

1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

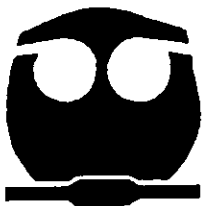
FACULTAD DE QUIMICA

“EFECTO DE LA TEMPERATURA DE
REVENIDO SOBRE LA FRACTURA
DINAMICA DEL ACERO UNS G41400”

T E S I S

294381

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A :
VICENTE ALVAREZ MACHORRO



MEXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. Gerardo Aramburo Pérez.
Vocal	Prof. Bernardo Fabián Campillo Illanes.
Secretario	Prof. Víctor Jorge Cortés Suárez.
1er. Suplente	Prof. Teresita Robert Nuñez.
2do. Suplente	Prof. Sergio García Galán.

Síto donde se desarrolló el tema:

- Instituto De Física, UNAM, Laboratorio de Metalurgia.
- Facultad De Química, UNAM, Edificio D.



Asesor

M. en C. Víctor Jorge Cortés Suárez



Supervisor Técnico

M. en C. Jaime Francisco García Robledo



Sustentante

Vicente Alvarez Machorro



Instituto De Física UNAM

El trabajo de investigación asociado a la tesis de licenciatura cuyo título es **"EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO SOBRE LA FRACTURA DINÁMICA DEL ACERO UNS G41400"**, fue realizado por el pasante **Alvarez Machorro Vicente** en los laboratorios del Instituto De Física De La UNAM, bajo la dirección del **Dr. Eligio A. Orozco Mendoza**, bajo la codirección del **M en C. Víctor Jorge Cortés Suarez** y bajo la asesoría del **M en C. Jaime Francisco García Robledo** técnico académico en el IFUNAM.



Dedico éste trabajo de tesis con mucho cariño y admiración a mis padres Antonia Machorro Ramos y Yoen Alvarez Madrigal, por todo su cariño, apoyo y comprensión hasta alcanzar ésta meta en mí vida.

Siempre les estaré eternamente agradecido por su enorme sacrificio, los quiero mucho y no los defraudare, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Eligio Orozco Mendoza, al M. en C. Víctor Jorge Cortes Suárez y al M. en C. Jaime Francisco García Robledo por haberme dado la oportunidad de trabajar bajo su dirección, por su paciencia, por su orientación, por su talento y por transmitirme su invaluable conocimientos y para realizar éste trabajo de tesis.

Agradezco a todos los miembros del jurado: Prof. Gerardo Aramburo Pérez, Prof. Bernardo Fabián Campillo Illanes, Prof. Teresita Robert Nuñez y Prof. Sergio García Galán, por su tiempo, sus comentarios y sugerencias para mejorar y enriquecer éste trabajo de investigación.

Al Dr. Lauro Bucio Galindo, a la M. en C. Jaquelin R. D. Cañetas Ortega, al Sr. Angel Osornio Basurto, a la Sra. Irma Orozco García y a todos los estudiantes y trabajadores que laboran en laboratorio de Metalurgia del Instituto de Física de la UNAM, por su valiosa colaboración y amistad en la realización de éste trabajo.

A mi familia, por su cariño y apoyo, en especial a mi hermano Yohén Álvarez Machorro y a mis abuelos Berta Ramos, Silverio Machorro, Rosario Madrigal por su preocupación, cariño, apoyo

y ejemplo. A mi abuelo Vicente Alvarez Morales que aunque no estés conmigo, se que desde es cielo me estas apoyando.

A mis maestros de educación básica y media superior, les agradezco por darme las bases y la disciplina para llegar a ésta meta. A mis profesores de la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica, por enseñarme una profesión y brindarme su amistad.

A mis amigos del primer semestre, en especial a Edith, Barbara, Esmeralda, Adriana y Leonardo, de la carrera y a mi amigo de la preparatoria Alejandro, por brindarme su amistad y apoyo.

A la Universidad Nacional Autónoma De México y a la Facultad De Química por haberme alojado en sus instalaciones y brindarme la oportunidad de tener una formación profesional.

Indice.

