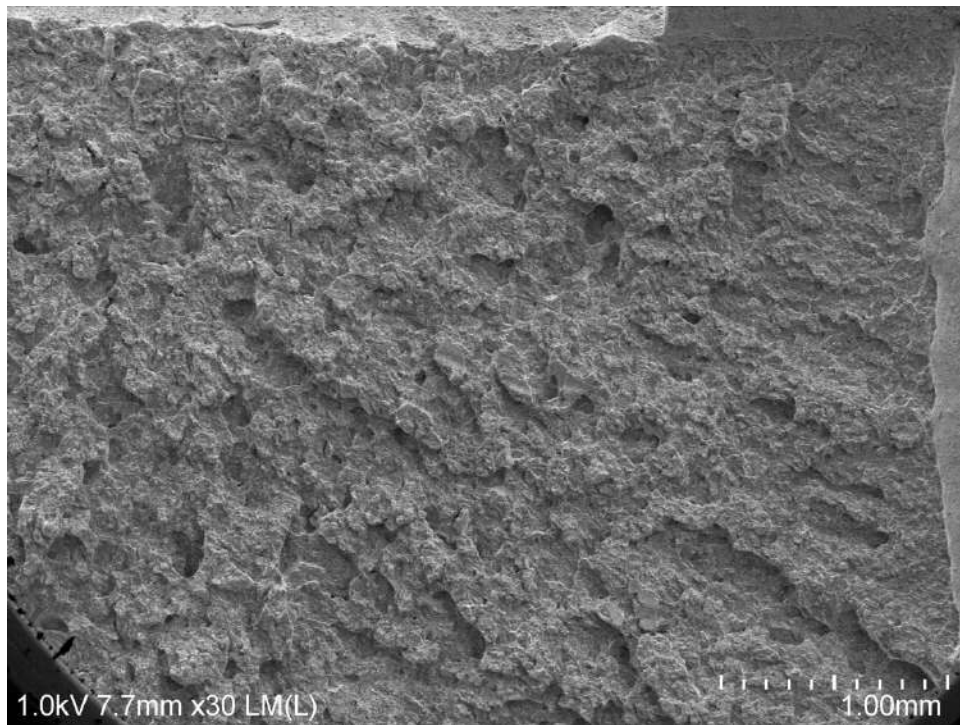
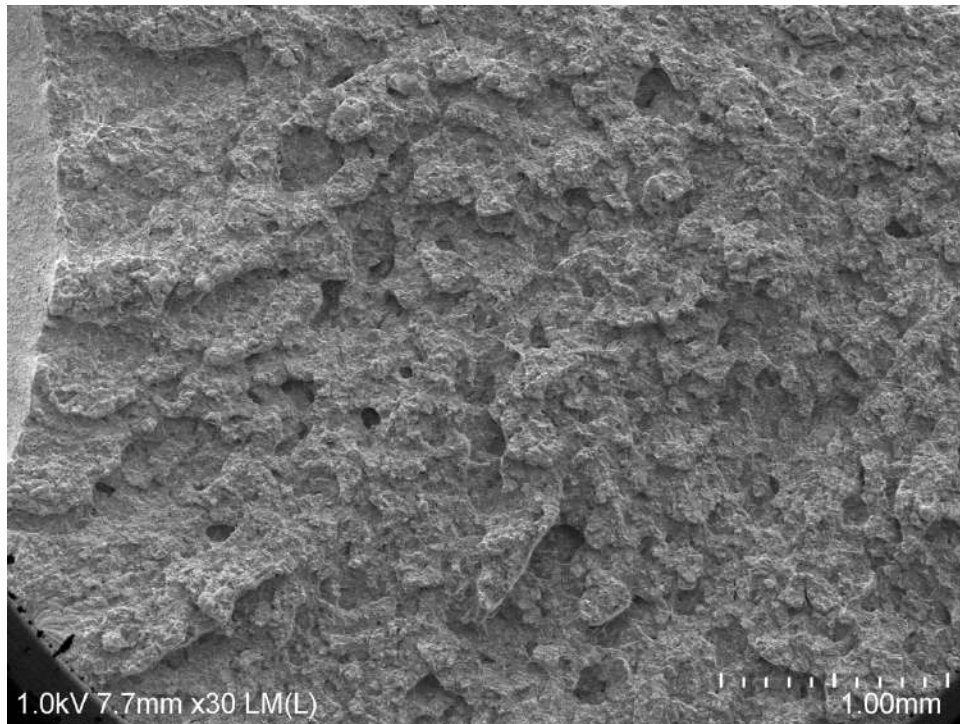
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



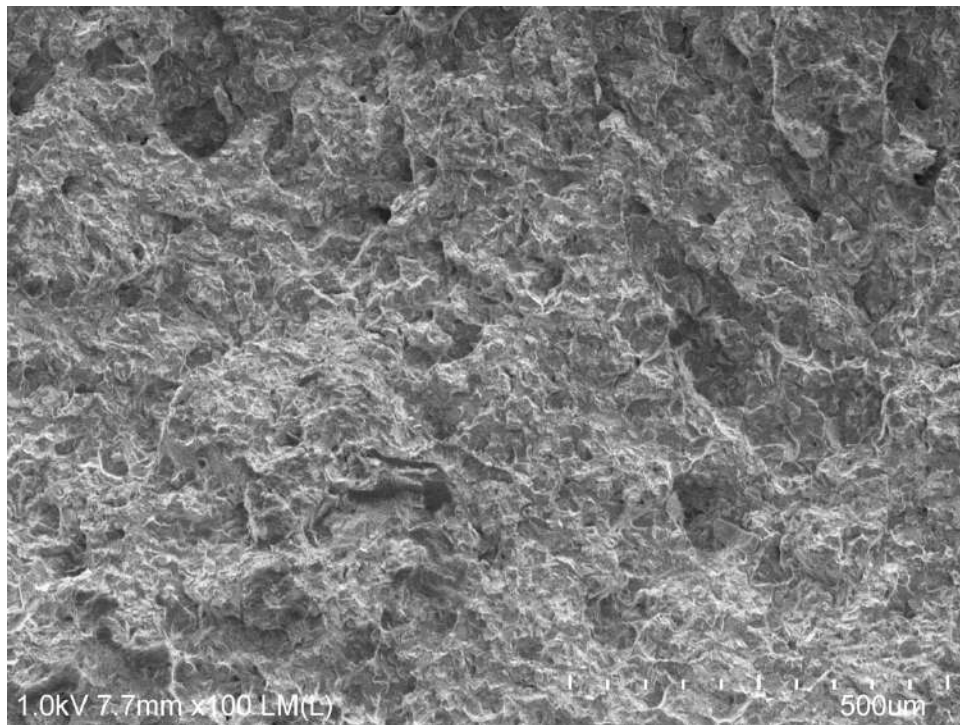
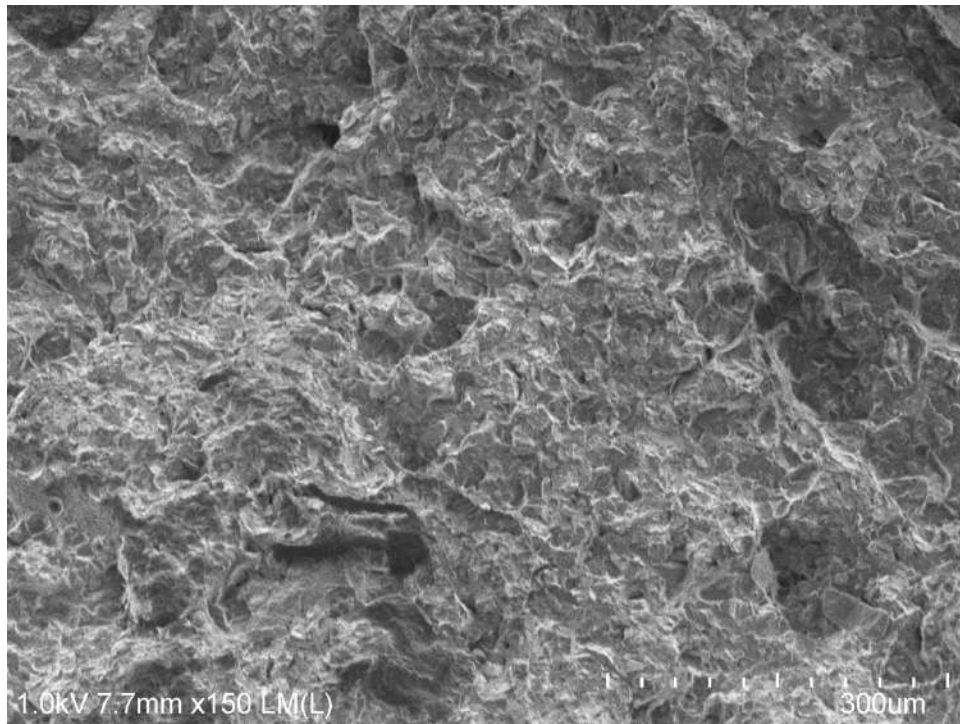
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



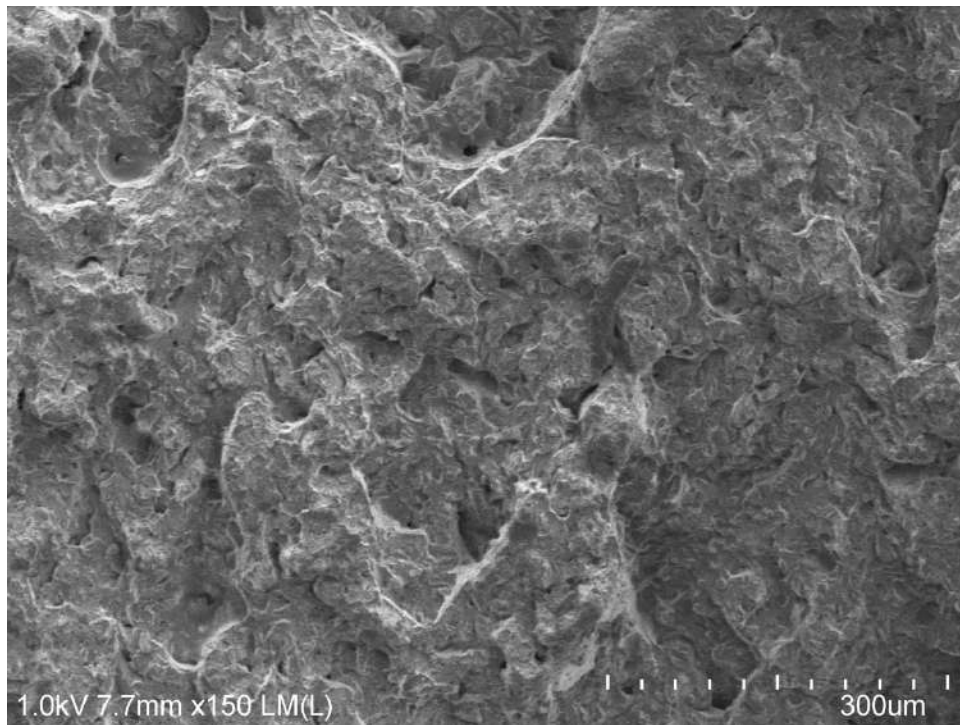
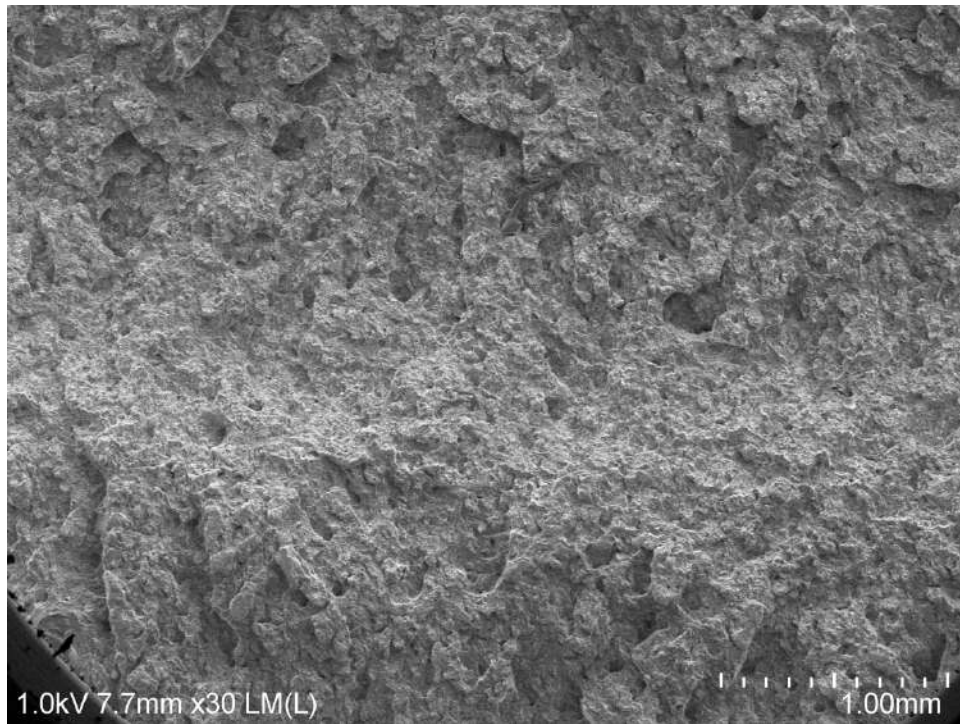
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



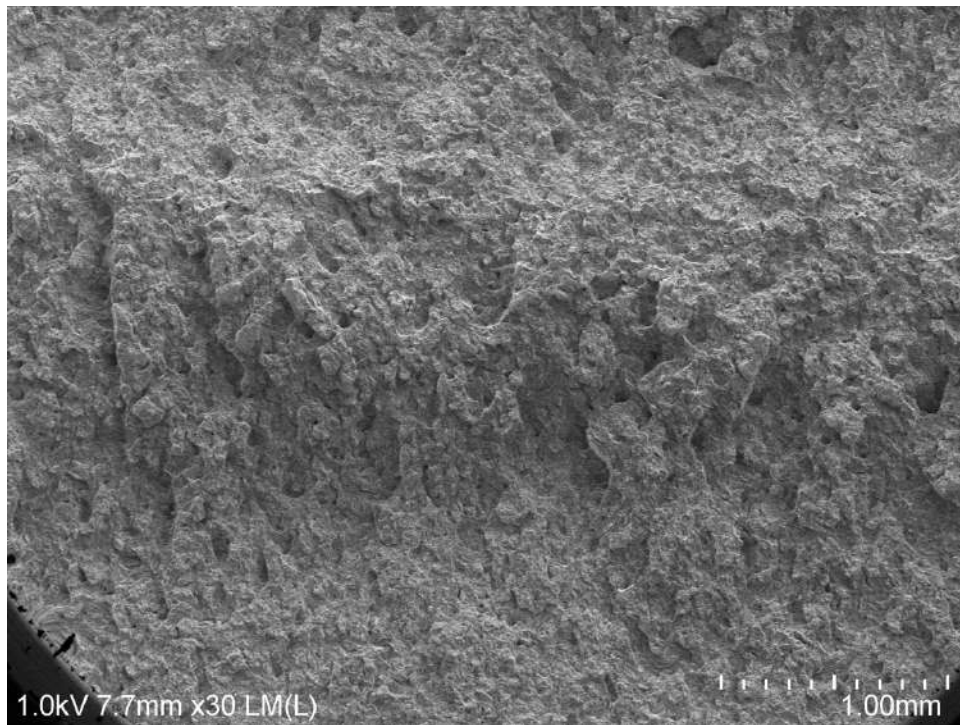
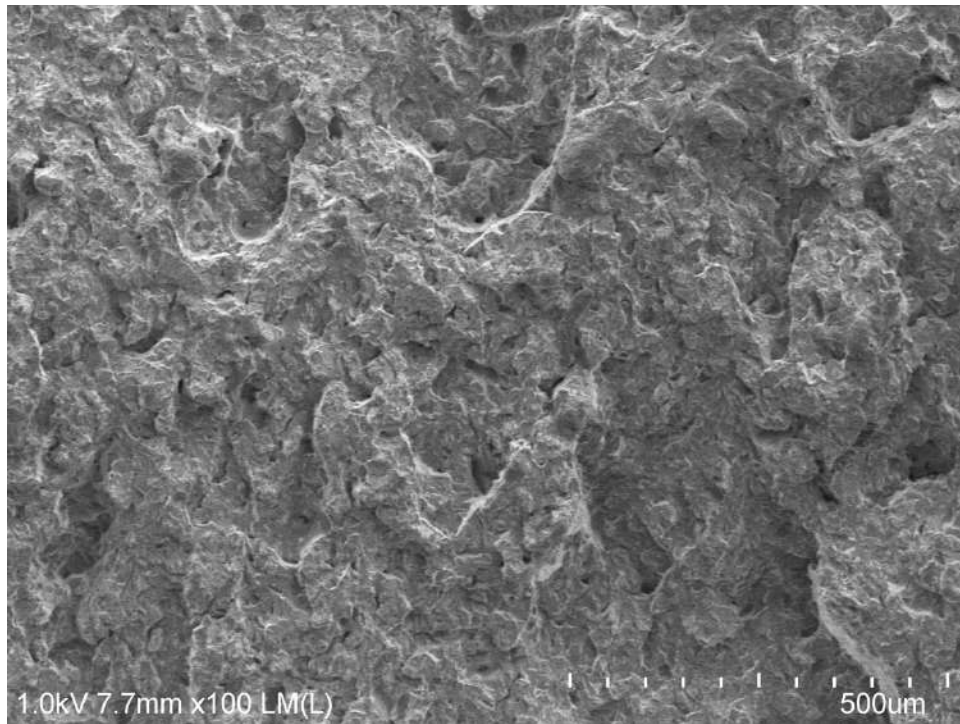
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C

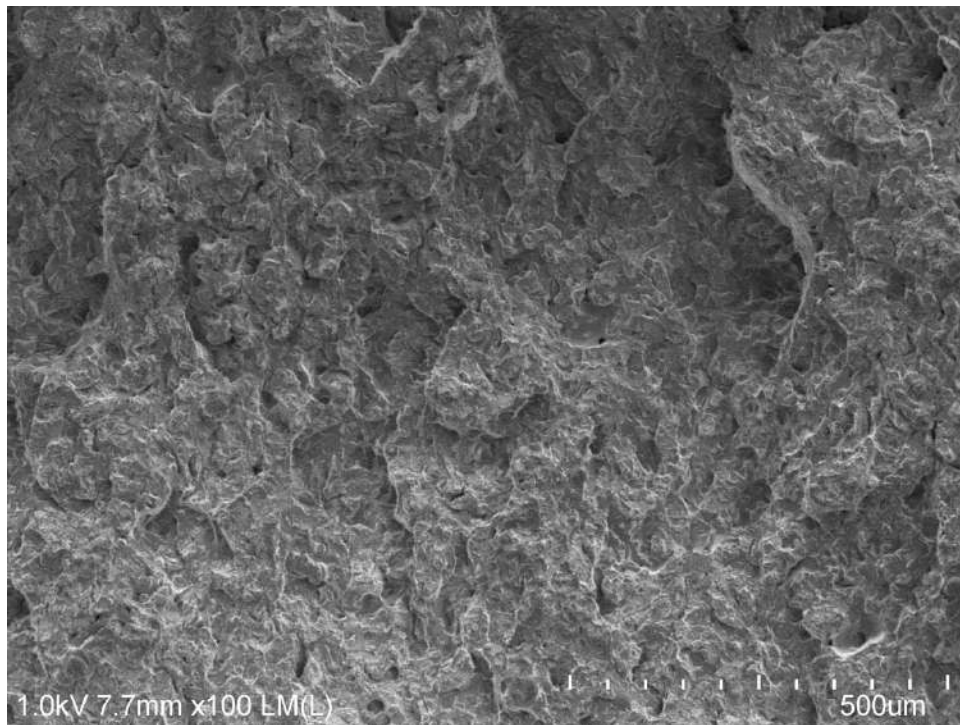
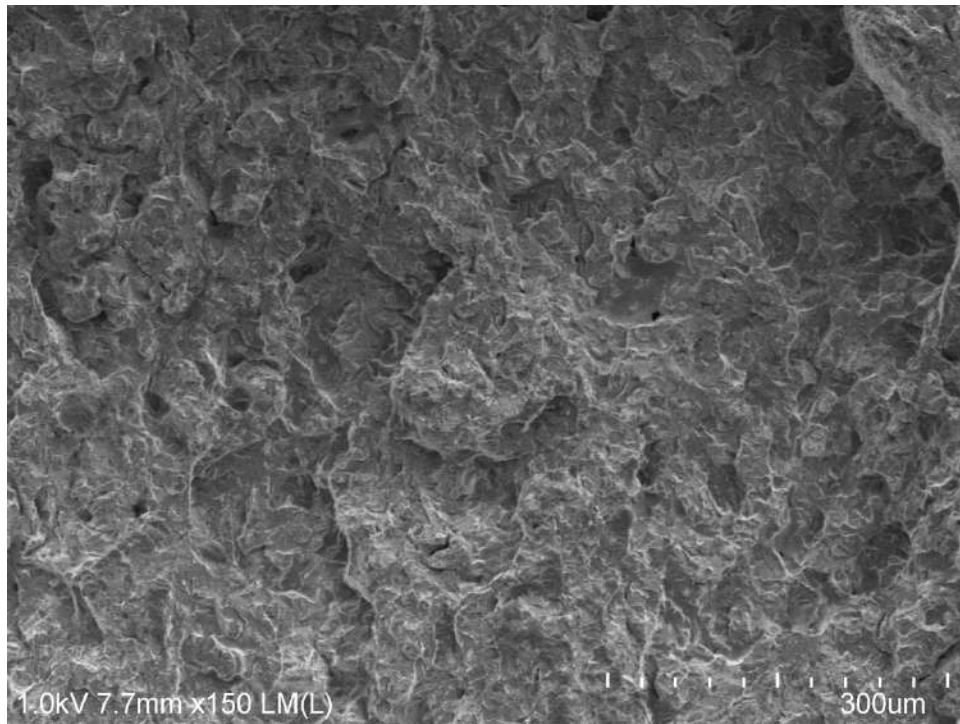


Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C

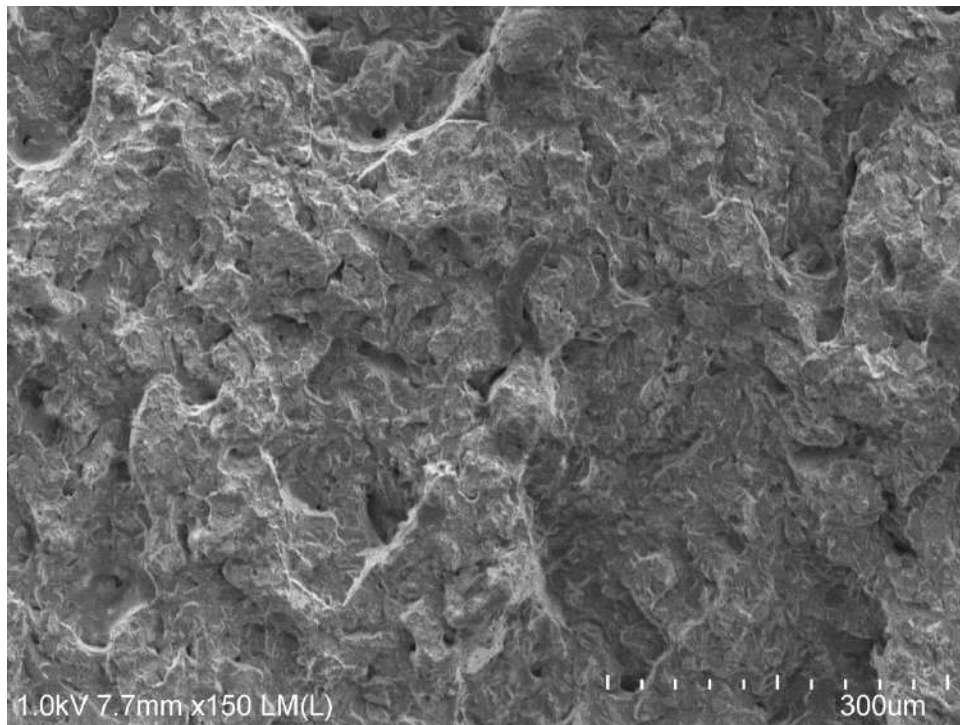
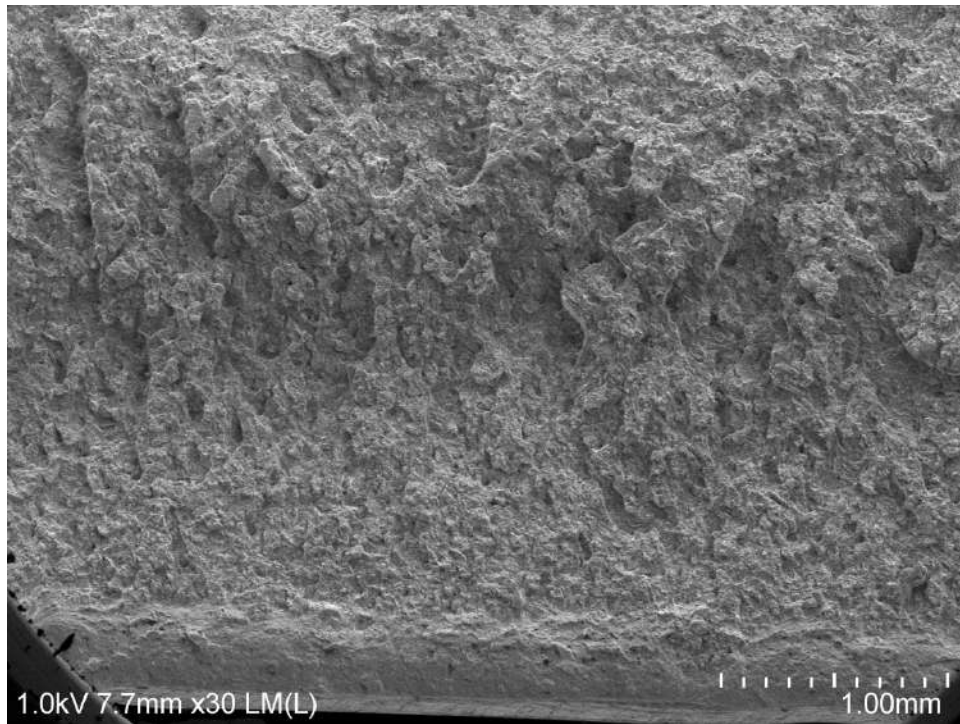




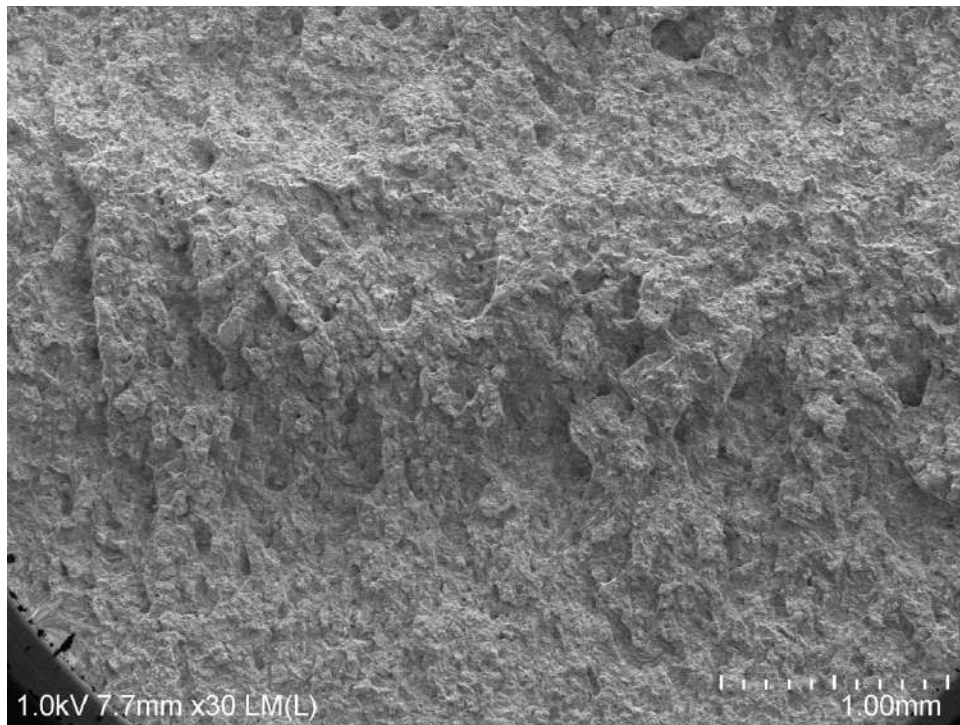
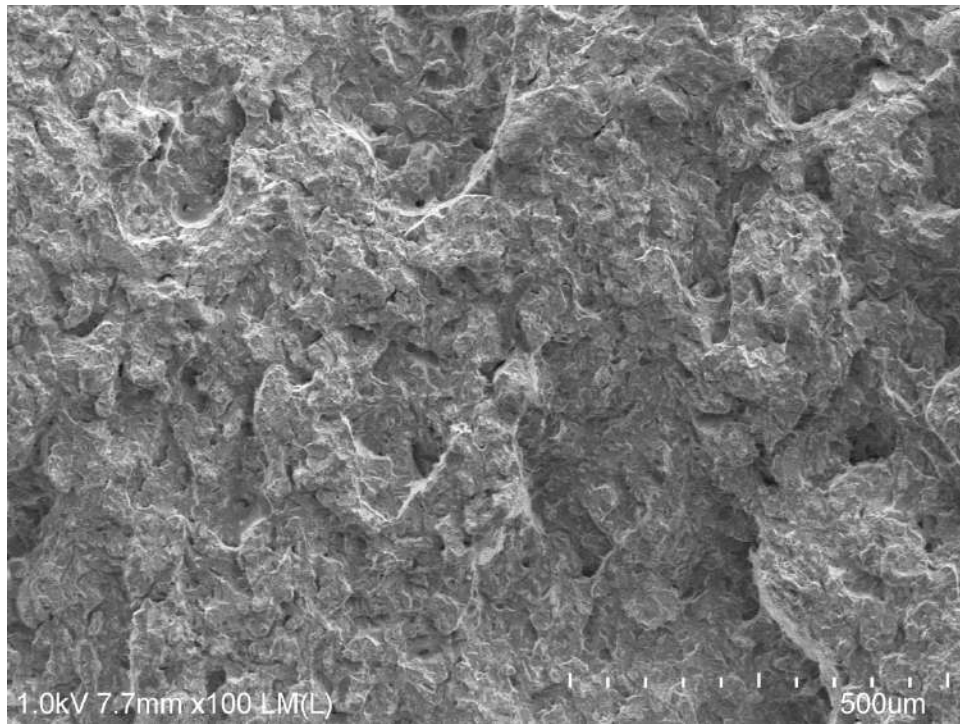
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



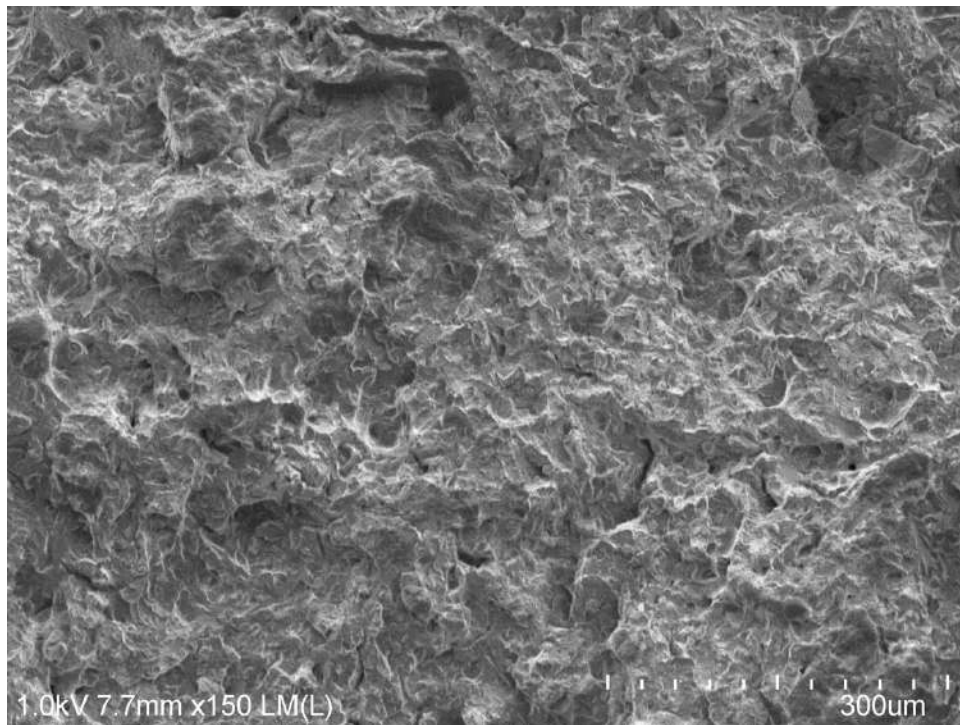
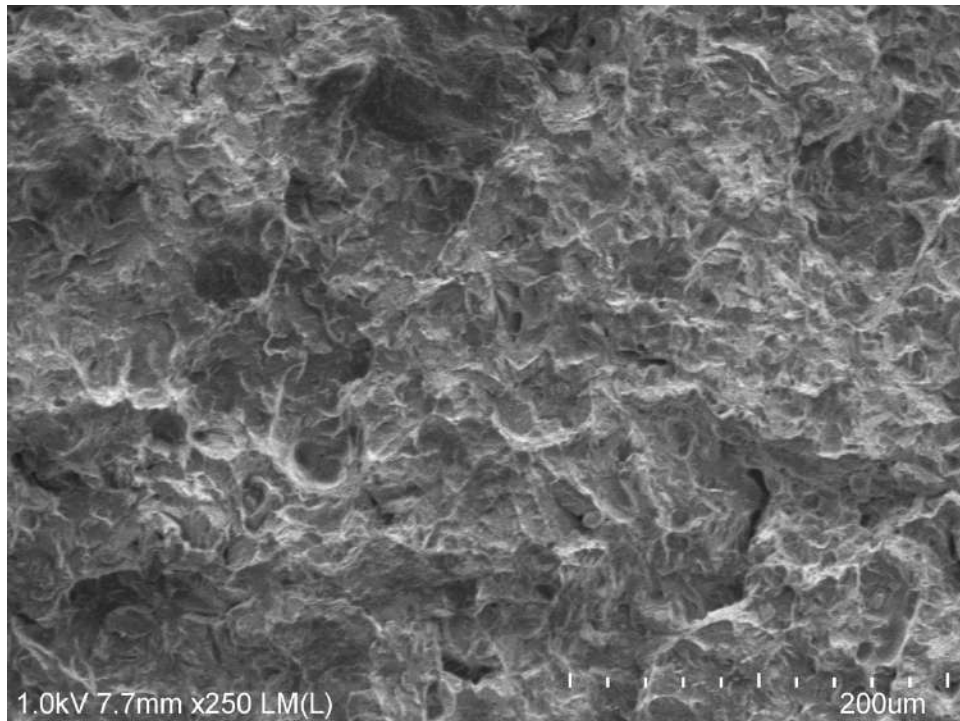
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



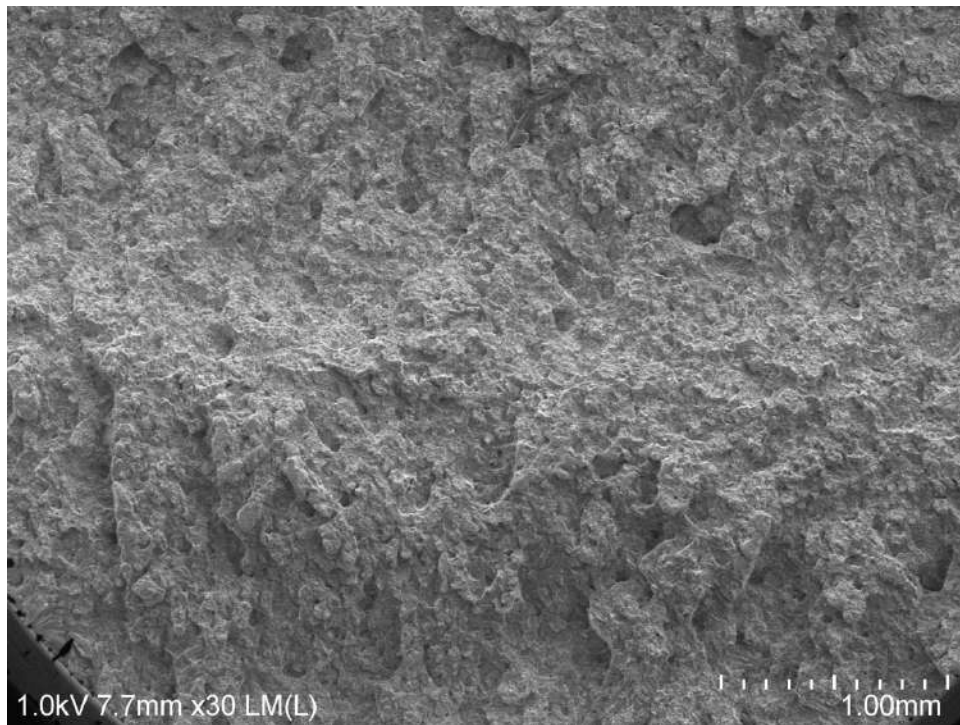
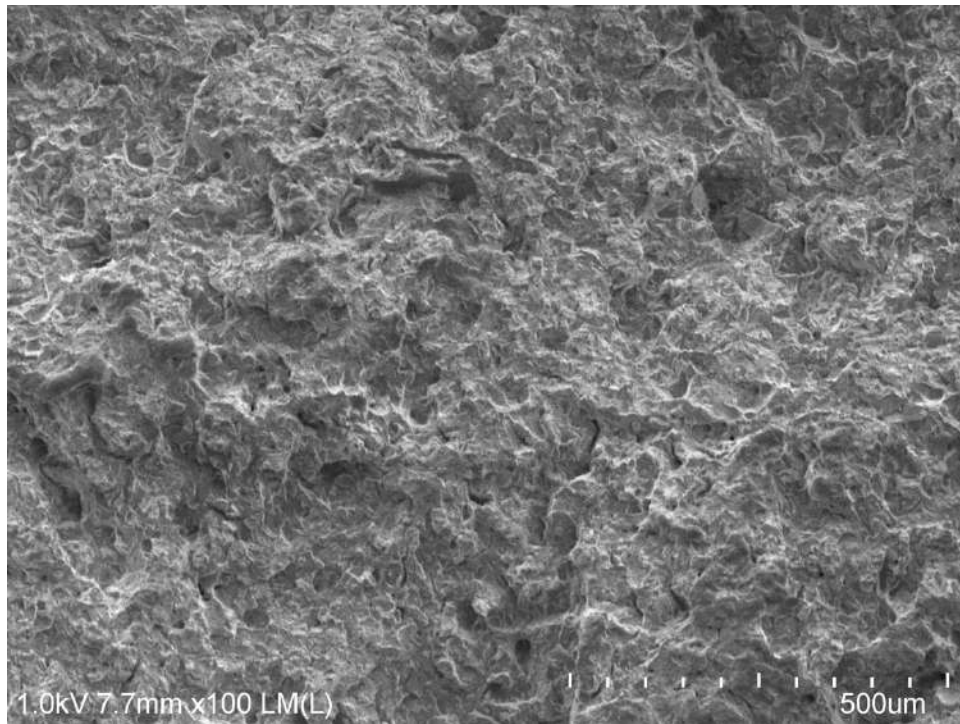
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



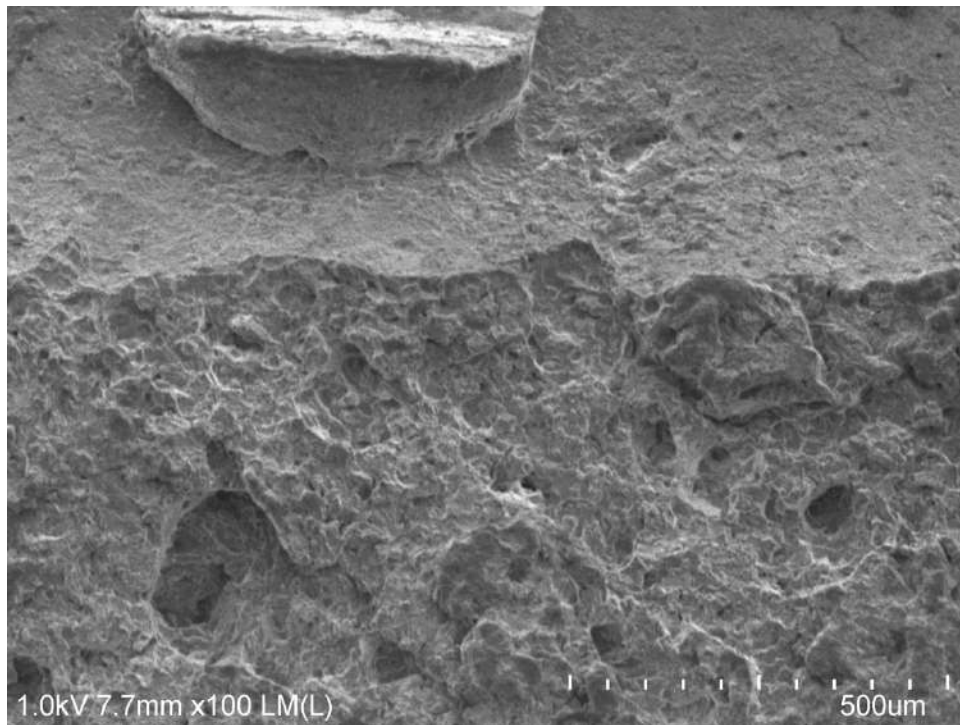
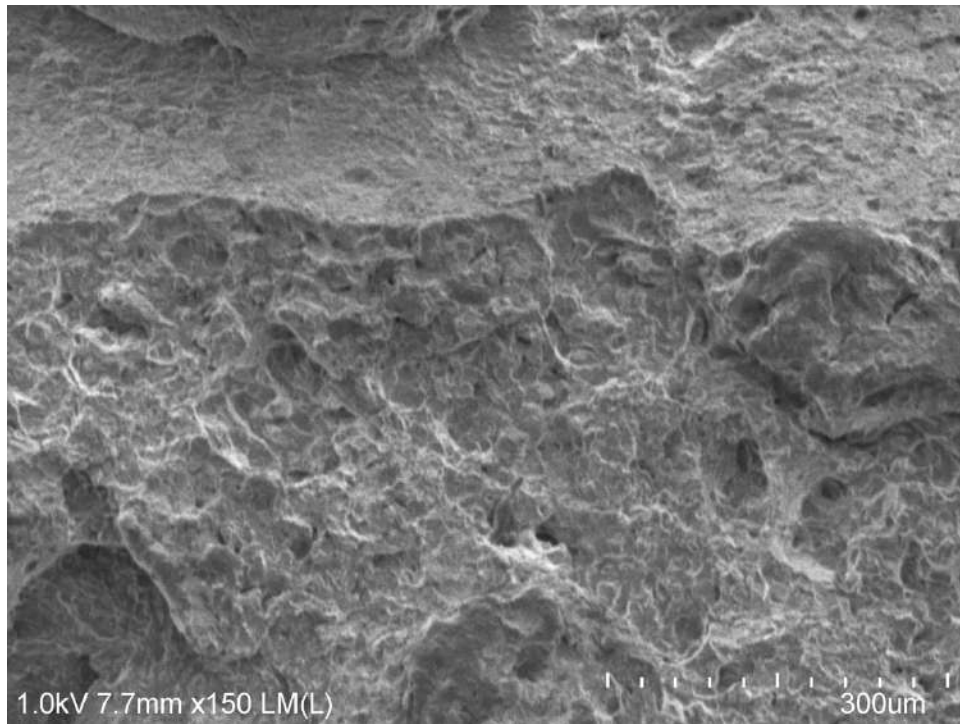
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



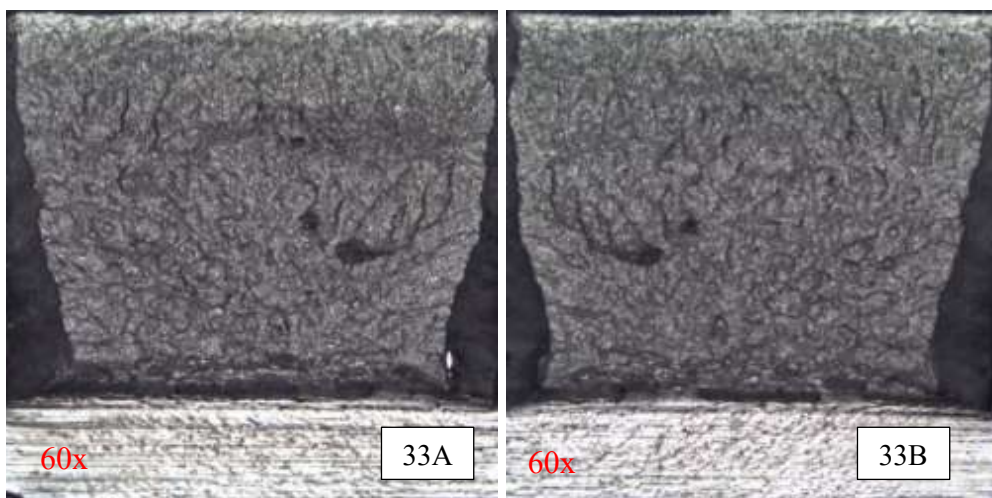
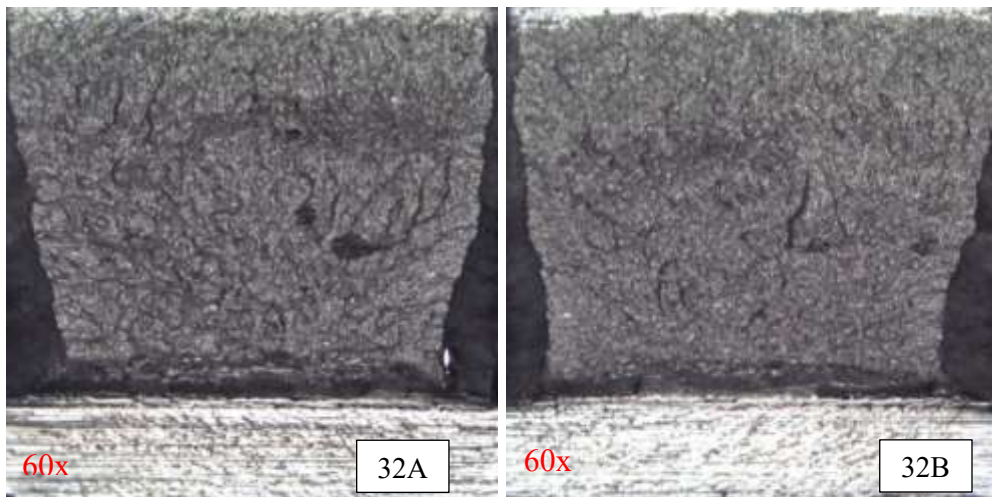
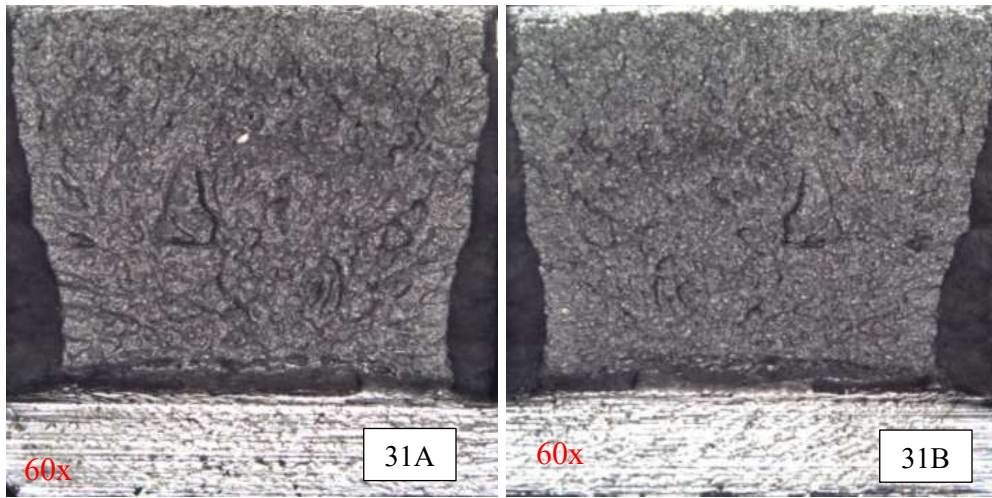
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