Introducción	i
Capítulo I. ANTECEDENTES.	
1.1. Fractura Dinámica.	1
1.2. Prueba de impacto Charpy.	2
1.3. Charpy instrumentado.	2
1.4. Factores de intensidad de esfuerzos dinámicos.	8
1.4.1. Factor de intensidad de esfuerzo dinámico ($K_{Id.}$)	8
1.4.2. J integral dinámica ($J_{Id.}$)	10
1.5. Fractografía y mecanismos de fractura.	11
1.5.1. Ruptura por clivaje.	12
1.5.2. Ruptura por coalescencia de poros.	12
1.6. Tratamiento térmico de temple y revenido.	13
1.7. Fragilidad por revenido.	15
Capítulo II. Desarrollo Experimental.	
2.1. Caracterización y preparación del material.	17
2.2. Maquinado de las probetas para impacto.	18
2.3. Condiciones de los tratamientos térmicos.	19
2.4. Pruebas de impacto con el péndulo instrumentado.	19
2.5. Ensayo de dureza.	20
2.6. Microscopía de barrido electrónico.	21
Capítulo III. Resultados.	
3.1. Microestructura del acero en condición de recibido.	22
3.2. Microestructuras del acero en condición de revenido.	22
3.2.1. Revenido a 100°C.	23

3.2.2. Revenido a 400°C.	25
3.2.3. Revenido a 650°C.	27
3.3. Efecto del revenido en la dureza del acero UNS G41400.	30
3.4. Pruebas de impacto en el péndulo instrumentado.	32
3.4.1. Revenido a 100°C.	32
3.4.2. Revenido a 400°C.	33
3.4.3. Revenido a 650°C.	34
3.5. Efecto del tratamiento térmico de revenido en la fractura del acero UNS G41400.	35
3.5.1. Relación entre la curva carga vs tiempo y la superficie de fractura.	35
3.5.2. Fractografías de las diferentes condiciones de revenido.	42
3.5.2.1. Revenido a 100°C.	42
3.5.2.2. Revenido a 400°C.	46
3.5.2.3. Revenido a 650°C.	52
3.5.3. Zona de iniciación de la grieta.	57
3.6. Energías de iniciación y propagación de grieta.	59
3.7. Efecto de la temperatura de revenido sobre la tenacidad a la fractura del acero UNS G41400.	60
 Capítulo IV. Validación De Resultados.	 63
 Capítulo IV. Conclusiones.	 65
 Referencias.	 66
 Anexo de fractografías.	 68

Introducción.

La fractura dinámica es una metodología para el estudio de la nucleación y propagación de grietas, y constituye un importante desarrollo tecnológico para asegurar la integridad de estructuras ingenieriles. La importancia de este desarrollo tecnológico radica en predecir el inicio de la rápida propagación de la grieta y de esa forma prevenir condiciones severas en grandes estructuras. Ejemplos donde se presenta el evento de fractura dinámica son : sistemas de conducción de gas y petróleo, tuberías en plantas nucleares, recipientes a presión, fallas en piezas aeronáuticas, tanques de almacenamiento criogénico, plataformas marinas, cargas provocadas por el tráfico urbano, ráfagas de viento, de agua, olas, sismos, partes automotrices, y procesos de manufactura, entre otros.

Para determinar la tenacidad a la fractura dinámica de materiales ingenieriles se utilizan las pruebas de impacto instrumentadas. Entre los diferentes equipos, destaca la prueba Charpy instrumentada, la cual es muy atractiva puesto que es uno de los procedimientos de ensayo más comúnmente utilizado.

La prueba de Charpy con entalla en V ha sido usada ampliamente para asegurar las características del cambio de fracturas dúctil a fractura frágil para metales, particularmente en aceros estructurares. Cuando un material sufre cierto grado de fragilización debido a la temperatura, se pueden llevar a cabo dicha prueba ya que esta se conduce fácilmente una prueba a diferentes temperaturas (elevadas o a temperaturas subcero). Adicionalmente para observar si la temperatura a la cual se da la transición de fractura dúctil a frágil, esta puede respaldar con una interpretación experta de las superficies de fractura en materiales convencionales. La energía de fractura de un espécimen estándar es observada normalmente por la lectura directa de un indicador, el cual mide la diferencia entre la altura de un péndulo. Para aceros la apariencia fibrosa / cristalina de la superficie de fractura puede indicar el grado de fragilización obtenido en las probetas. La contracción de la raíz de la entalla o el ángulo de

medición de dobles es registrado ocasionalmente. Entonces los problemas de fractura frágil han sido estudiados ampliamente, la variación de estas cantidades con la temperatura han sido de primordial importancia así como la de evaluar la respuesta de un material a un cierto tratamiento térmico.

Para el presente trabajo se instrumentó un péndulo con el fin de estudiar los diferentes grados de tenacidad alcanzados por diferentes tratamientos térmicos de temple y revenido en un acero UNS G41400 y como afectan dichas condiciones de revenido sobre la fractura dinámica del acero UNS G41400, aplicando la prueba Charpy instrumentada.

Capítulo I. Antecedentes.

1.1. Fractura Dinámica.

La fractura dinámica se presenta bajo condiciones de rápida aplicación de una carga, producida por un impacto o por la detonación de un explosivo[1], ejemplos donde la fractura dinámica ocurre en estructuras ingenieriles son los siguientes :

- Tuberías de transmisión y distribución de gas;
- Tuberías en plantas nucleares;
- Recipientes a presión;
- Fracturas en piezas de aeronaves;
- Tanques criogénicos de almacenaje.

La mecánica de la fractura dinámica es una metodología para el estudio de la iniciación, el arresto y la propagación rápida de grietas, ésta constituye una tecnología clave para asegurar la integridad de estructuras ingenieriles. Esta tecnología es de gran importancia cuando el crecimiento rápido de la grieta, no puede excluirse completamente y las consecuencias del crecimiento de la grieta a gran escala sería severo para las estructuras[2].

Por medio de la prueba Charpy instrumentada y la aplicación de la fractura dinámica, se obtienen registros de carga vs tiempo con los cuales, se puede evaluar el comportamiento a la fractura dinámica de los materiales, apoyados siempre en la observación y el análisis de la superficie de fractura del material, así como el cálculo de un factor de intensidad de esfuerzos dinámico para las diferentes geométricas de grieta, el cual se puede sustituir en ecuaciones de diseño, para predecir el comportamiento mecánico del material en condiciones de servicio. Dichas características están en función de la temperatura, la velocidad de aplicación de la carga y de las condiciones del ambiente.

El desarrollo de pruebas dinámicas en probetas con entalle simplifican el procedimiento experimental, reduciendo el tiempo y el costo de la prueba[3 y 16].

1.2. Prueba de Impacto Charpy.

La prueba de impacto Charpy fue desarrollada para determinar la susceptibilidad a la fractura frágil de un acero a una temperatura de servicio; obteniendo resultados que no pueden ser sustituidos en una ecuación de diseño. La prueba Charpy es un excelente medio para determinar diferencias relativas en la energía de impacto entre dos materiales diferentes o materiales con microestructura diferente, aunque esto es útil, dicha prueba está limitada a materiales que tienen una razonable cantidad de tenacidad y en algunos casos se determina la transición dúctil - frágil como una función de la temperatura. La prueba se realiza siguiendo la norma ASTM E 23[8].

Una prueba Charpy tradicional provee información como energía de impacto, contracción del entalle o porcentaje de fractura fibrosa o clivaje, todo esto en función de la temperatura, entonces por instrumentación de la maquina Charpy se puede obtener información adicional[1].

1.3. Charpy instrumentado.

El Charpy instrumentado adicionalmente proporciona curvas carga vs tiempo además de la energía absorbida. La forma y posición de la curva de la energía de impacto puede entenderse mejor comparando con los datos obtenidos de la curva carga vs temperatura.

La prueba Charpy instrumentada permite determinar:

1. La energía asociada con la iniciación y propagación de la fractura.

2. La temperatura de transición dúctil - frágil o temperatura de fragilización.
3. El campo de esfuerzos dinámico.
4. El esfuerzo intrínseco de la fractura por clivaje.
5. La tenacidad a la fractura dinámica.
6. El desplazamiento de apertura de grieta crítica.
7. La velocidad de grieta.
8. Una medida indirecta de la superficie o apariencia de la fractura.

La instrumentación en una máquina de impacto Charpy permite monitorear analógicamente una respuesta de carga contra tiempo mientras que en la probeta Charpy se presenta deformación y fractura. La primera ventaja de la prueba Charpy instrumentada es obtener información adicional sobre el mecanismo de fractura en la probeta, curvas carga vs tiempo, manteniendo probetas estandarizadas realizando una operación simple [1].

La señal de salida de la celda de carga durante el impacto se registra en un osciloscopio, mediante valores de voltaje y representa el historial de carga vs tiempo del entalle en la probeta.

Las curvas carga vs tiempo obtenidas por el péndulo instrumentado, presentan diferentes estados del proceso de fractura en la probeta:

- Una elevación elástica.
- Una deformación plástica homogénea antes del punto máximo de la curva.
- Una disminución progresiva de la carga después del punto máximo.
- Una caída estrepitosa de la carga.
- Una disminución progresiva de la carga antes del final de la ruptura de la probeta.

La interpretación de la curva generalmente muestra que las dos primeras etapas de la curva corresponden a la deformación de la probeta antes de la iniciación de la grieta. La disminución progresiva de la carga registrada en la curva se asocia a una propagación estable o dúctil de la grieta, mientras que la caída estrepitosa de la carga se asocia a una propagación frágil o inestable de la grieta.