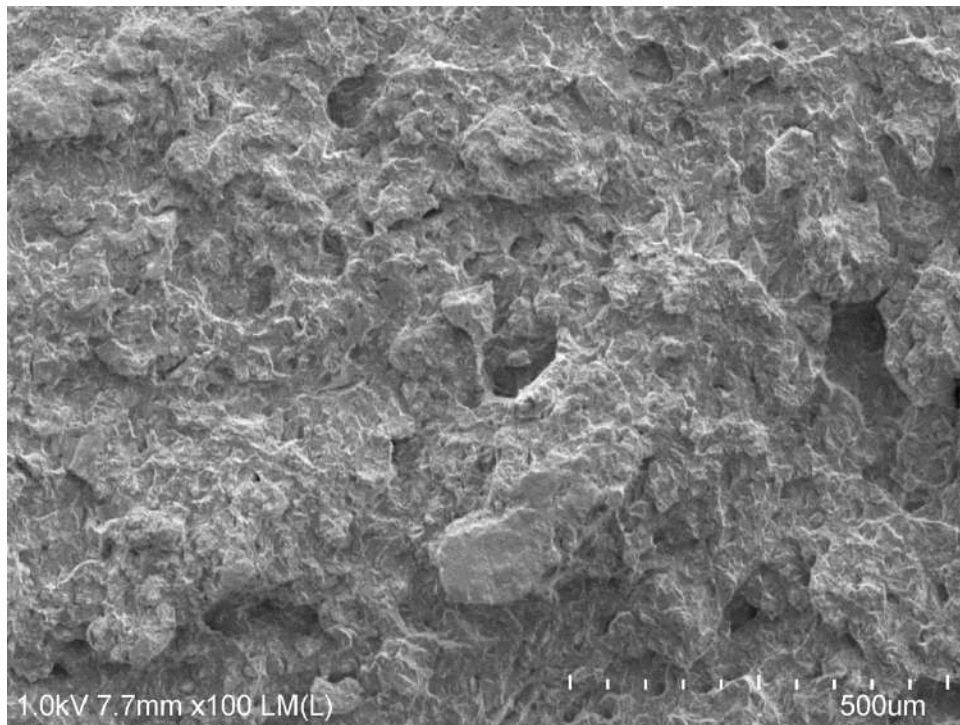
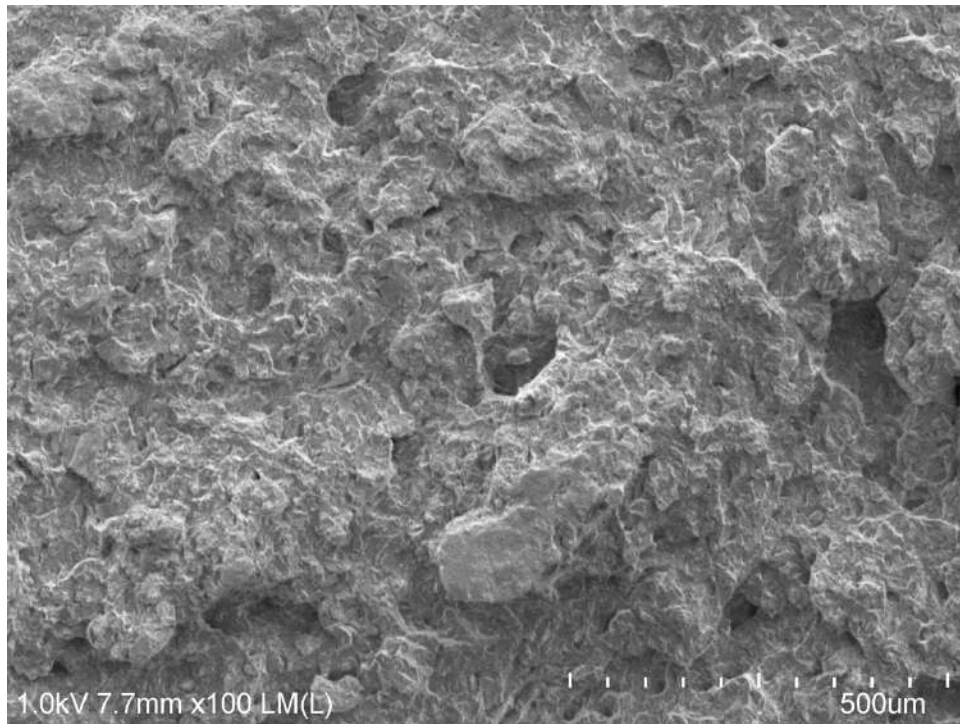
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C

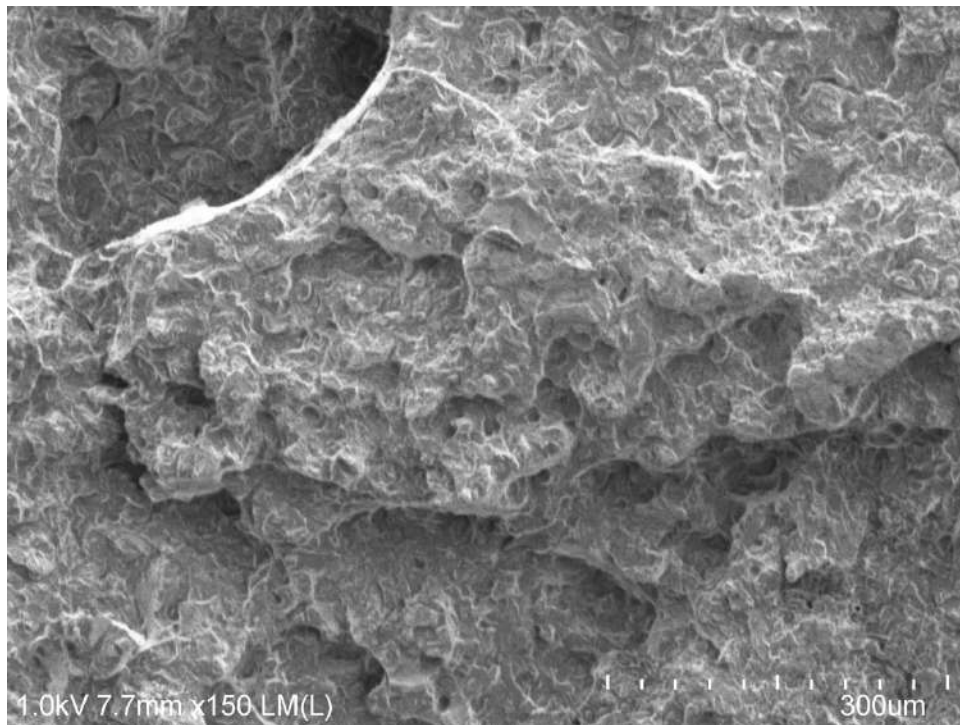
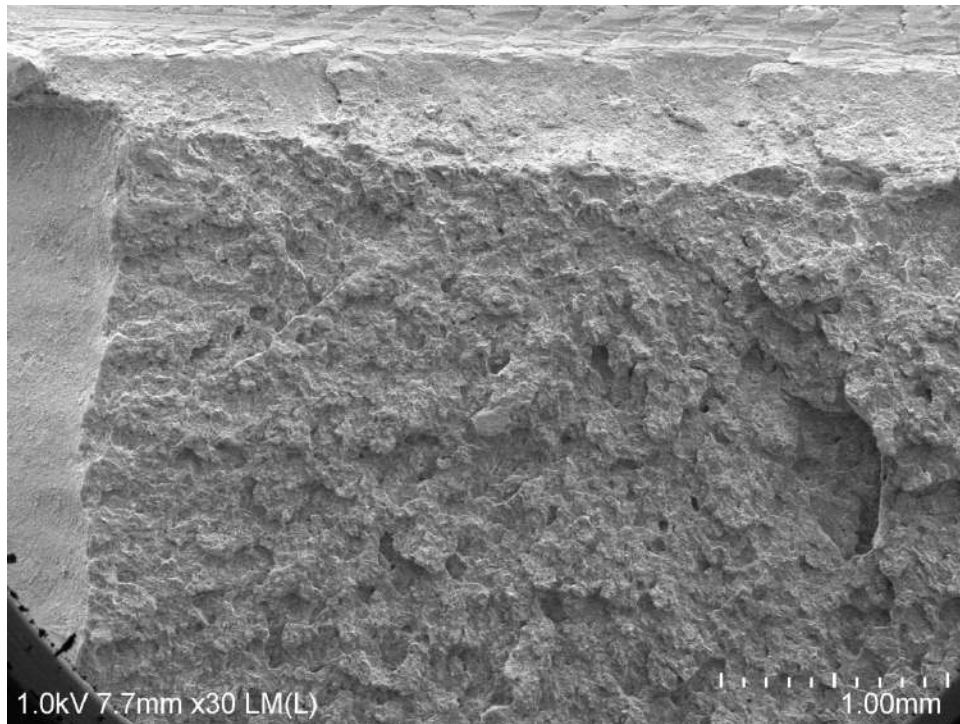


Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C

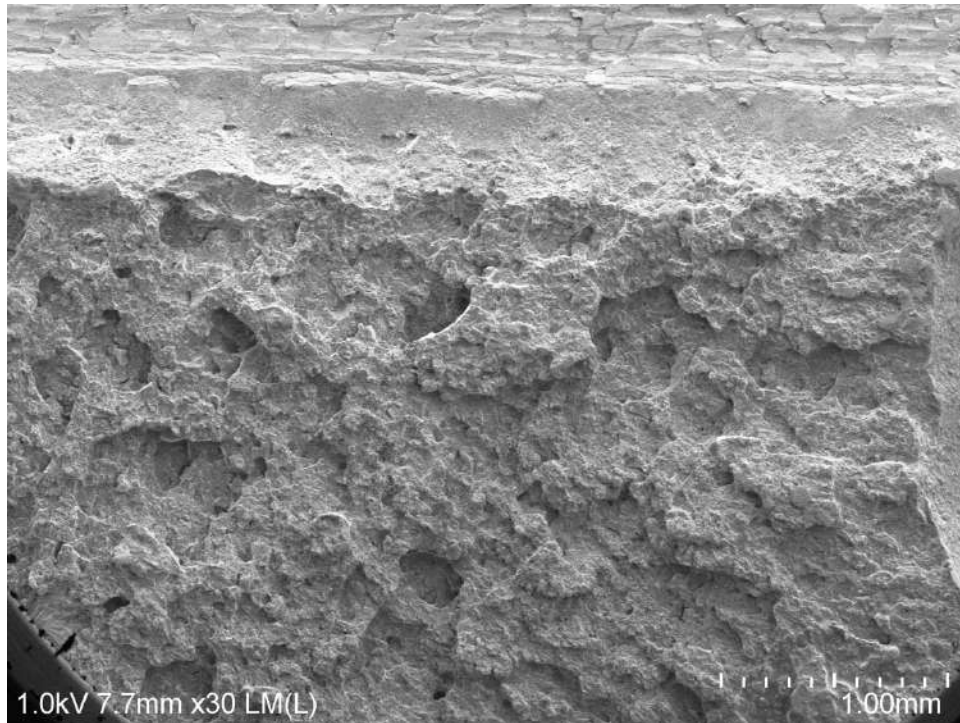
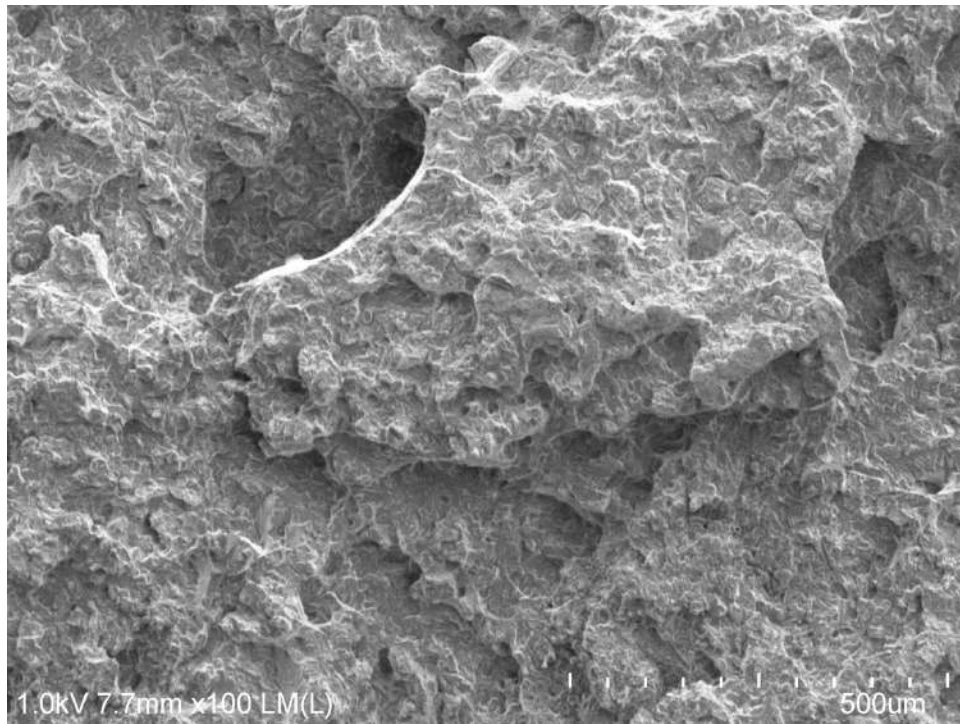




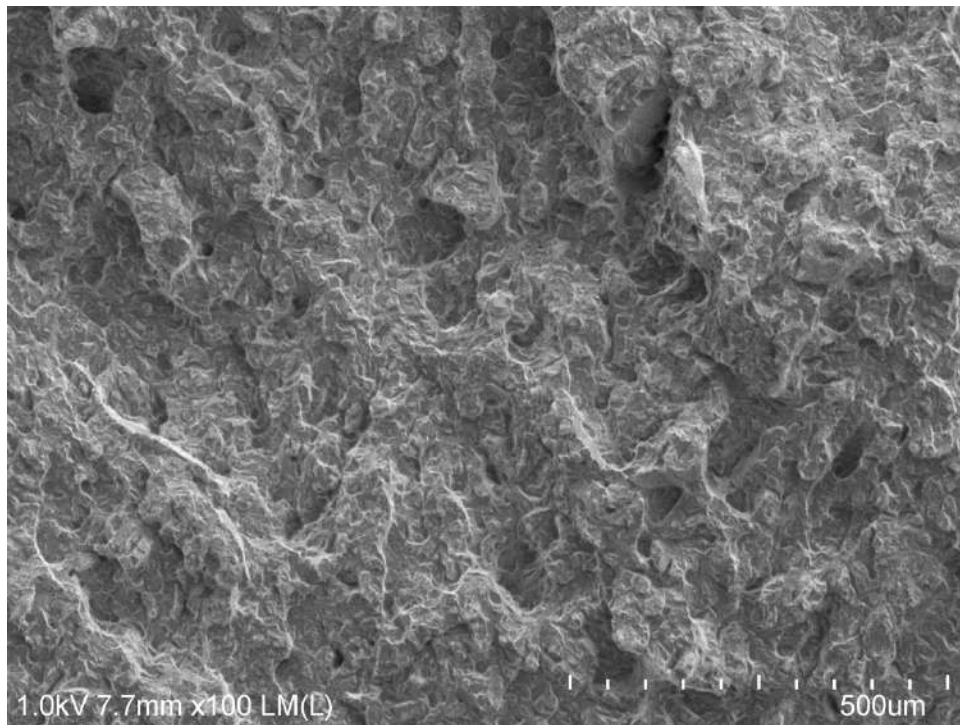
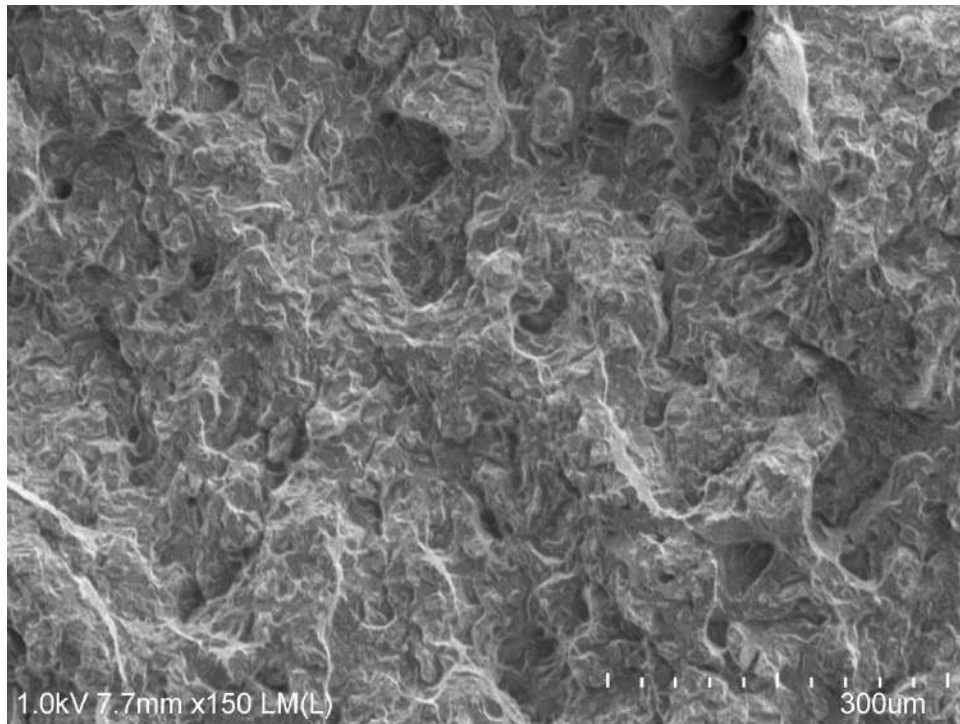
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



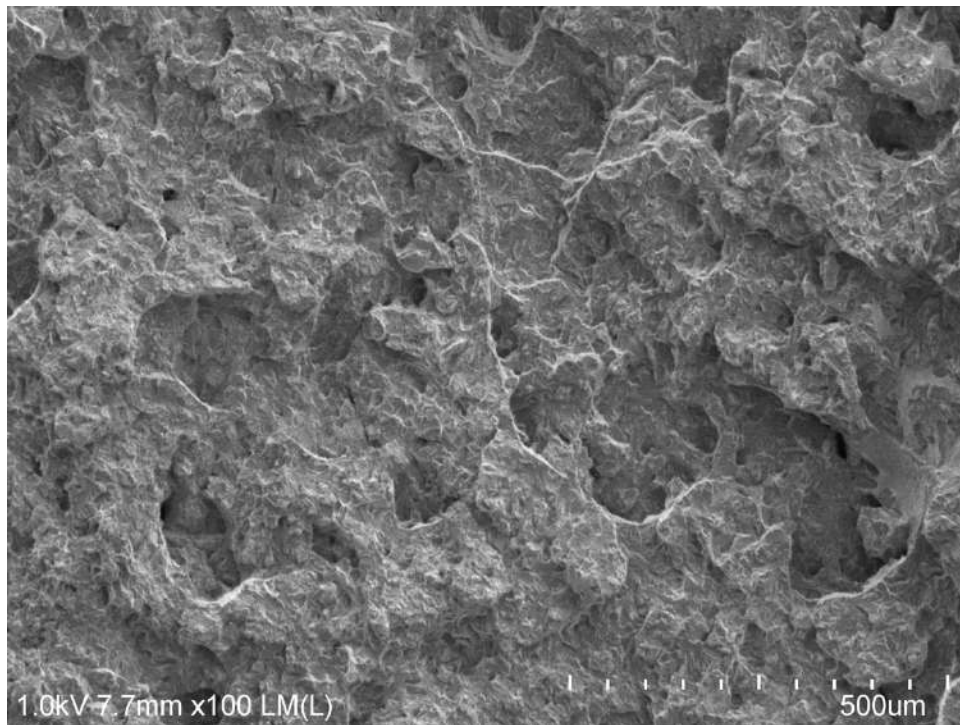
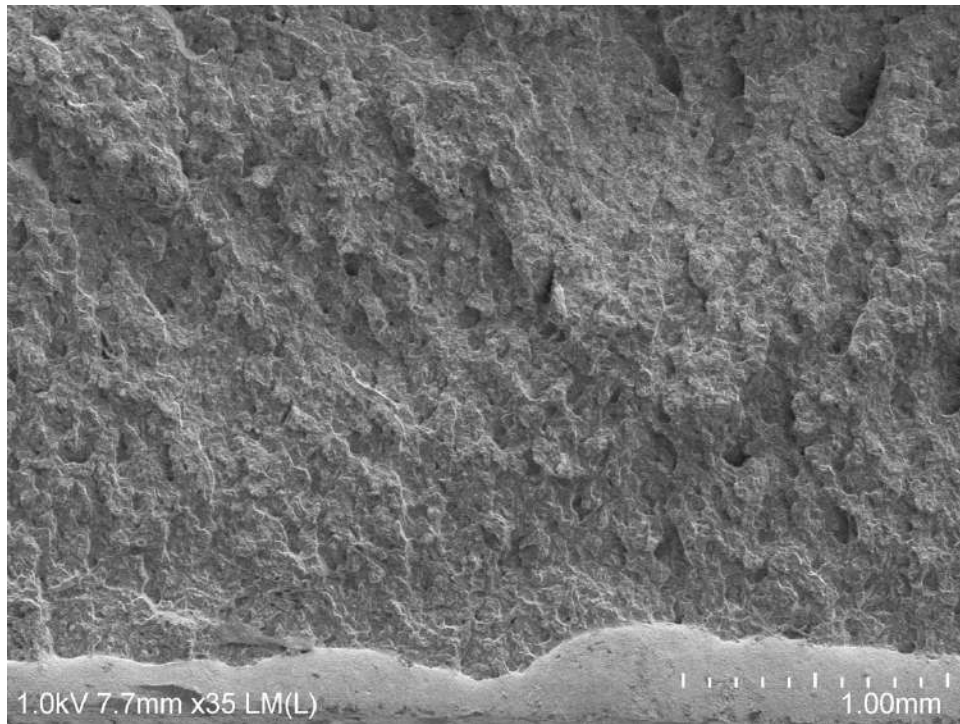
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