La Fig. 1.1. y 1.2., ilustran esquemáticamente el comportamiento a la fractura como una función de la temperatura de un material, mostrando las diferentes zonas de una superficie de fractura como es: la zona de iniciación, zona de propagación dúctil, zona de propagación frágil y zona de ruptura de labio de corte; además de puntos importantes del proceso de fractura dinámica como la carga máxima, la cedencia general por carga, la carga de fractura rápida (generalmente clivaje), la carga de arresto después de la propagación de la fractura rápida, el tiempo para la carga máxima, el tiempo para la cedencia general y la energía absorbida a la carga máxima; todo esto relacionándolo con la superficie de fractura de la probeta. El área bajo la curva en cada etapa representa la correspondiente energía.

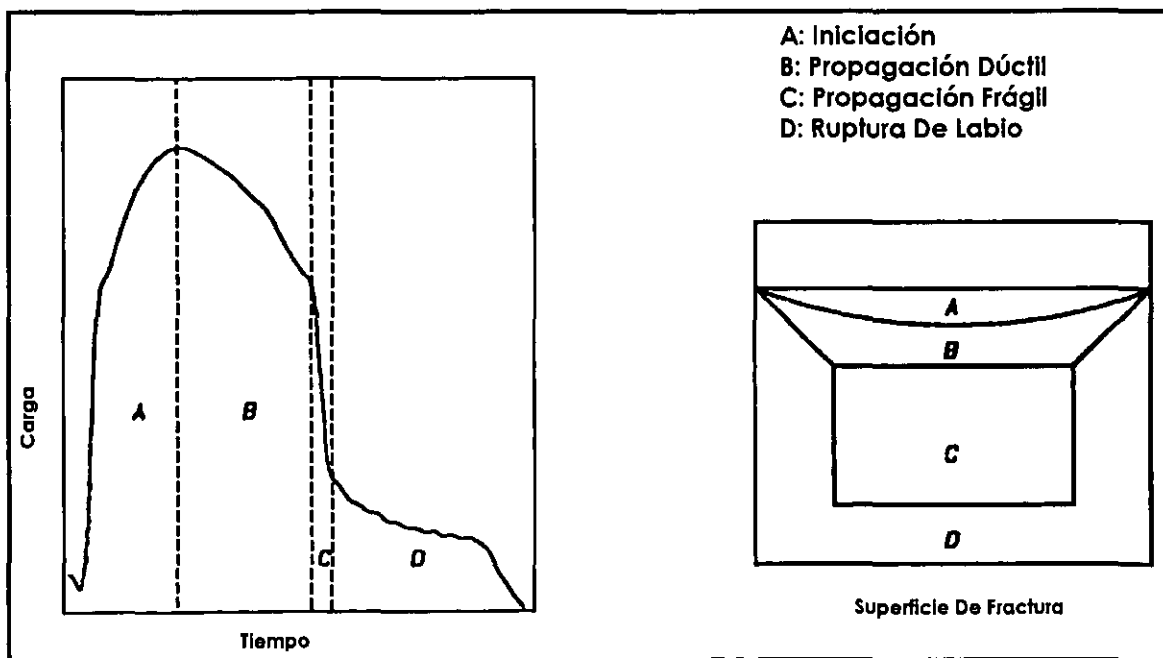


Figura 1.1. Curva carga vs tiempo relacionada a la superficie de fractura.

Como se muestra en la Fig. 1.2., dichas zonas de la curva carga vs tiempo son función de las características de la probeta bajo estudio, ocasionando que algunas zonas se supriman o que no sean apreciables dentro de la curva, especialmente en materiales con comportamiento frágil[14].

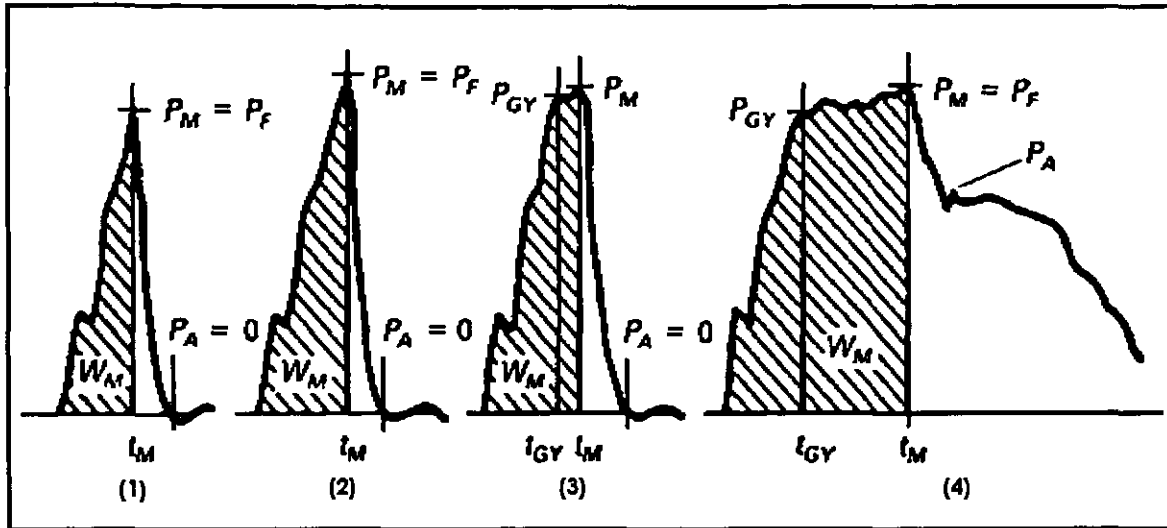


Figura 1.2. Datos que se pueden obtener de una curva carga vs tiempo en la prueba Charpy instrumentada, a través de diferentes grados de tenacidad.

Donde:

- P_M = Carga máxima.
- P_{GY} = Cedencia general por carga
- P_F = Carga de fractura rápida (generalmente Clivaje)
- P_A = Carga de arresto después de la propagación de la fractura rápida.
- t_M = Tiempo para la carga máxima.
- t_{GY} = Tiempo para la cedencia general.
- W_M = Energía absorbida a la carga máxima. $W_M = V_o \int P_M dt$.

En el caso de fractura lineal elástica, la energía de iniciación de la grieta se calcula hasta la carga máxima en condiciones de baja tenacidad (curvas 1, 2 y 3 de la Fig. 1.2), debido a que generalmente se presenta a la carga máxima[9].

Para grados de tenacidad más elevados (curva 4), la energía de iniciación se calcula hasta la carga de fractura, debido a que la fractura puede propagar en modo mixto (fractura frágil y dúctil) o en fractura elasto – plástica[10 y 14].

El valor de energía, W_m se asocia como el área bajo la curva carga vs tiempo a una carga máxima P_m . Este valor de impulso se convierte a energía usando la segunda ley de Newton en el cual acontece que la velocidad del péndulo decrece durante el proceso de deformación y fractura, la disminución de esta velocidad es proporcional a la carga instantánea en la probeta a un tiempo particular " t_i ". La energía actual absorbida es E_i se simplifica a:

$$\Delta E = E_a \left(1 - \frac{E_a}{4 E_0} \right) \quad (1.1)$$

Donde:

- E_0 = energía cinética disponible en el péndulo
- V_0 = velocidad de impacto inicial.
- m = masa efectiva del péndulo.
- $E_a = V_0 \int P dt$.

Lo más común para esta operación es usar galgas (strain gages) en el martillo para sensor el comportamiento de carga contra tiempo de la probeta de prueba.

El sistema de medición de la señal esta constituido por una galga, un puente de Wheatstone, una fuente de excitación, una ganancia y un sistema de adquisición de la señal, representado en la Fig. 1.3.