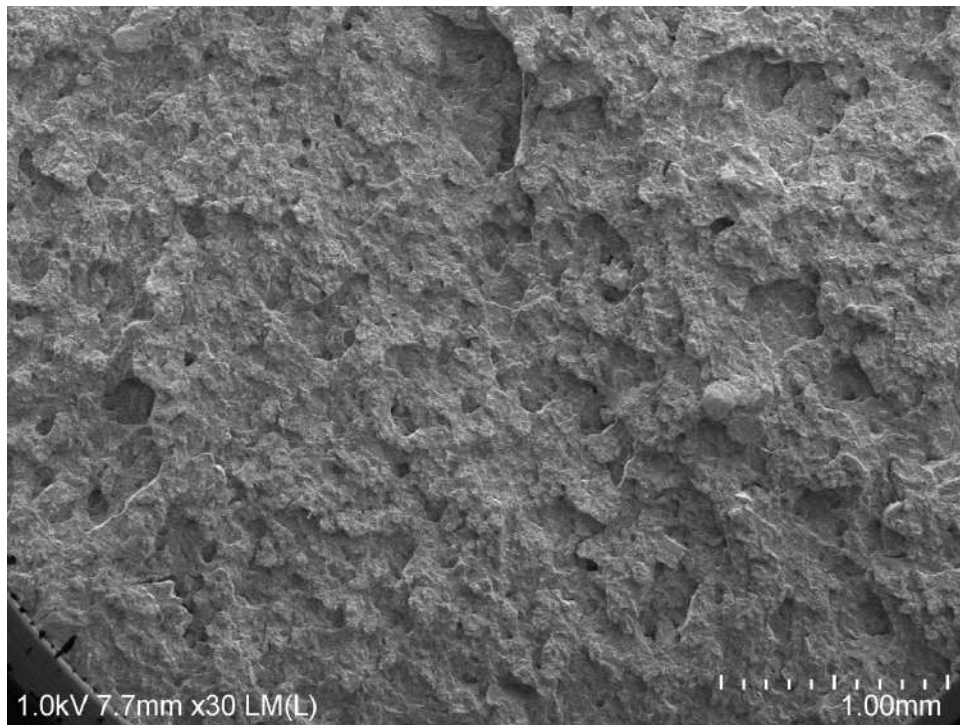
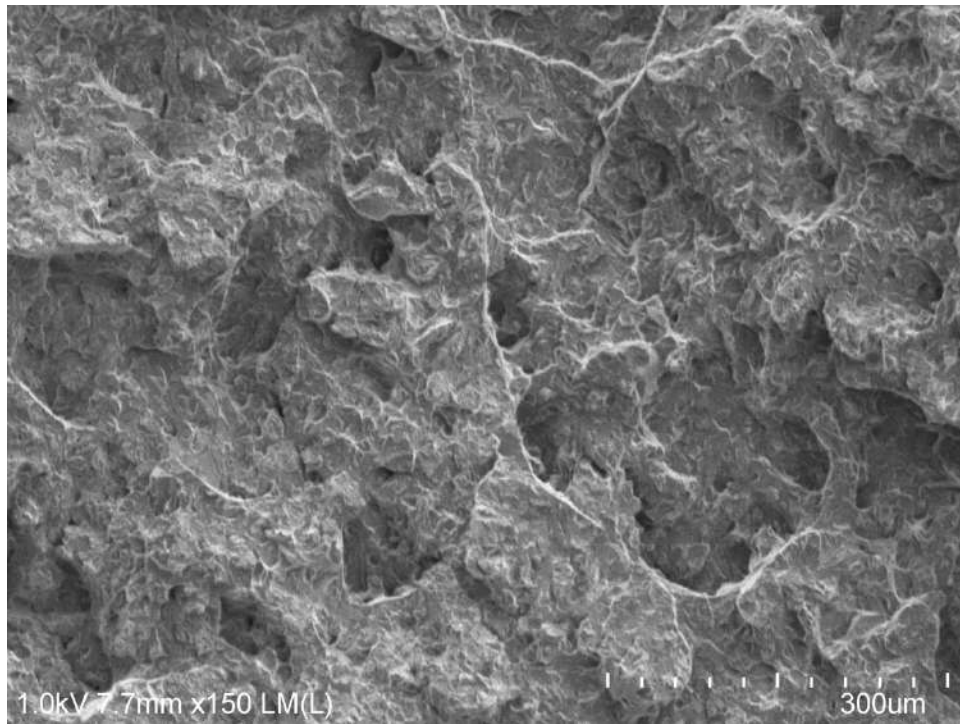
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



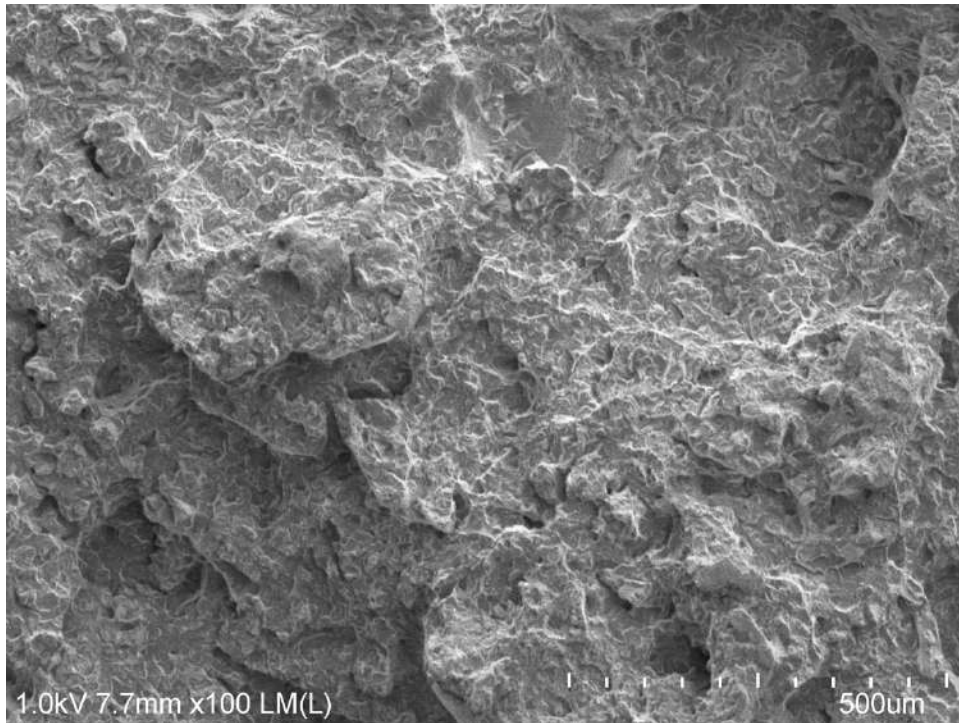
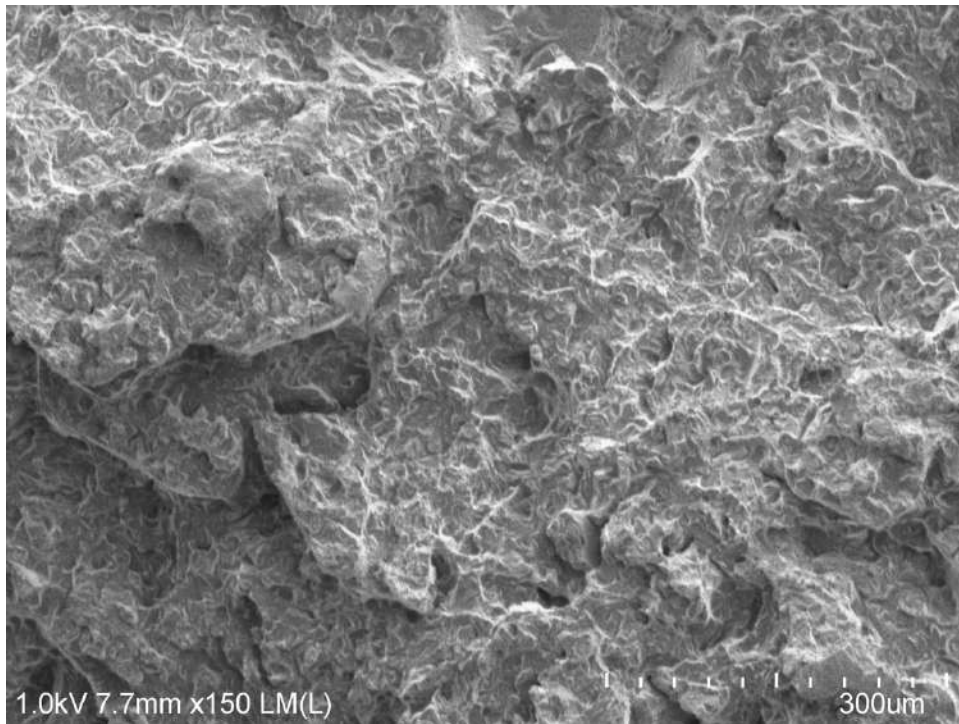
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



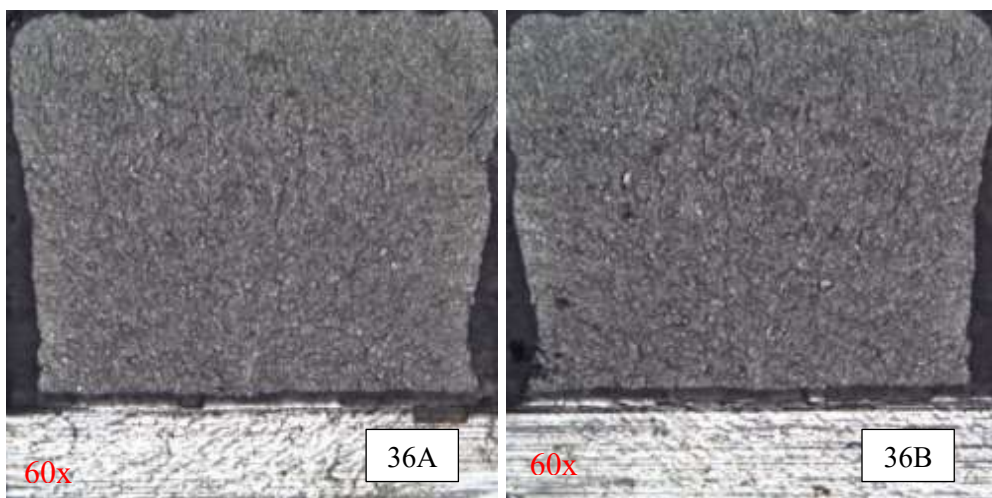
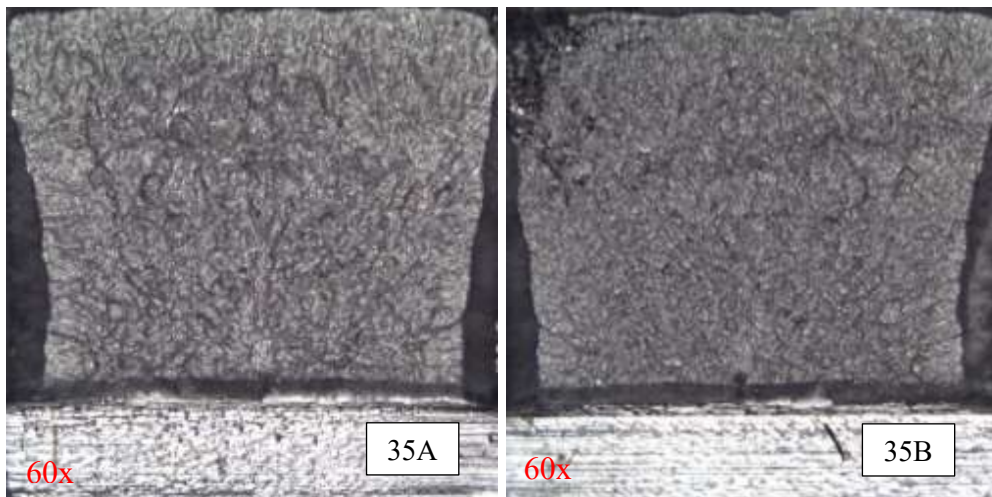
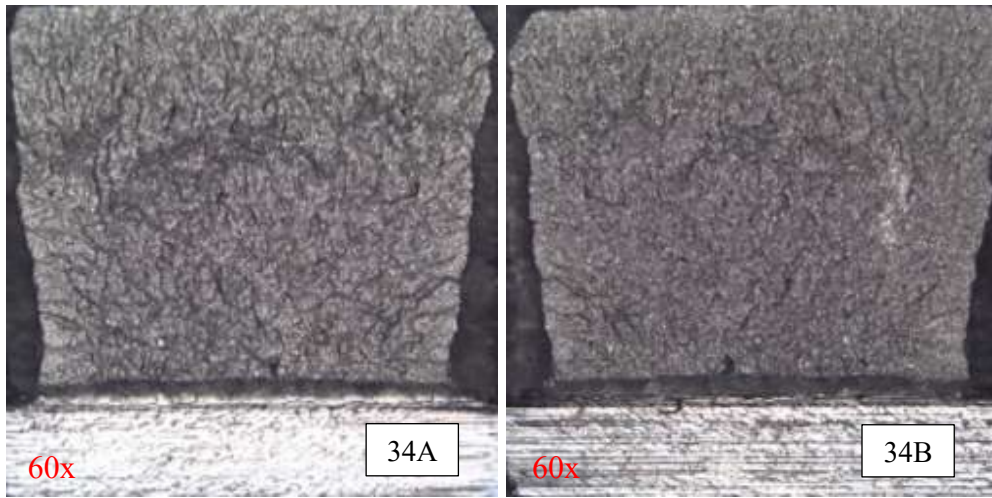
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



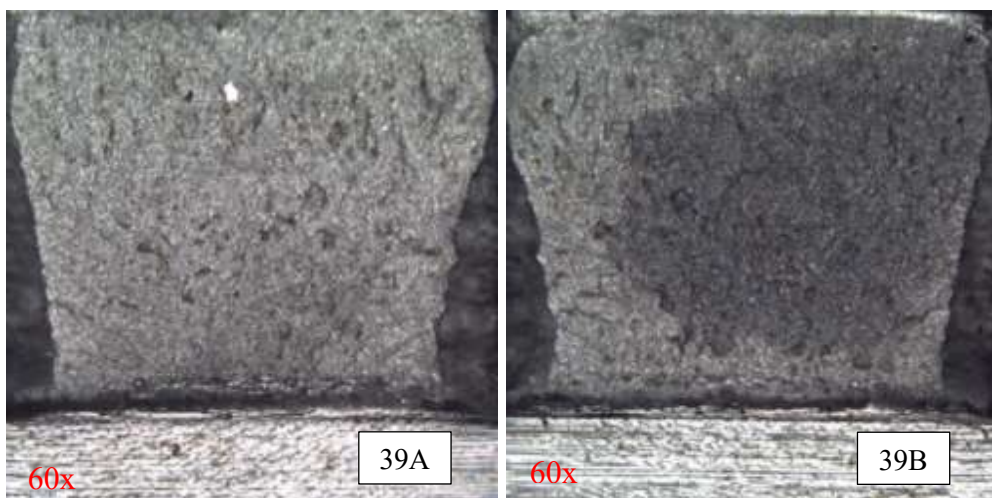
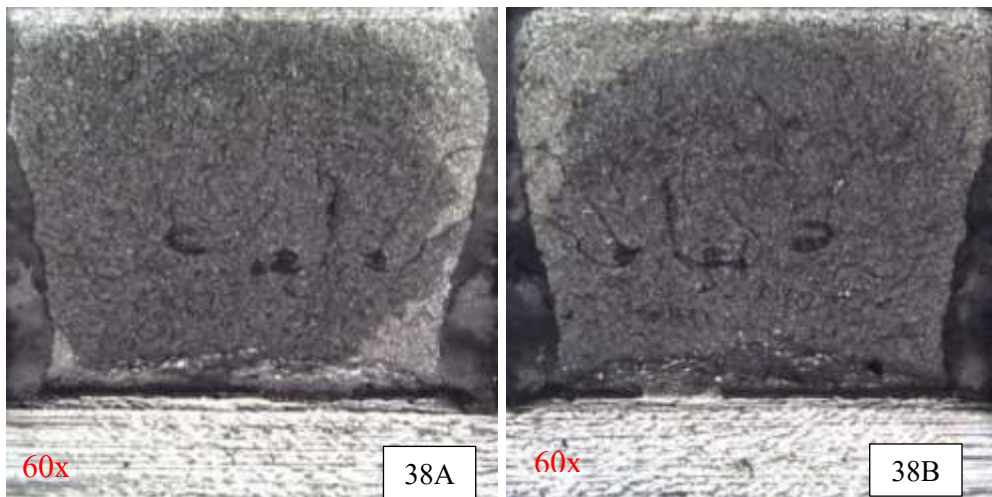
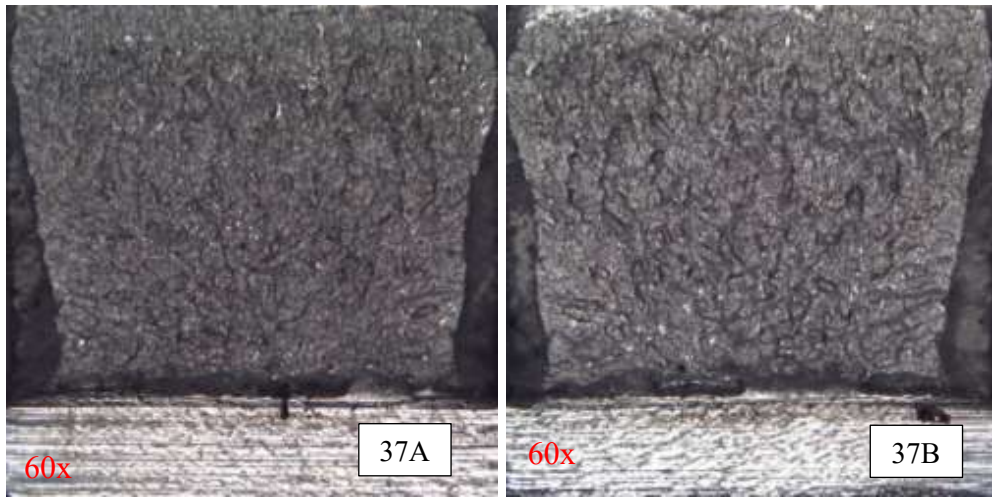
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -42°C

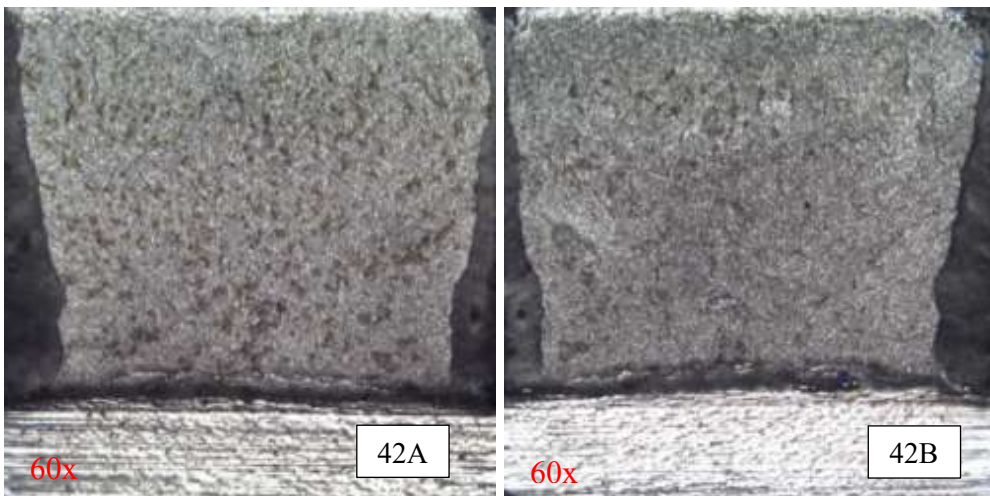
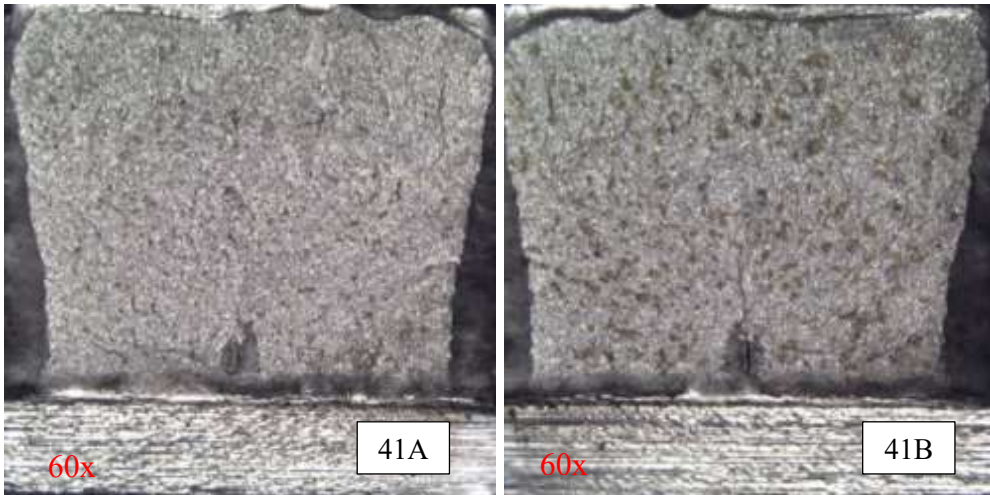
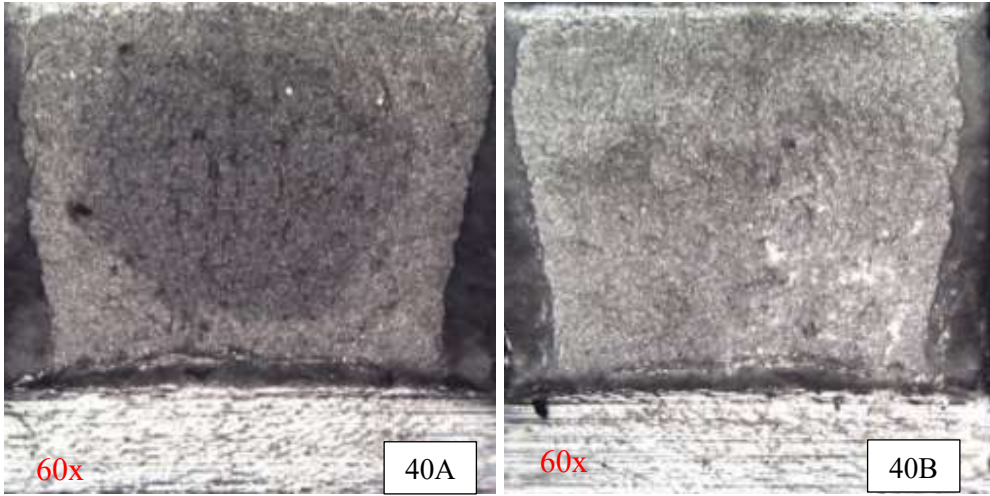


Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba

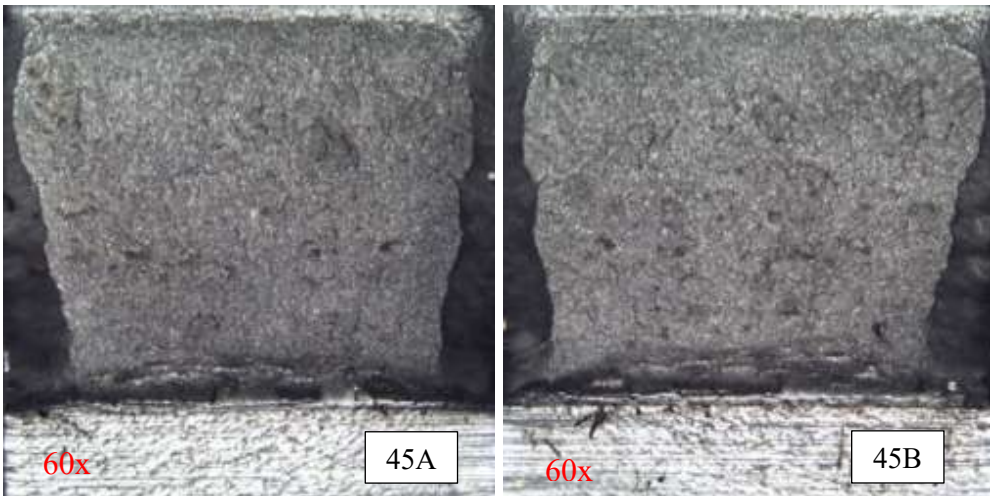
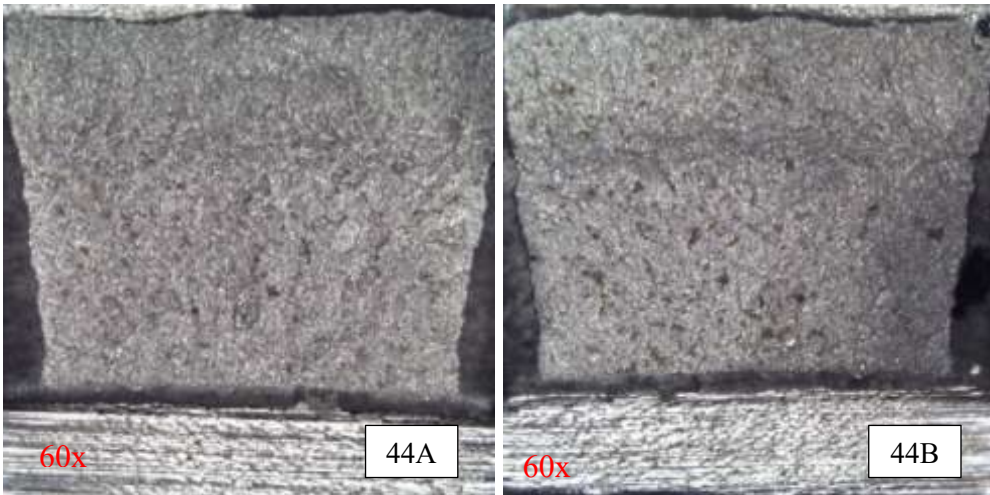
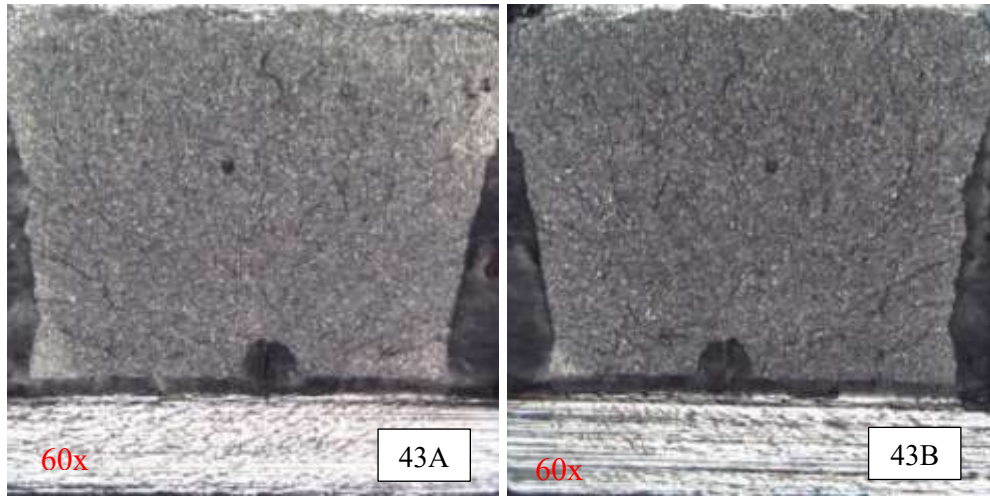




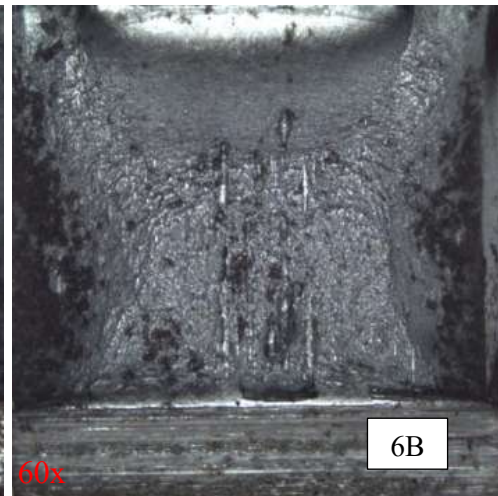
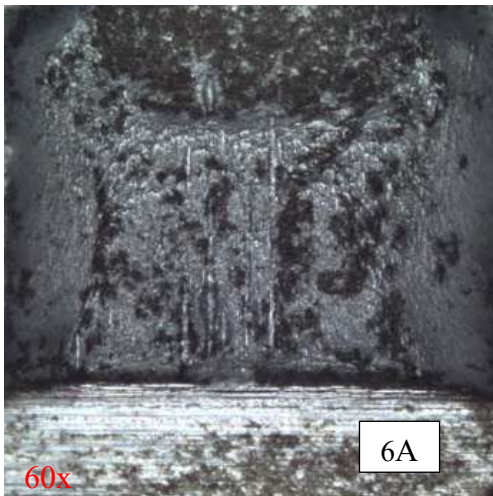
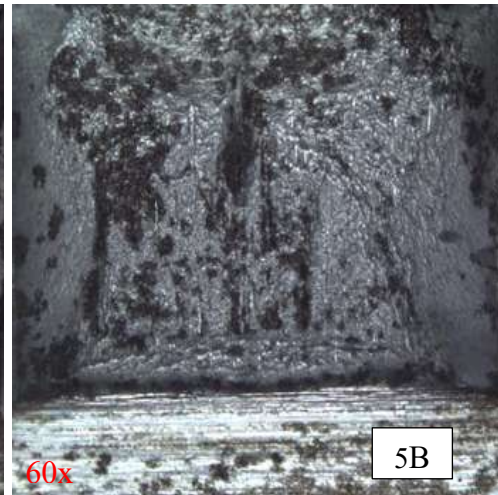
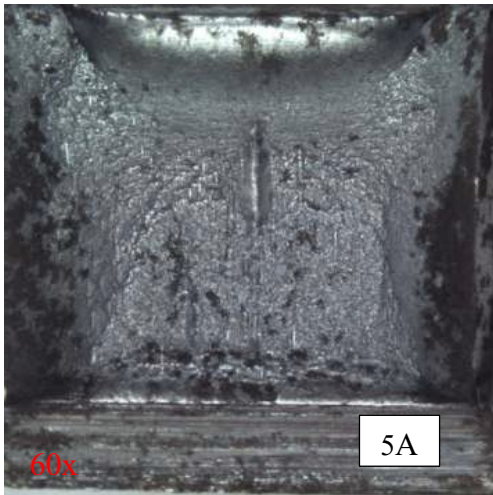
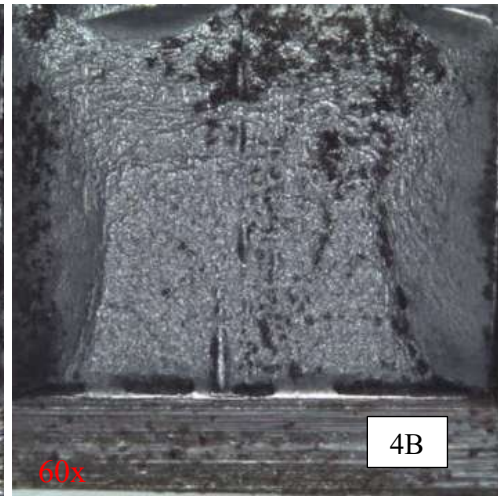
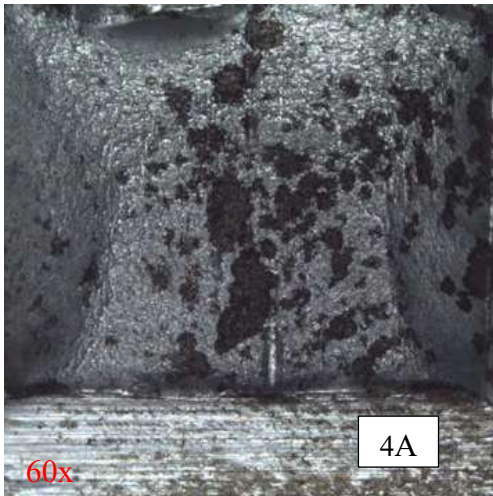
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba



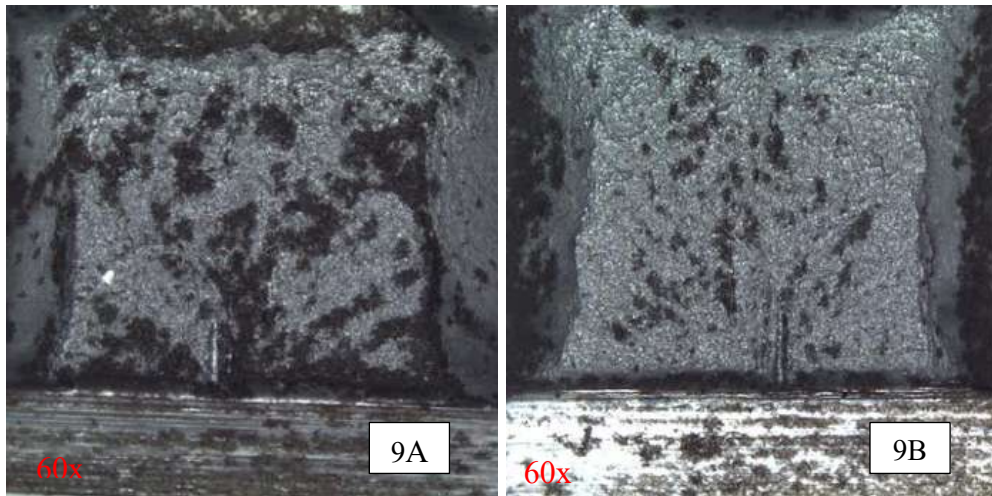
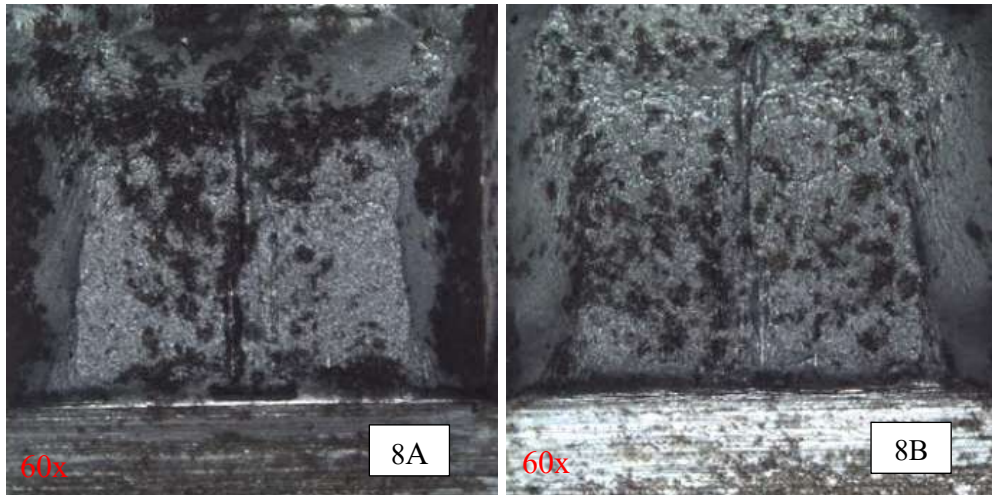
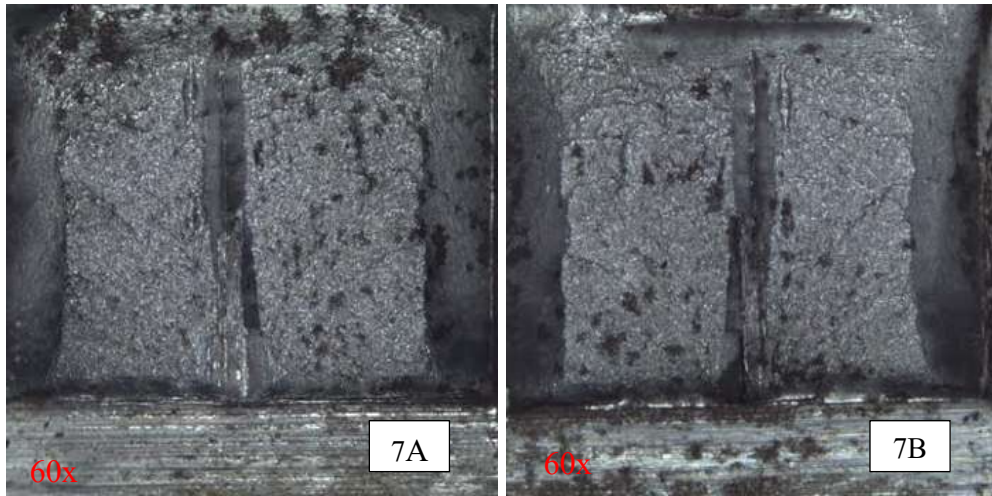
Condición 2 revenido 405°C | 22MnB5 | temperatura de prueba



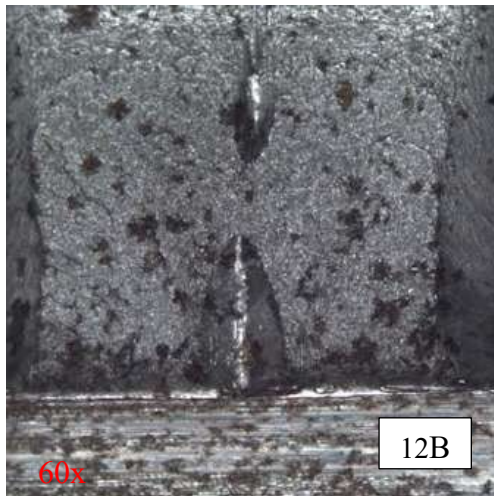
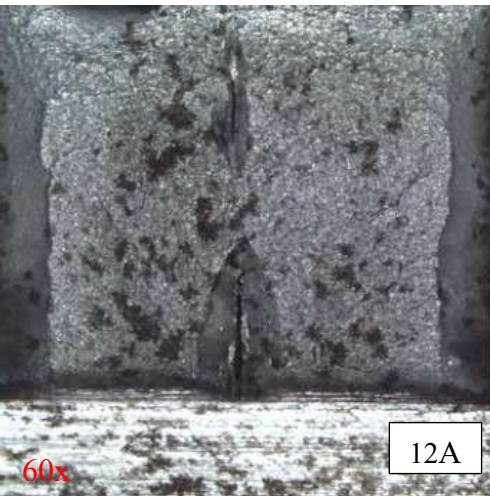
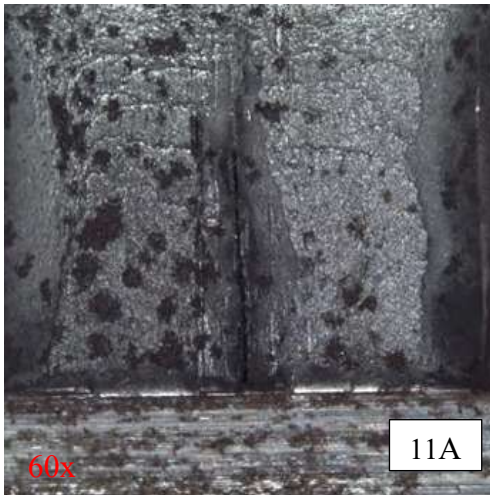
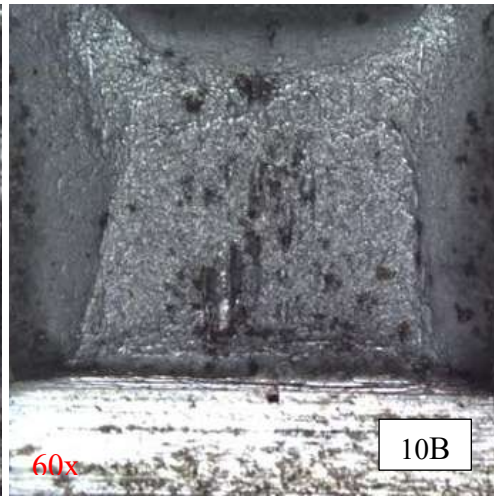
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba 0°C



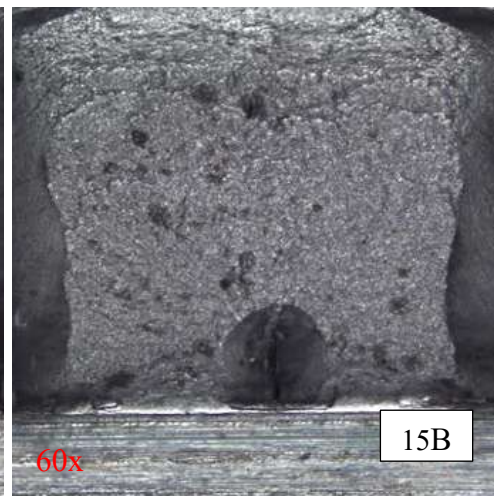
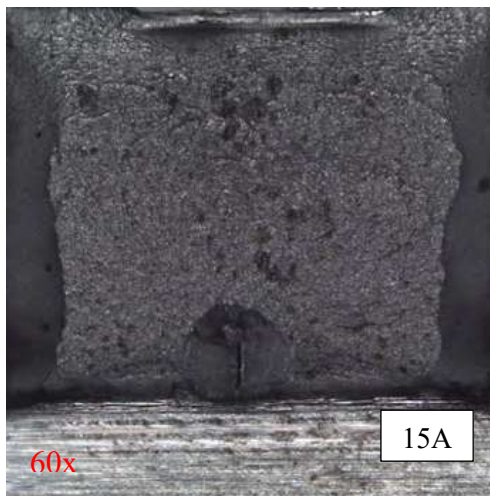
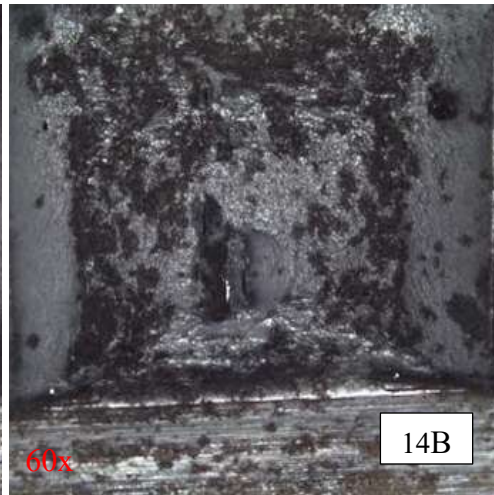
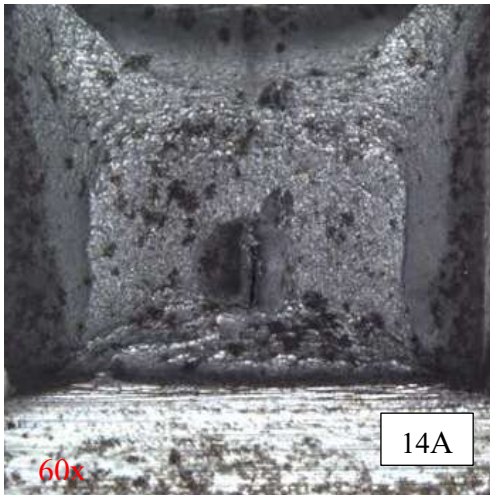
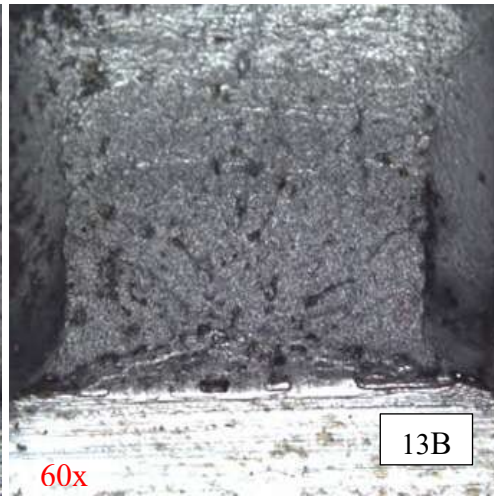
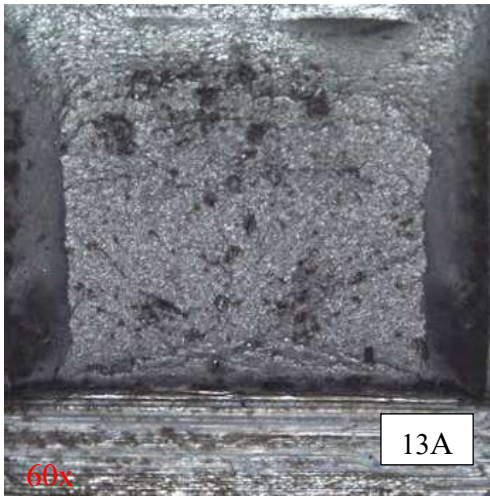
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -10°C



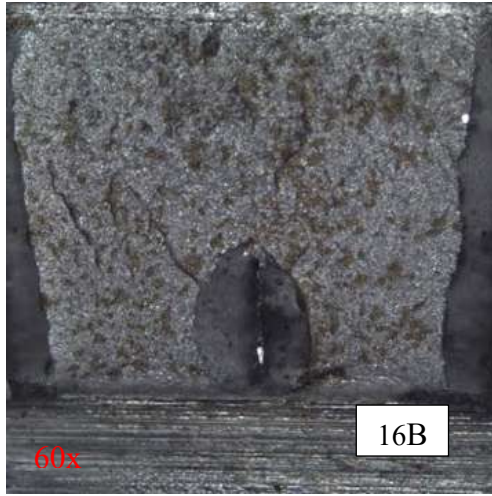
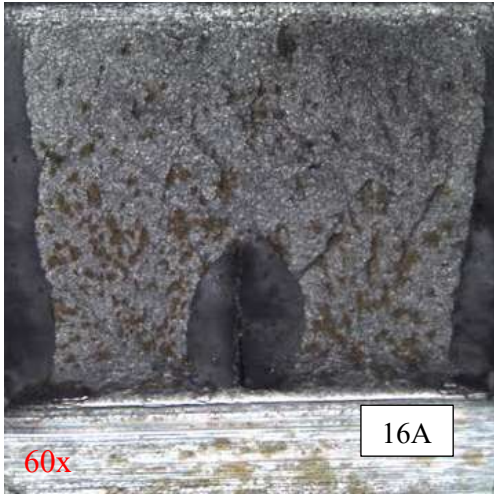
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -20°C