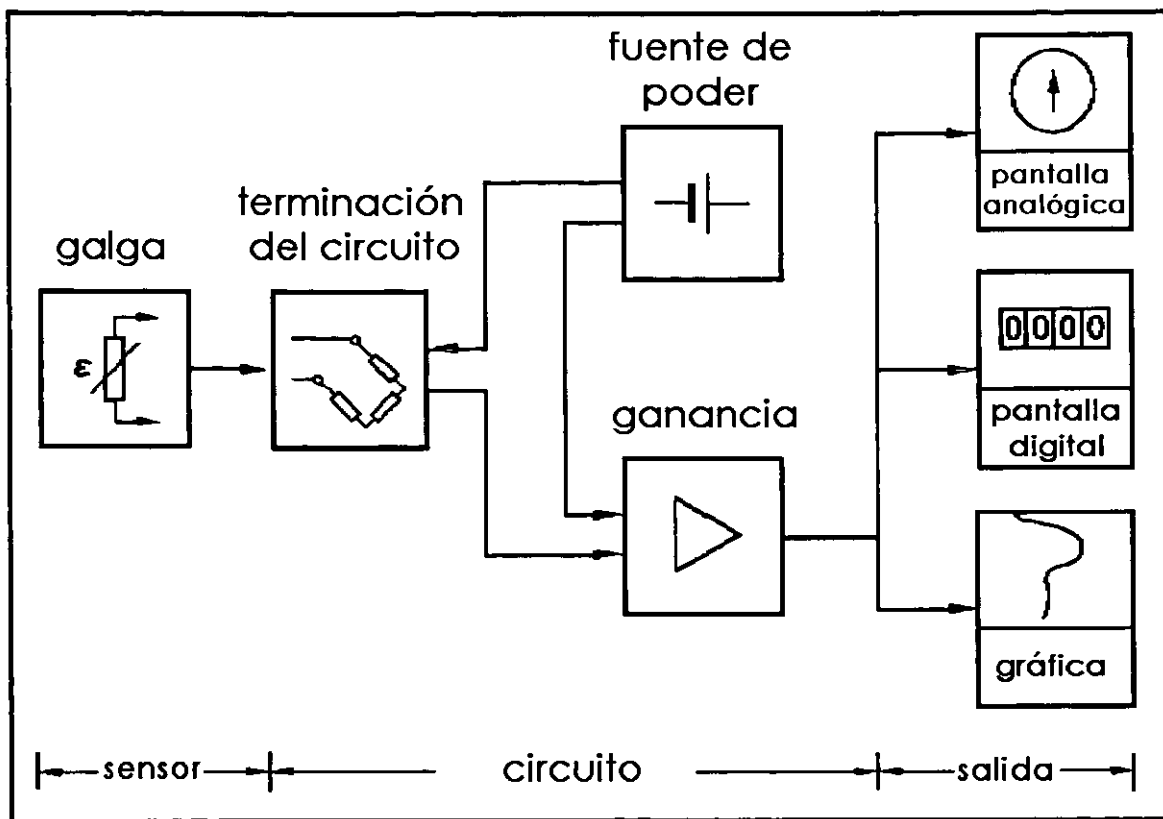


Fig. 1.3. Sistema de medición del péndulo instrumentado.

La galga es un dispositivo utilizado para convertir esfuerzos mecánicos en una señal eléctrica a través de una resistencia, como se muestra en la Fig. 1.4.; en este caso la resistencia era de 350 Ohms.

La galga consta de:

- a. Material de soporte.
- b. Rejilla de medición.
- c. Conexiones.
- d. Longitud efectiva de la rejilla.

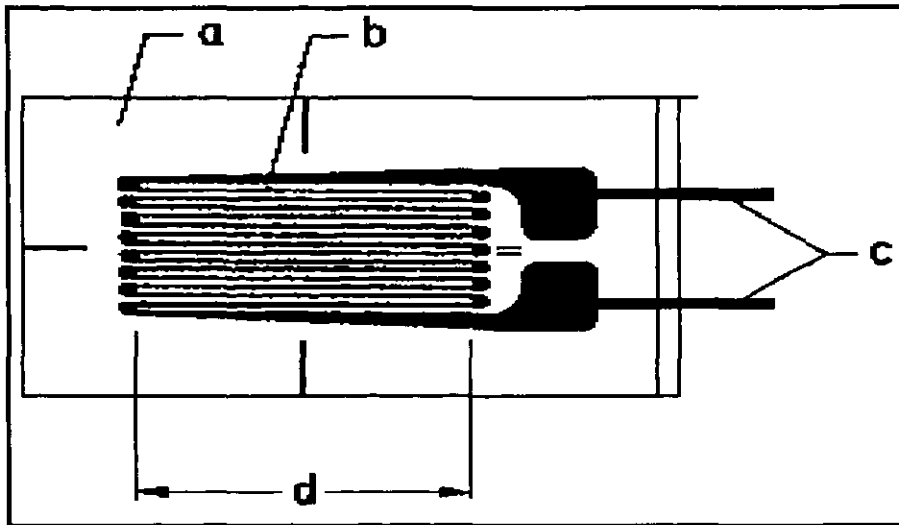


Fig. 1.4. Galga o Strain Gage

Empleando una resina especial (bonding 200) la galga se pega en el martillo del péndulo. La galga cambia su resistencia cuando el martillo se deforma al impactar la probeta. Con el puente de Wheatstone ésta resistencia puede balancearse y producir una señal de voltaje que se amplifica para obtenerse en un osciloscopio una señal de voltaje contra tiempo ya que los eventos ocurren en milésimas de segundo. La deformación de la galga, se calibró con una celda de carga en una maquina universal para pruebas mecánicas marca Shimatzu, la calibración permite sensor el comportamiento de carga contra tiempo de la probeta de prueba[4 y 18].

1.4. Factores de intensidad de esfuerzos dinámicos.

1.4.1. Factor de intensidad de esfuerzo dinámico (K_{Id}).

El valor de K_{Id} caracteriza la resistencia de una material a la fractura en presencia de grieta aguda bajo condiciones tensiles severas, dicho valor representa el limite inferior de la tenacidad a la fractura de un material elástico lineal o frágil. Esté valor puede ser usado para estimar la relación entre el esfuerzo de fractura y el tamaño del defecto para un material en servicio donde

las condiciones de altos esfuerzos podrían estar presentes. Este valor puede ser usado en un cierto número de aplicaciones:

- Evaluar los efectos de variables metalúrgicas como la composición o tratamiento térmico, o en operaciones de fabricación como lo es en soldadura o forja.
- En la caracterización de la tenacidad a la fractura de materiales nuevos (cerámicos) y ya existentes, que presentan un comportamiento frágil, donde el crecimiento de la grieta es de manera inestable y muy rápida (fractura por clivaje).
- En la evaluación en condiciones de servicio para establecer el material más adecuado para una aplicación específica.
- Para especificaciones de aceptación y control de calidad durante la manufactura.

Este método es válido si las probetas cumplen con las dimensiones mínimas para la prueba guardando una relación $1 \leq W/B \leq 4$, donde W es el ancho del espécimen y B es el espesor de la probeta y si los valores de P_Q y P_{max} guardan una relación de P_Q/P_{max} menor a 1.10, si la relación excede de 1.10 el método no es válido; los valores de K_{Ia} son función tanto de la velocidad de la prueba como de la temperatura, así como del medio ambiente. K_{Ia} se calcula siguiendo la norma ASTM A – 399 como se muestra en la ecuación 1.2 y 1.3[9].

$$K_{Ia} = \left(\frac{P_Q S}{B W^{3/2}} \right) f \left(\frac{a}{W} \right) \quad (1.2)$$

donde :

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left(\frac{\left(3(\alpha)^{1/2} [1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha) + 2.7\alpha^2]\right)}{2((1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2})} \right) \quad (1.3)$$

donde: $\alpha = a/W$

1.4.2. J Integral dinámica (J_{Id})

La integral J es una expresión matemática de la integral de una línea o superficie usada para caracterizar el campo de esfuerzos local alrededor de una grieta. El objetivo del procedimiento de J_{Id} es el de determinar el valor de J cerca de la iniciación de la grieta, caracterizando la tenacidad de los materiales cerca de la extensión de la grieta.

El J_{Id} marca el inicio de la etapa donde el material desarrolla una resistencia al crecimiento de la grieta, este valor llega a ser una función de la velocidad de prueba en régimen dinámico. Este valor puede ser usado en un cierto número de aplicaciones:

- Como un criterio de la tenacidad a la fractura dúctil para evaluar los efectos de variables metalúrgicas, tratamientos térmicos y materiales soldados.
- Es utilizado para evaluar la tenacidad a la fractura en una amplia gama de materiales de comportamiento dúctil, donde el crecimiento de la grieta es estable y lento (mecanismo de coalescencia de poros) sin embargo este método no es aplicable a materiales de muy alta tenacidad.

El J_{Id} es calculado siguiendo la norma ASTM E - 813, como se muestra en la ecuación 1.4 y 1.5[10].

$$J = \left(\frac{F U}{B (W - a)} \right) \quad (1.4)$$

$$F = 2 - (0.3 - 0.7x)(1-x) - e^{(0.5-7x)} \quad (1.5)$$

donde $x = a / w$.

Para el caso de materiales que presentan un modo mixto de fractura se ha creado una función denominada $K(J)$, para poder determinar la tenacidad a la fractura dinámica, relacionando criterios de fractura lineal elástica y elasto-plástica como se indica en la ecuación 1.6[14].

$$K(J) = \sqrt{\left(\frac{J_{ld} E}{1 - \nu^2} \right)} \quad (1.6)$$

donde: E = modulo de elasticidad del material, ν = modulo de Poisson.

1.5. Fractografía y mecanismos de fractura.

Una de las fuentes que proporciona más información relacionada con las causas de la falla es la superficie de fractura de la probeta. La fractura puede presentarse por trayectoria transgranular (a través de los granos), o por trayectoria intergranular (a lo largo de la frontera de grano), por las condiciones del estudio se presentan únicamente dos modos de fractura:

- Fractura por clivaje.
- Ruptura por coalescencia de poros.