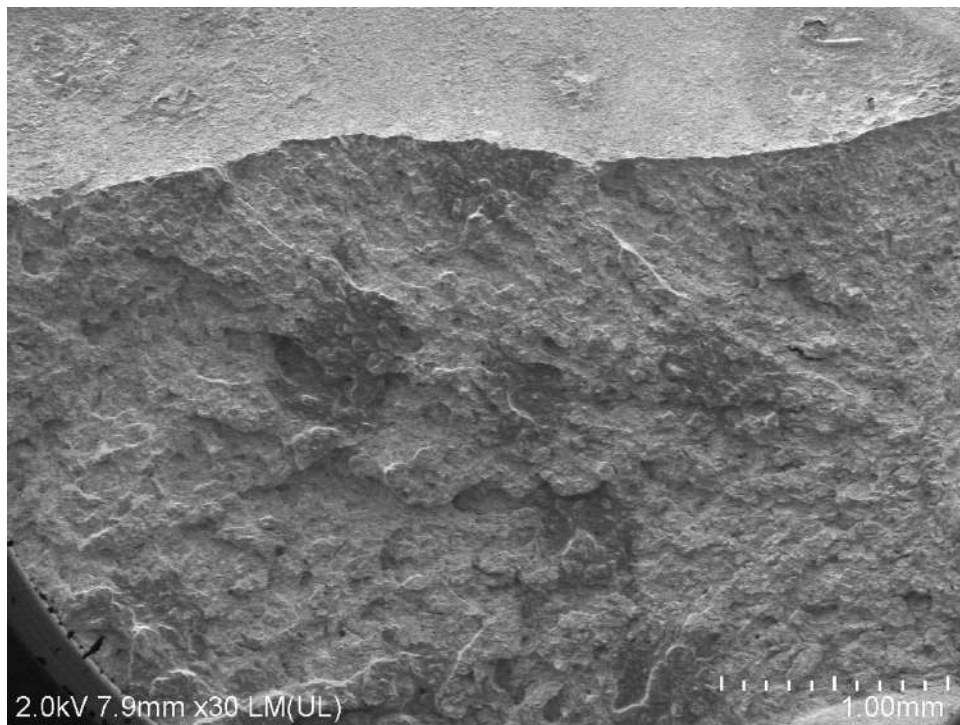
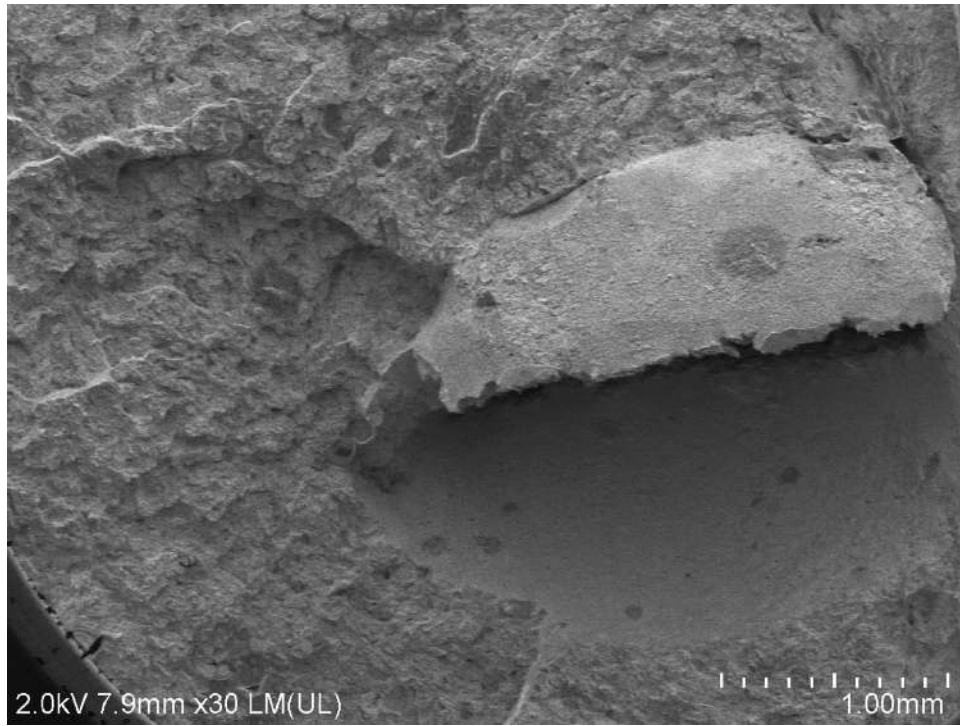
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -30°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C

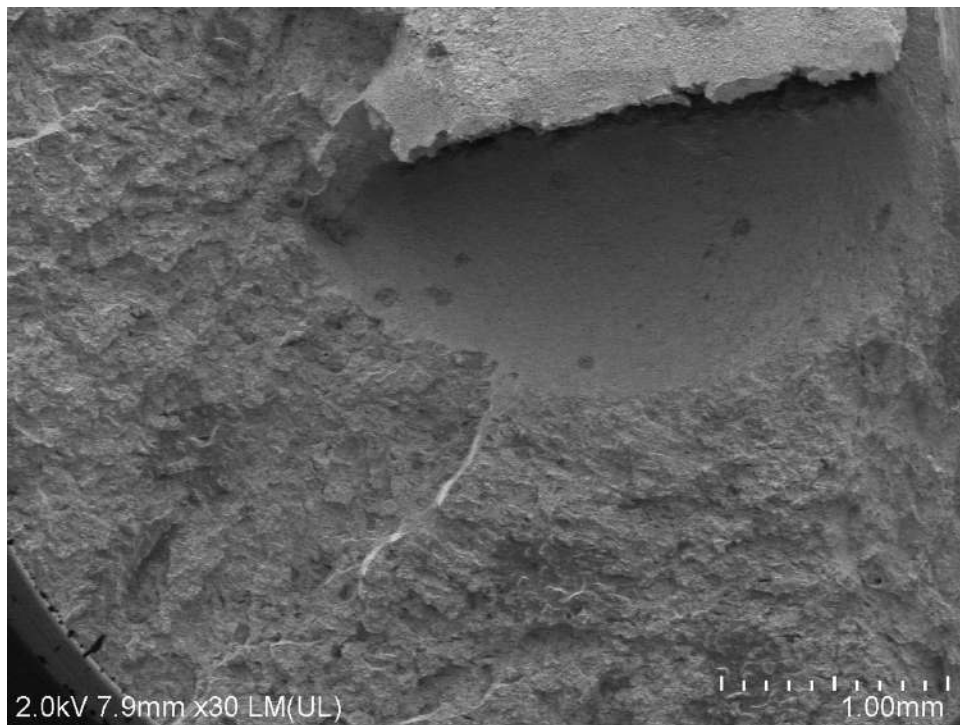
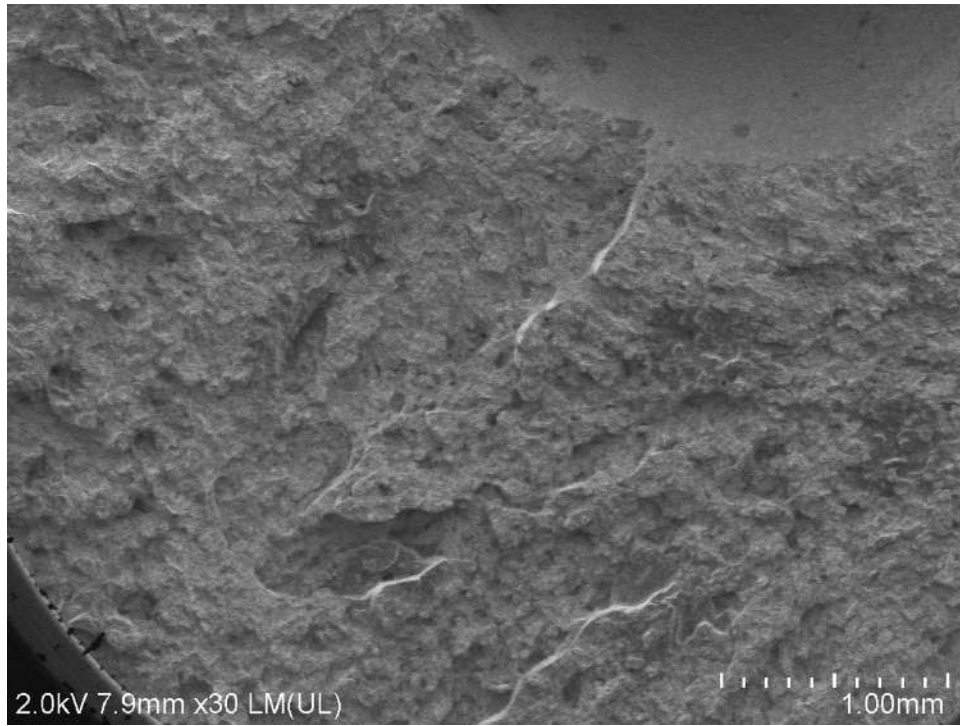


Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C

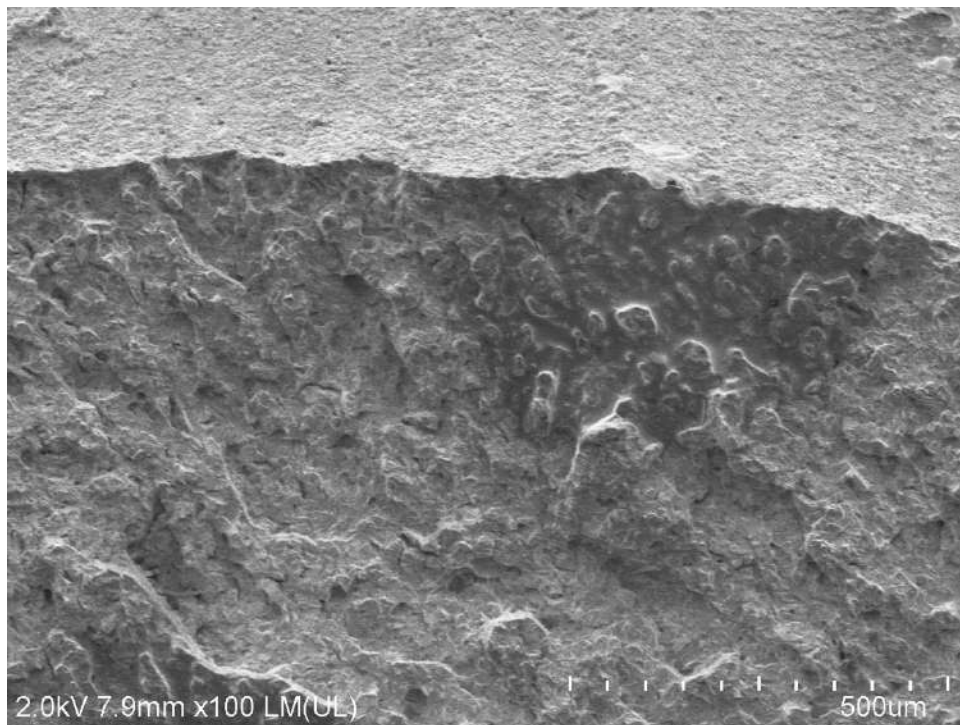




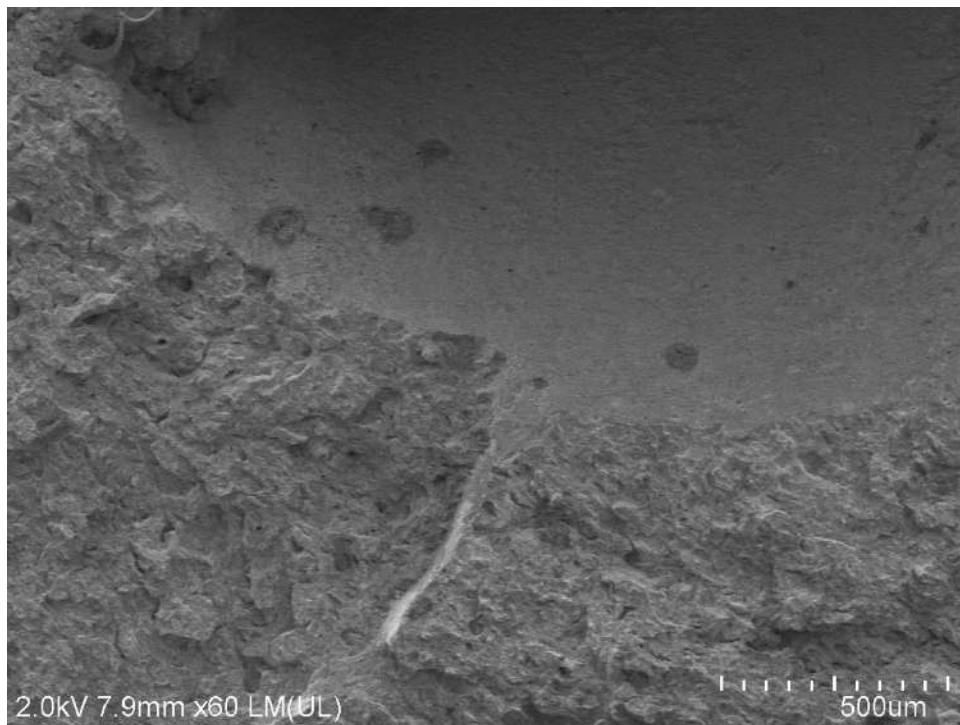
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



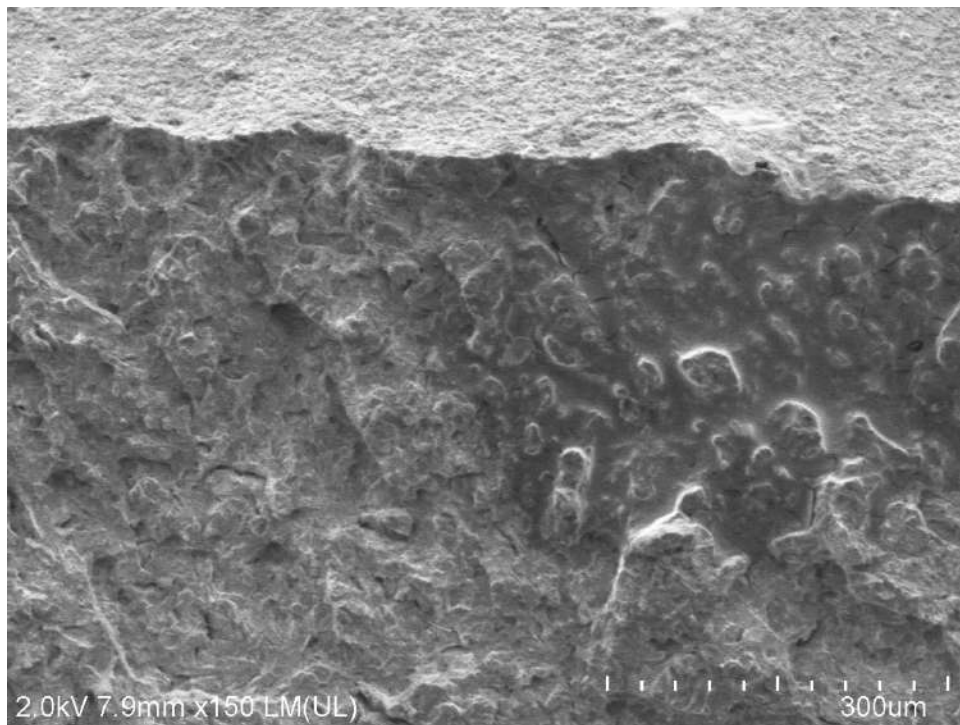
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



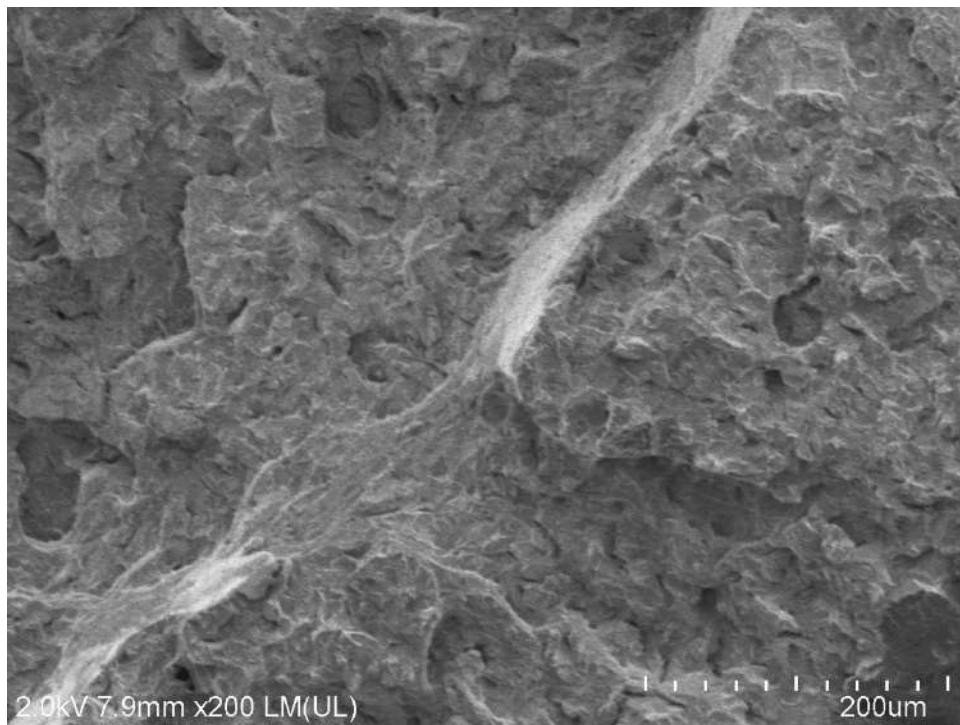
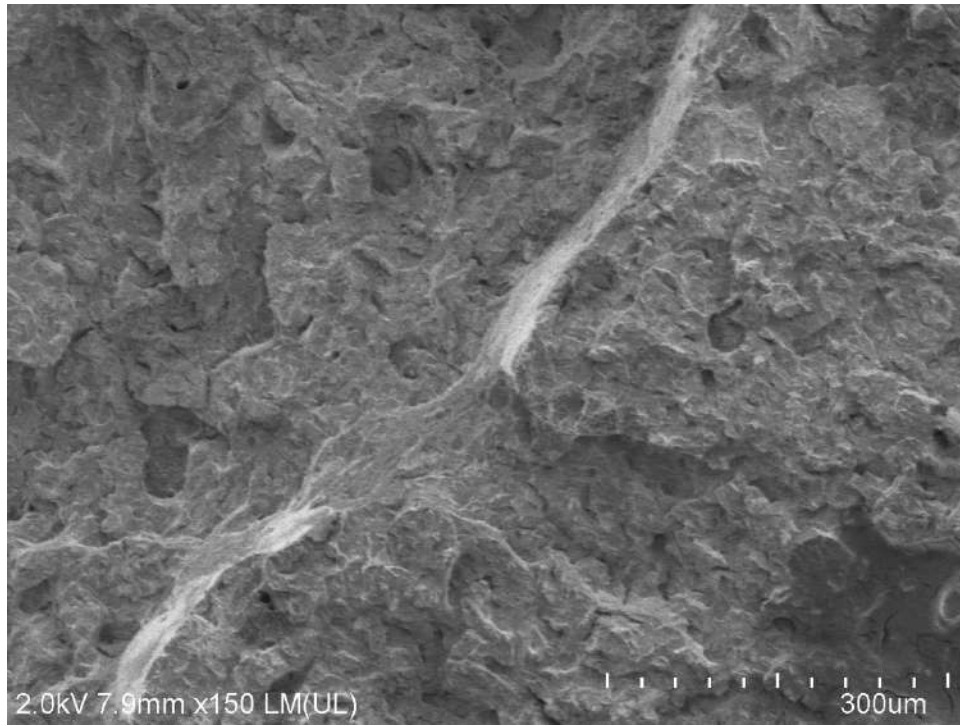
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



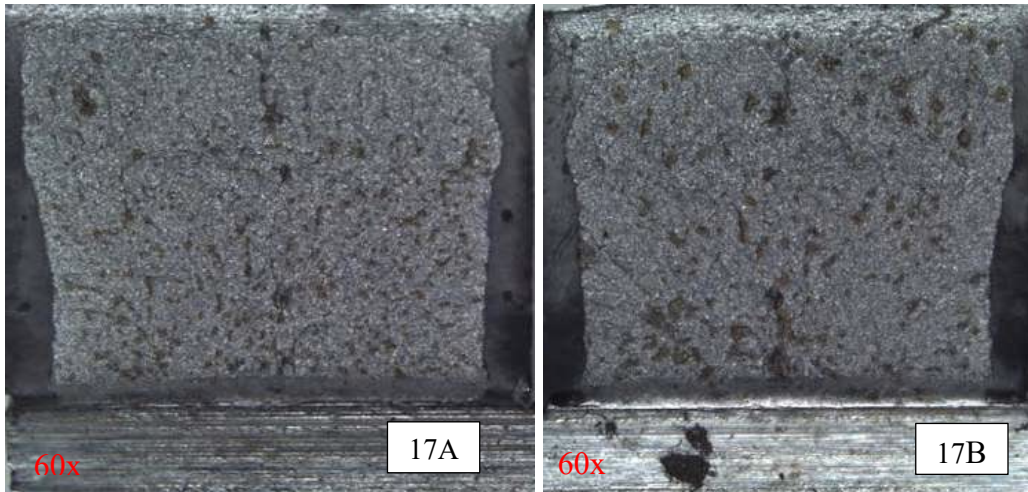
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -36°C



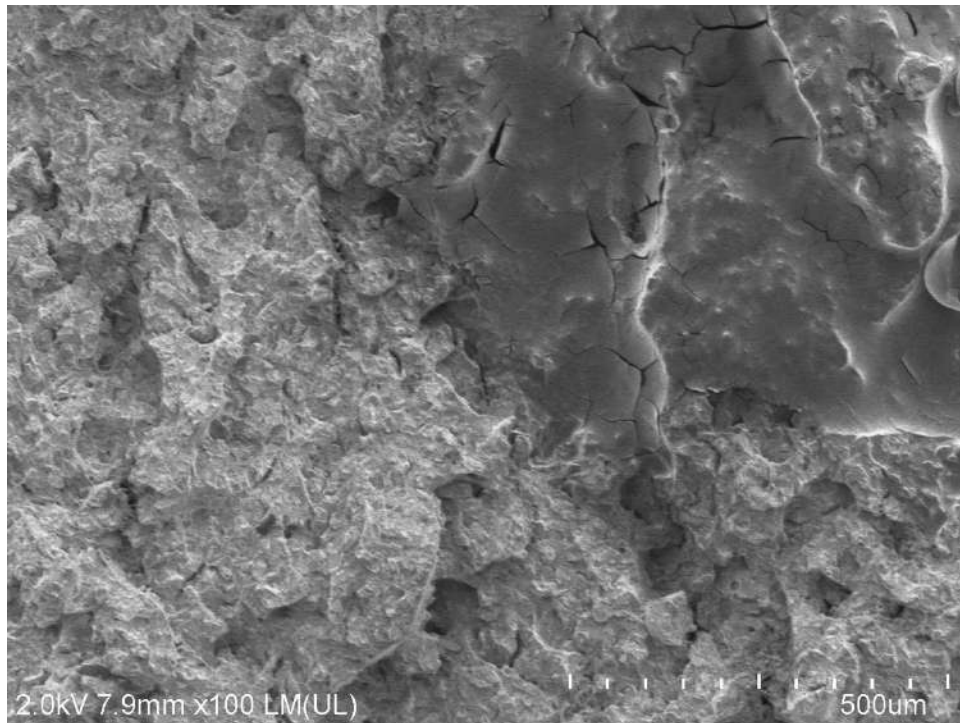
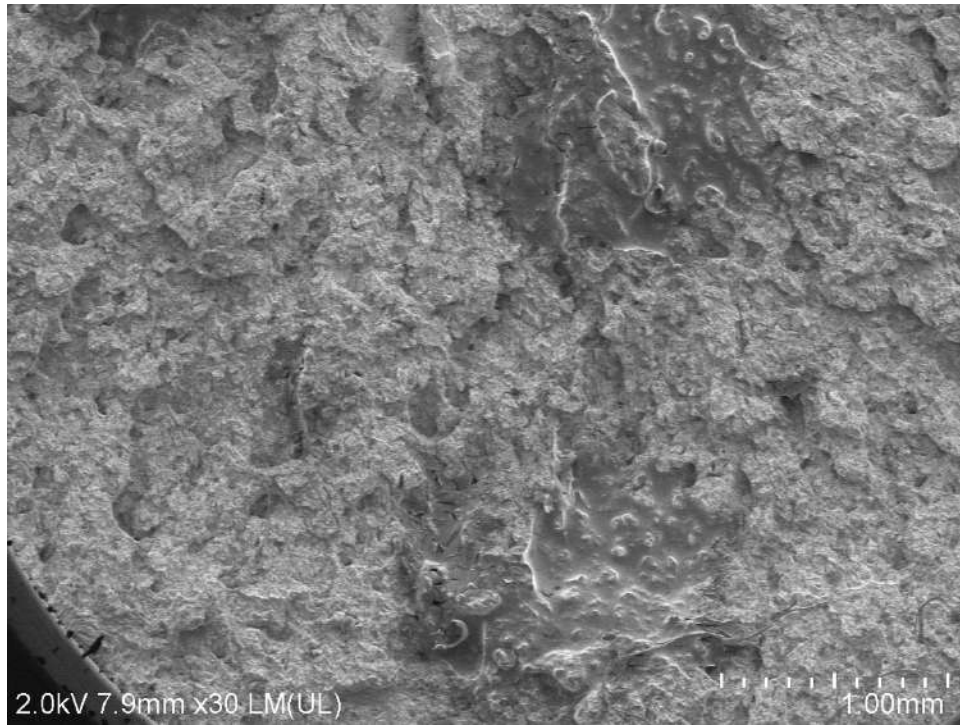
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C



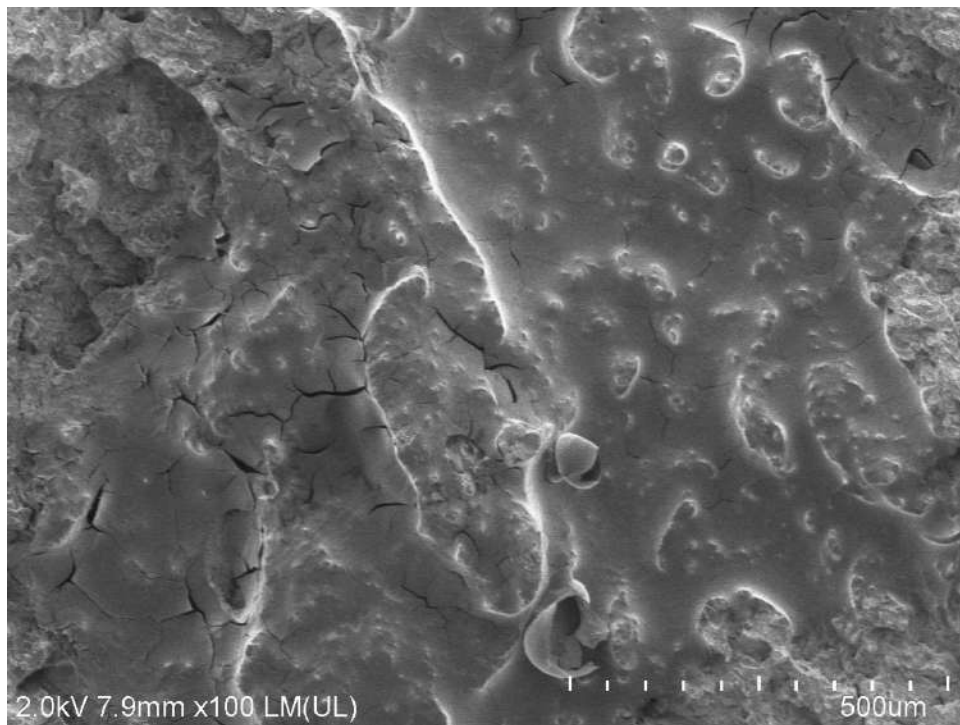
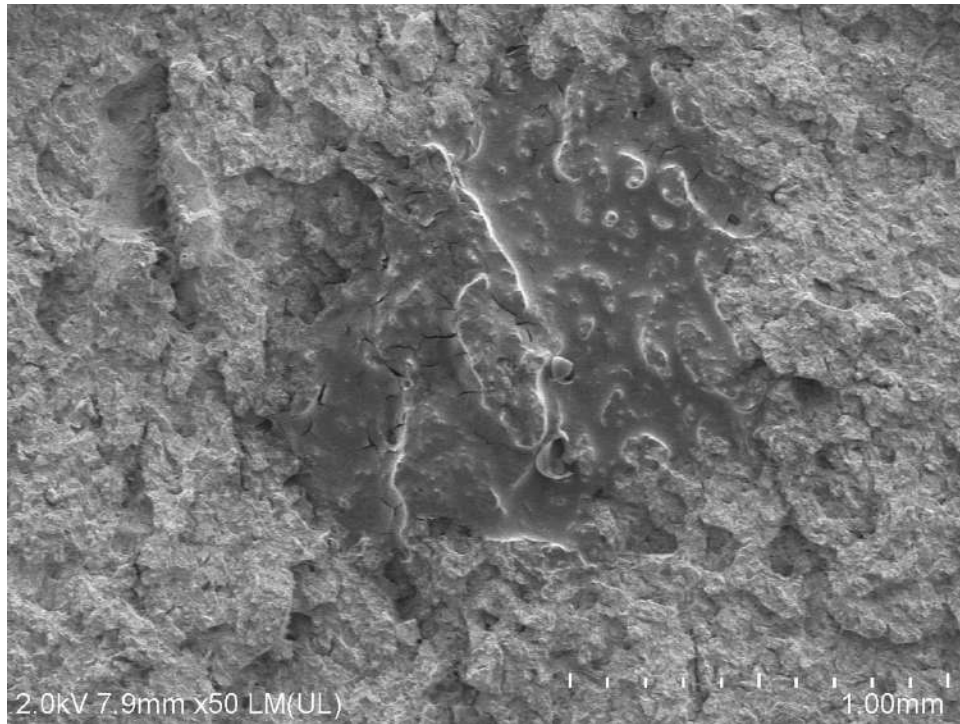
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -38°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C

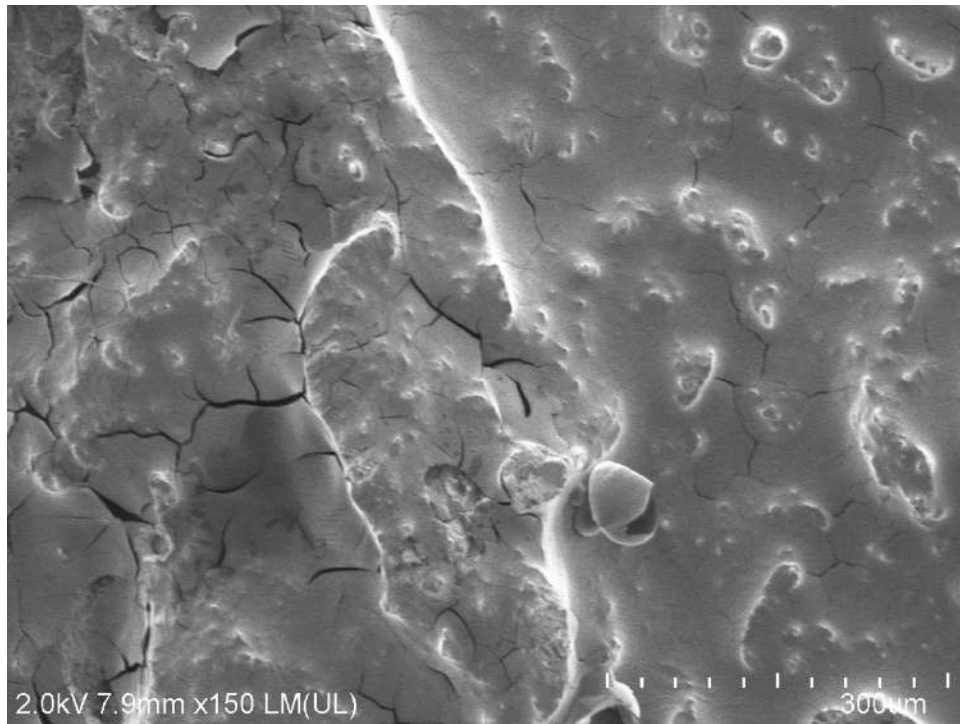


Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C

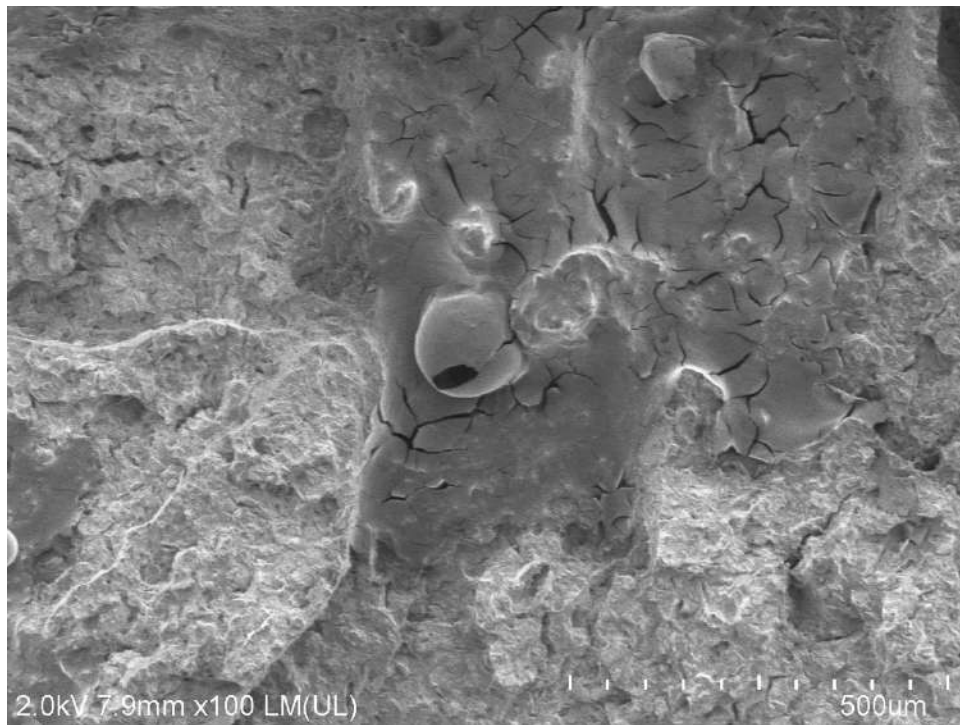
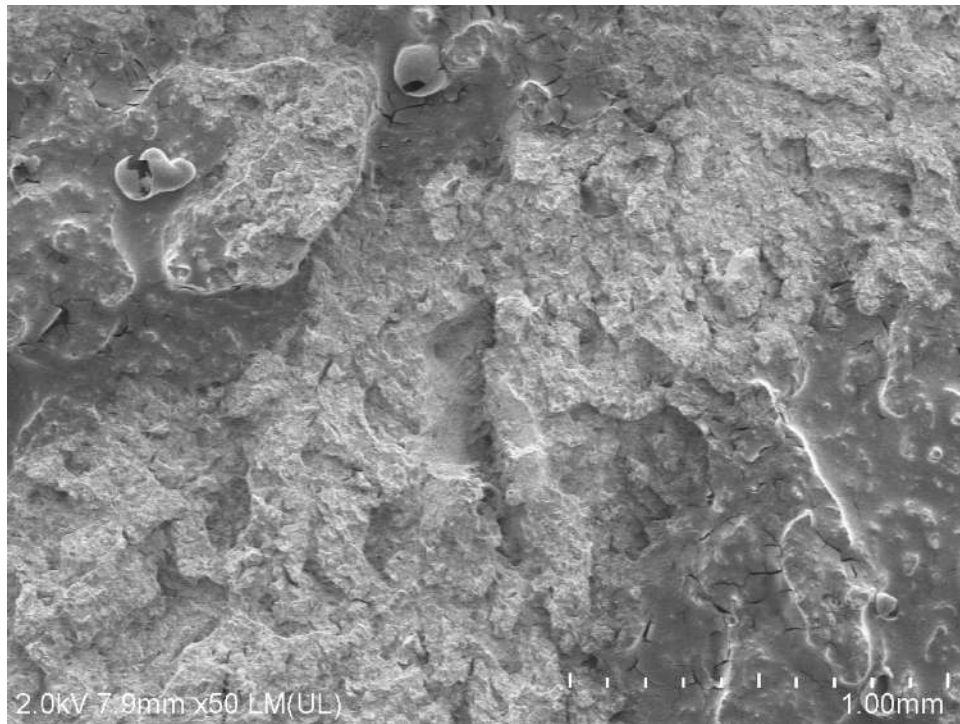




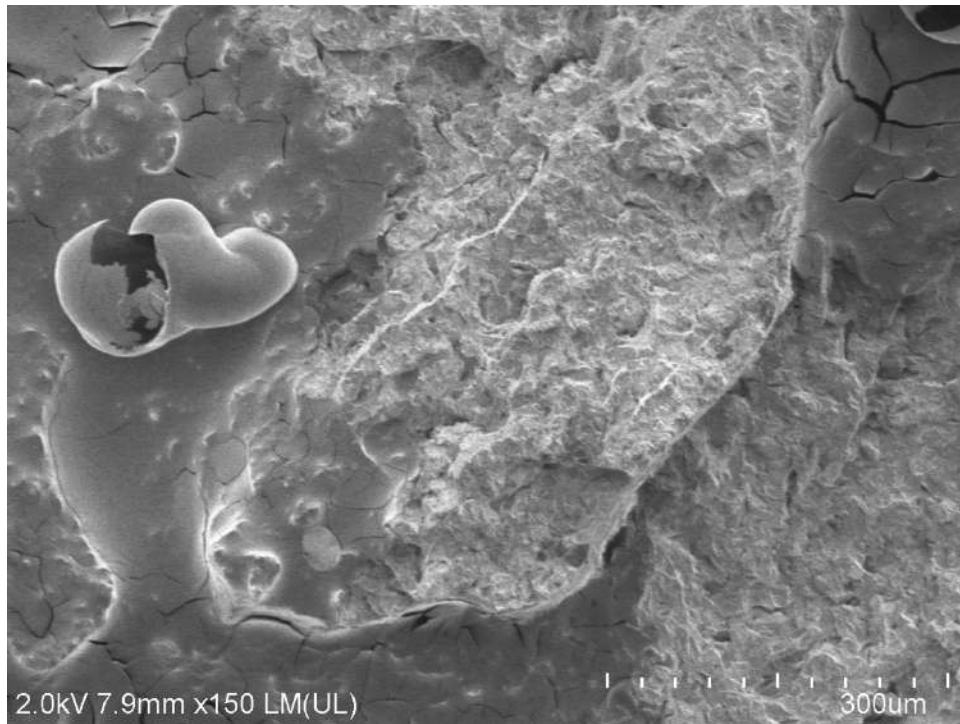
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C



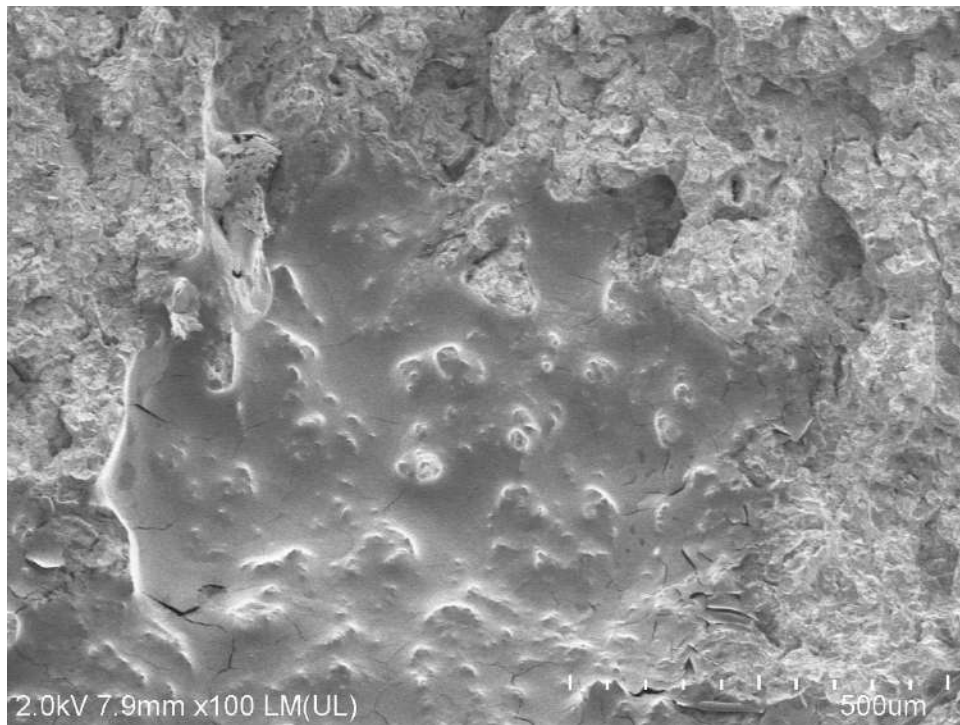
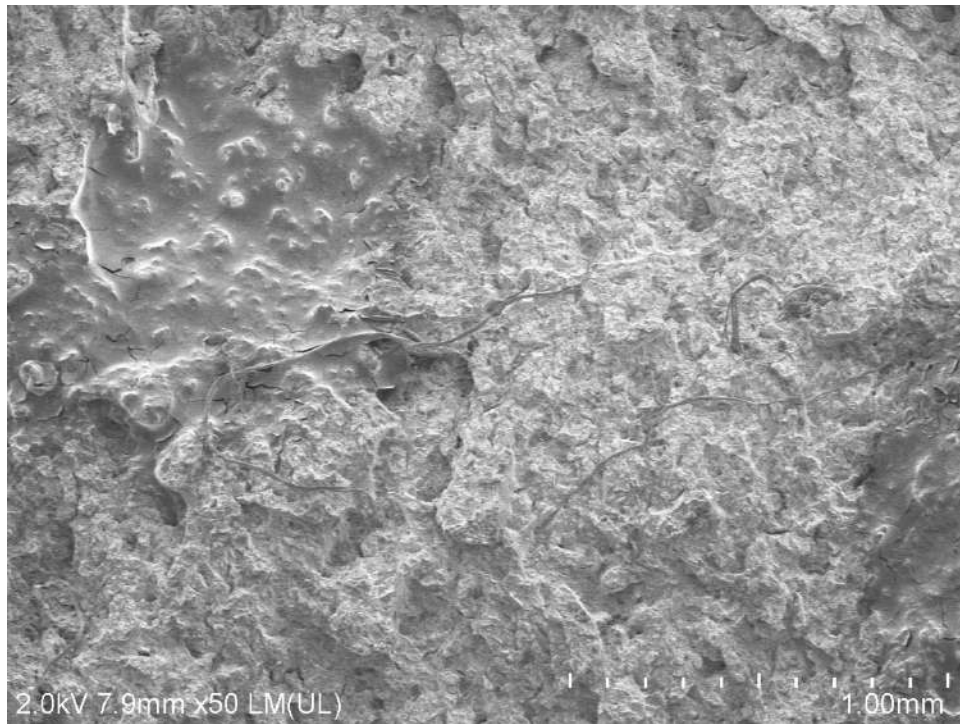
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C



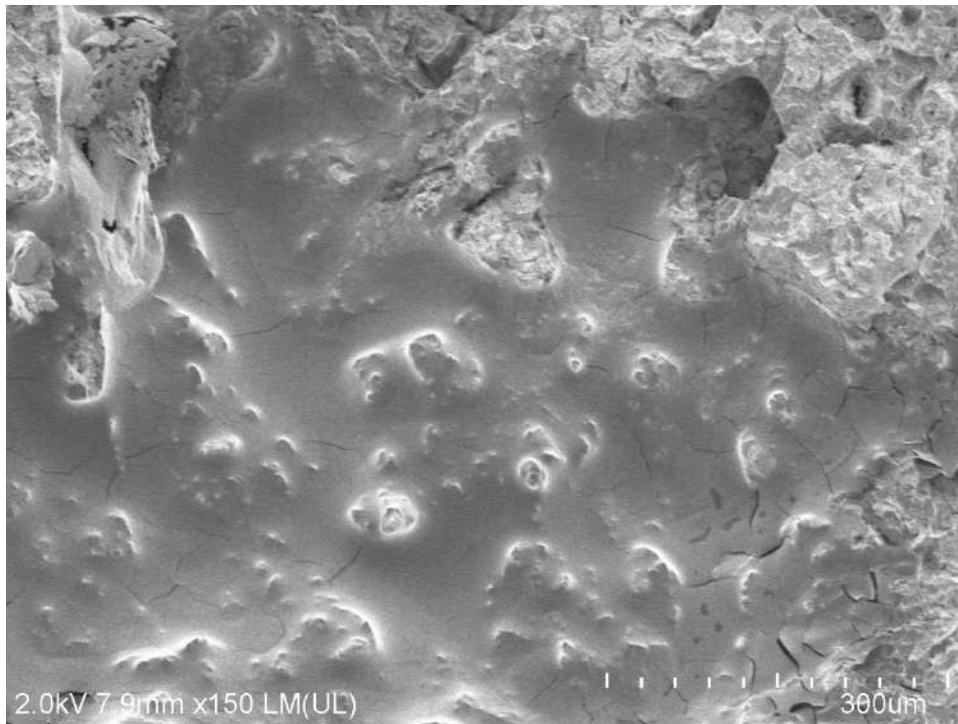
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C



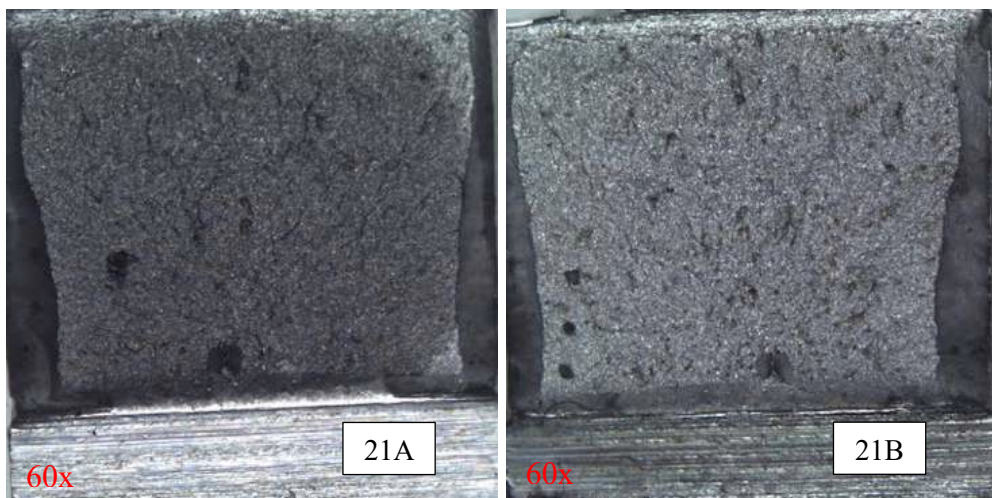
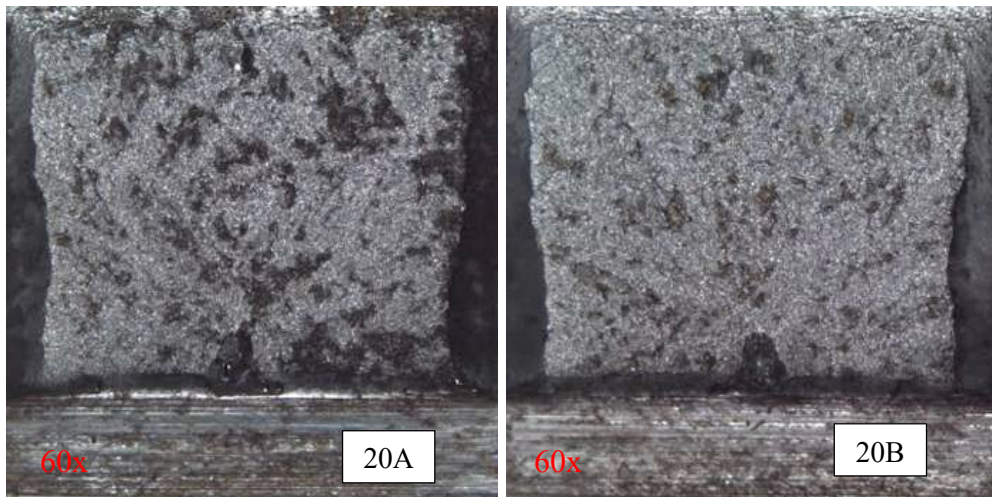
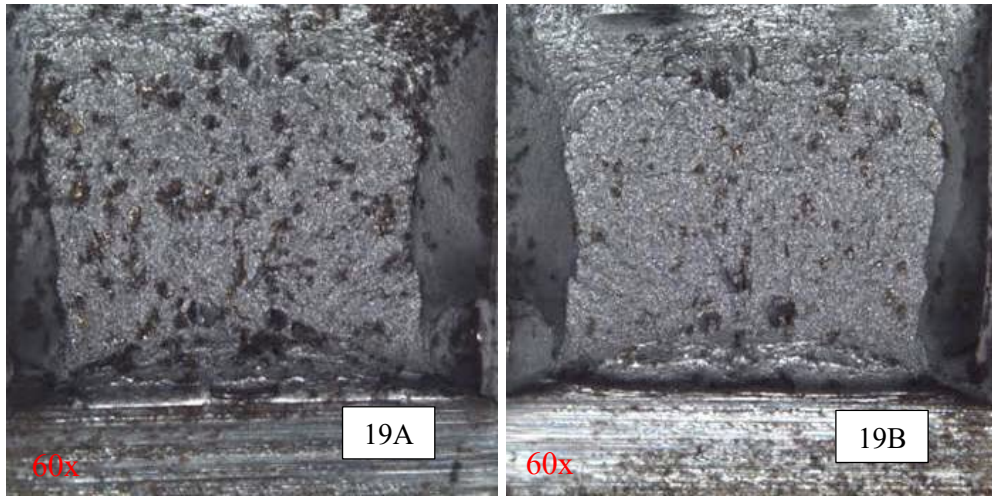
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C



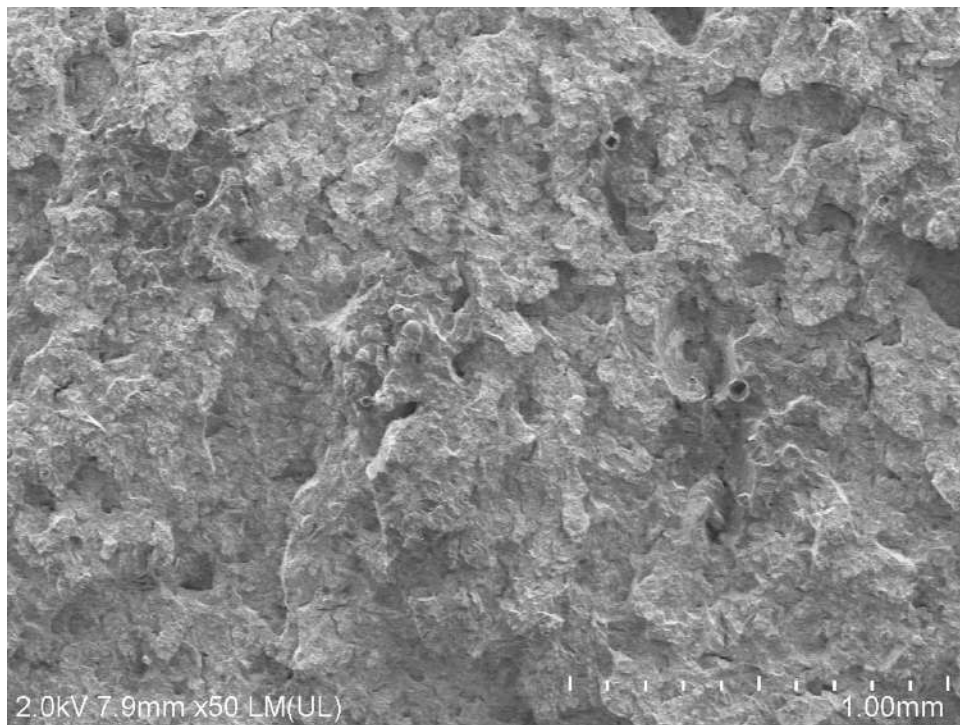
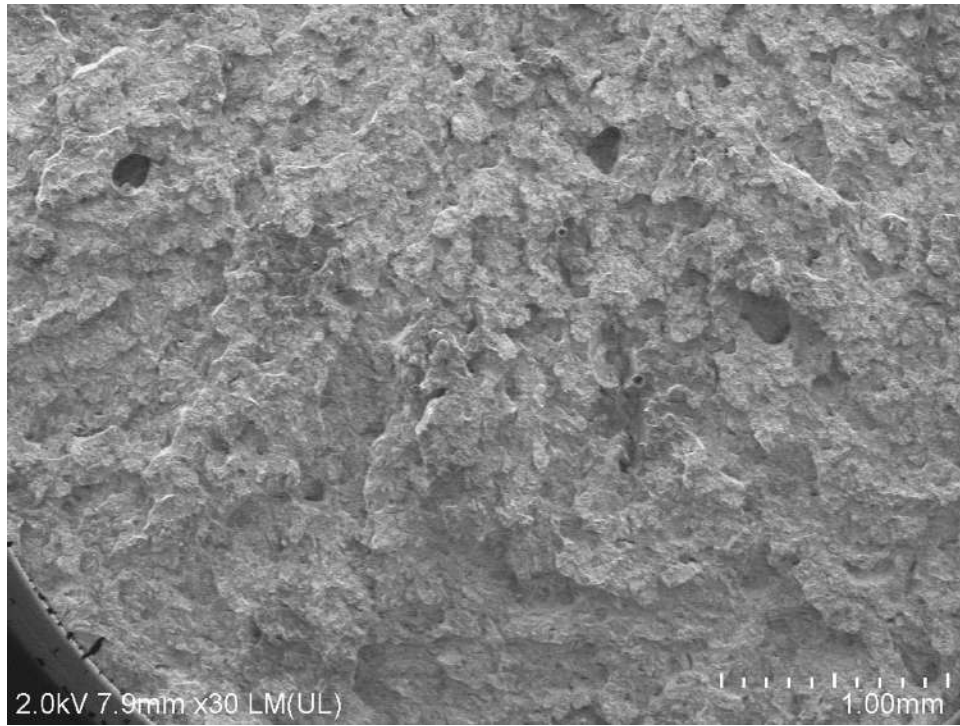
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -37°C



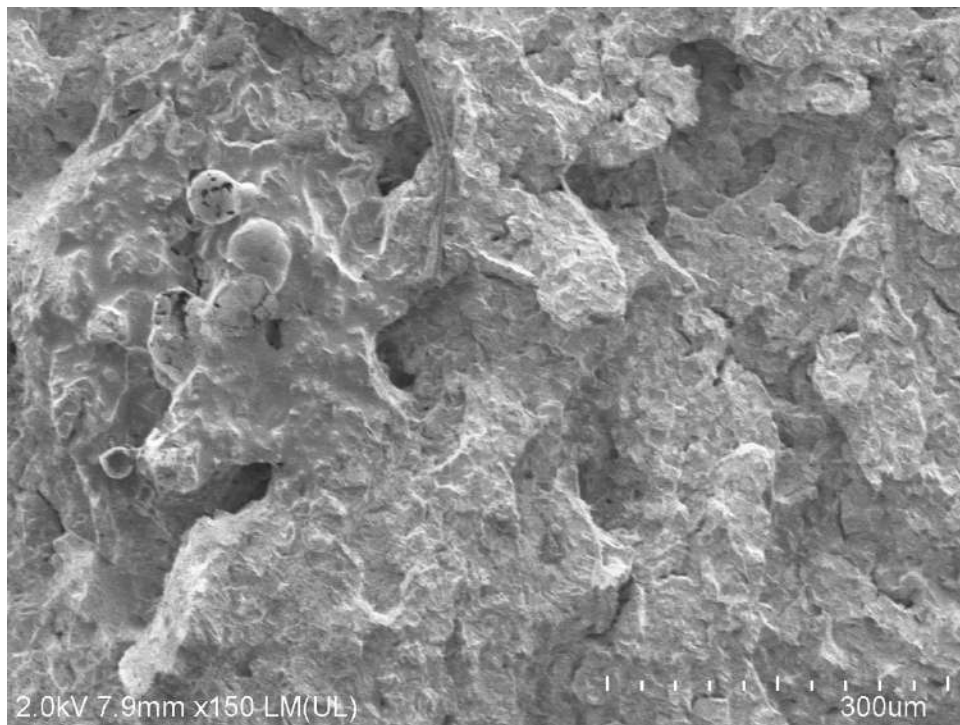
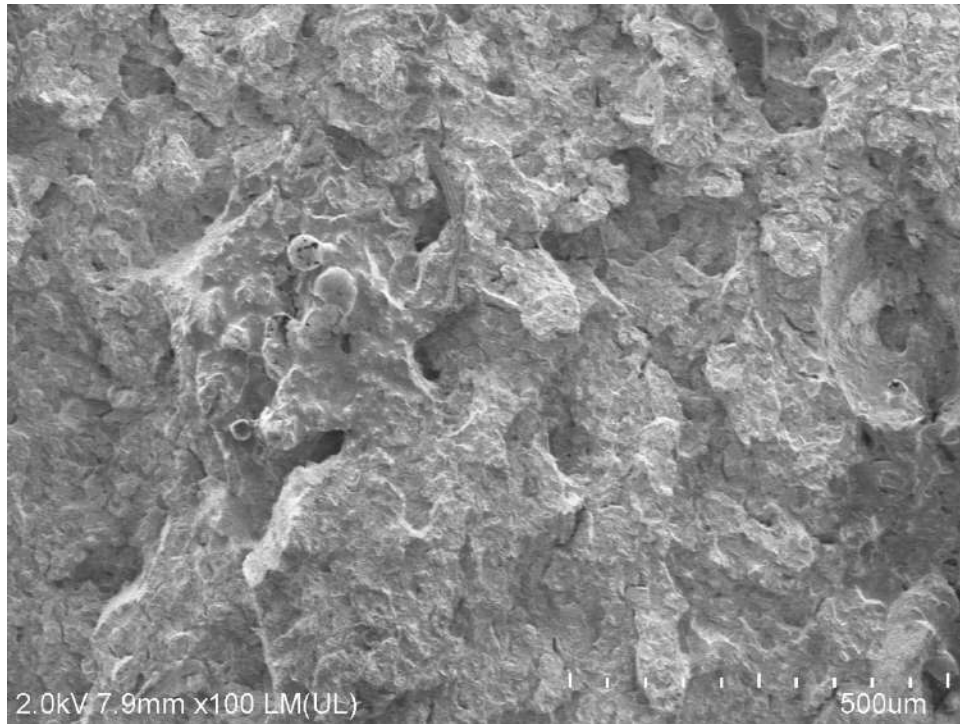
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C

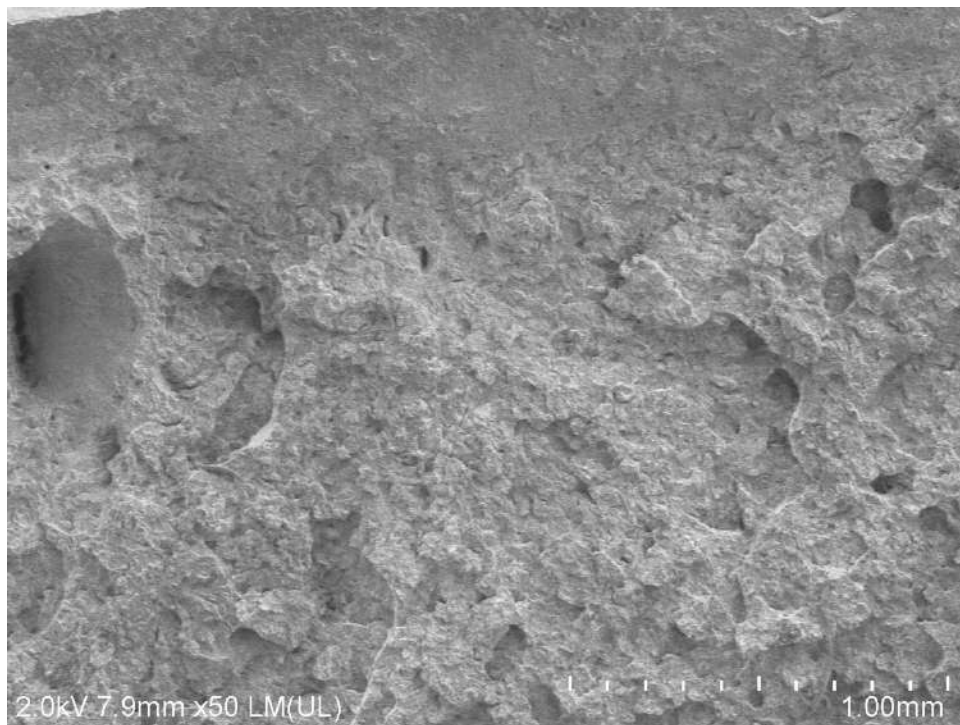


Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C

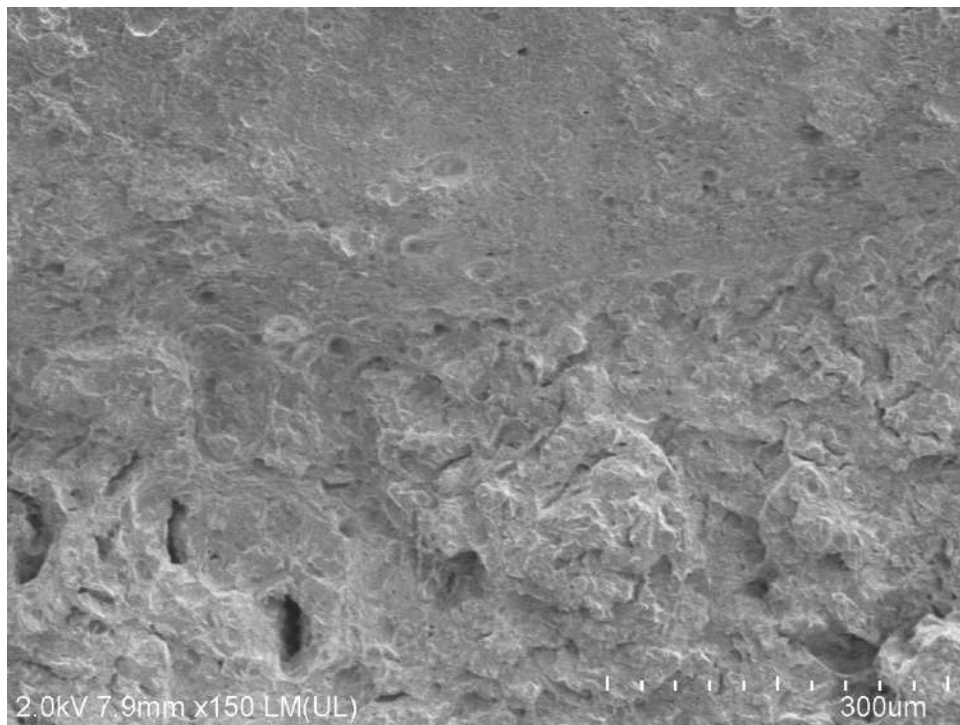
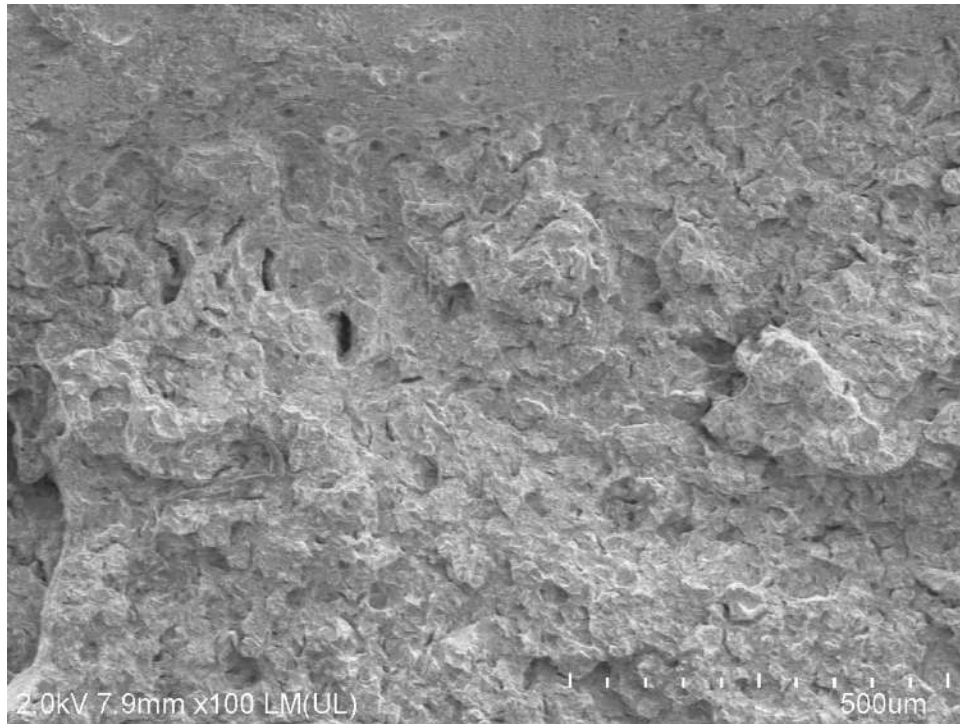




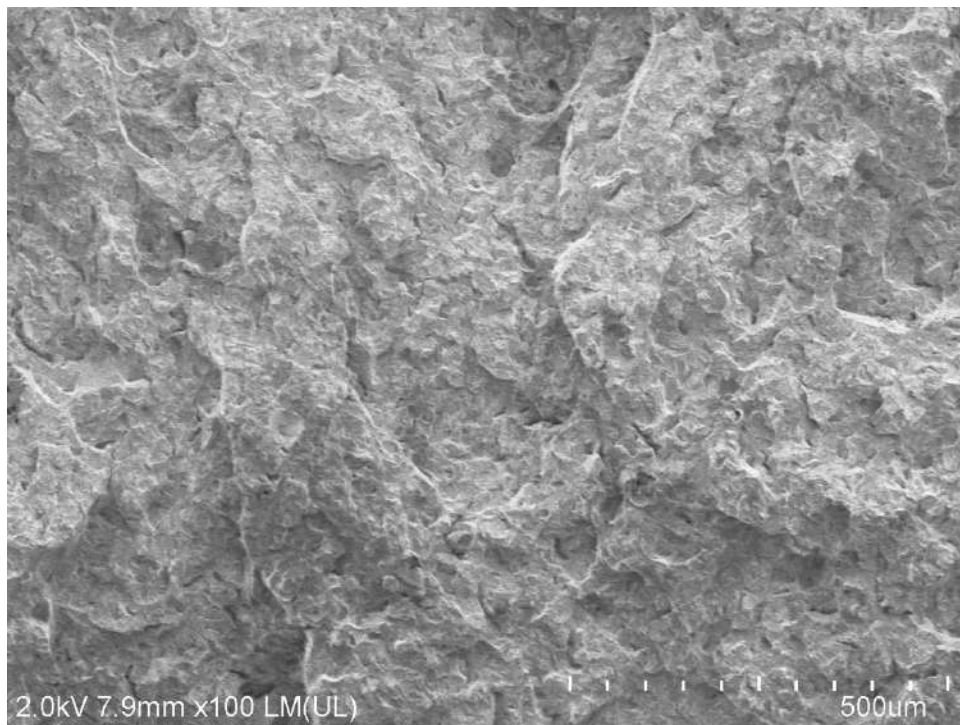
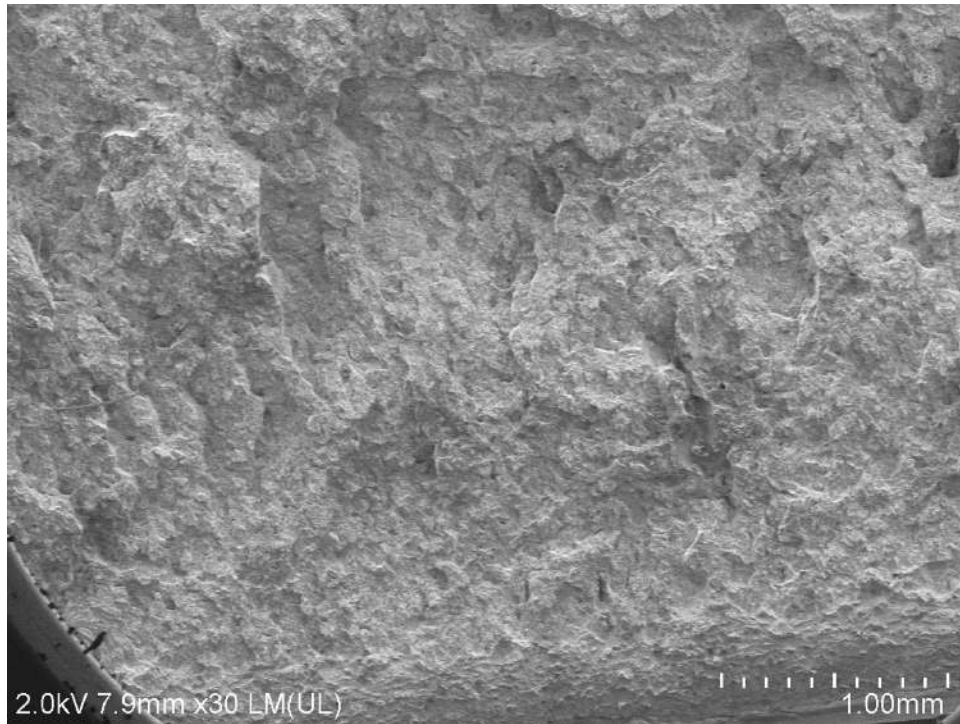
Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -40°C



Condición 3 revenido 408°C | 22MnB5 | temperatura de prueba -42°C