1.5.1. Fractura por clivaje.

Es un mecanismo de fractura de baja energía que progresa a lo largo de los planos cristalográficos de bajo índice de Miller, conocidos como planos de clivaje. Teóricamente una fractura por clivaje debería tener perfectamente las caras iguales, por ser completamente plana. Sin embargo, las aleaciones ingenieriles son policristalinas que contienen fronteras de granos, subgranos, inclusiones y otras imperfecciones que afectan la propagación de la fractura por clivaje. Estas imperfecciones y el cambio en la orientación de la red cristalina, da origen a marcas características como escalones de clivaje, patrones de río, marcas de pluma, patrones Chevron y lenguas.

Frecuentemente las fracturas por clivaje se inician en planos de clivaje paralelos, sin embargo; a medida que la fractura avanza, el número de planos activos disminuye por un proceso de unión, formado progresivamente escalones de clivaje más altos. La fractura por clivaje se presenta principalmente a bajas temperaturas, en condiciones de esfuerzos triaxiales y una alta velocidad de deformación[11].

1.5.2. Ruptura por coalescencia de poros.

Cuando la sobrecarga es la principal causa de la fractura, algunas aleaciones fallan por un proceso conocido como coalescencia de microporos. La nucleación de los microporos se localiza en regiones de partículas de segunda fase, inclusiones, fronteras de grano y apilamiento de dislocaciones. A medida que la deformación en el material aumenta, los microporos crecen, coalescen y eventualmente forman una superficie de fractura continua, este tipo de fractura exhibe numerosas depresiones semejantes a copas que son el resultado directo de la coalescencia de los microporos.

El tamaño de las cavidades en una superficie de fractura es gobernado por el número y distribución de microporos nucleados, cuando los sitios de nucleación

son pocos y espaciados, los microporos crecen antes de coalescer y el resultado es una superficie de fractura que contiene grandes cavidades; se forman pequeñas cavidades cuando numerosos sitios de nucleación se activan y microporos adyacentes coalescen antes de tener oportunidad de crecer a mayores tamaños. Dependiendo de la microestructura y plasticidad del material, las cavidades pueden exhibir una forma cónica más profunda o menos profunda, las superficies de fractura resultantes de las condiciones de carga por desgarre o corte, exhiben cavidades alargadas, la característica de una cavidad alargada es la apertura de la cavidad en uno de los extremos; es decir, la cavidad no está completamente rodeada por un reborde, en el caso de una fractura por desgarre, las cavidades alargadas en ambas caras de la fractura, están orientadas en la misma dirección y los puntos finales cerrados en el origen de la fractura. A la fractura por coalescencia de poros se le asocia con la fractura dúctil[11].

1.6. Tratamiento térmico de temple y revenido.

Según E. Scheil[13], la martensita de temple se forma a partir de una solución sólida intersticial en la que los átomos de carbono se encuentran en el centro de las aristas de la estructura bcc del hierro. La formación de la martensita se produce como una transformación por cizallamiento, donde la transformación no depende de la difusión, y no necesita por ello tiempo de incubación alguno, ésta solución forzada del carbono en el hierro se encuentra distendida tetragonalmente, conocida como martensita tetragonal. Al formarse la martensita, se cizallan generalmente regiones enteras de austenita, produciéndose el nuevo constituyente en forma de plaquitas, agujas y lanzas.

Los aceros después del temple quedan generalmente duros y frágiles para los usos que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen con el revenido, que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior por un lapso de tiempo y luego enfriándolo generalmente al aire y otras veces en aceite o agua, según la

composición. Después del temple, el acero esta constituido por cristales de martensita, al aplicar el revenido se modifica inicialmente la estructura de la martensita en un rango de 150 a 700°C. El carbono saturado en la estructura es expulsado en forma de fases de carbono finamente divididas.

El revenido genera una fina dispersión de carburos en una matriz de Fe y martensita, muchas veces es diferente a la martensita obtenida del temple. En muchos de los aceros la reacción de la martensita es completa y la austenita retenida durante el proceso de revenido tiende a modificarse en el revenido. Las propiedades de aceros revenidos son primariamente determinados por el tamaño, forma, composición y distribución de los carburos formados; estos cambios en la microestructura usualmente disminuye la dureza, la resistencia a la tensión y el esfuerzo de fluencia pero incrementa la ductilidad y la tenacidad.

Basados en estudios de rayos X, dilatométricos y microestructurales, durante el proceso de revenido de la martensita, el fenómeno tiene cuatro distintos estados que pueden traslaparse :

1. La primera etapa se realiza a bajas temperaturas, inferiores a 250°C, se precipita un carburo de hierro épsilon, el contenido de carbono de la martensita disminuye en una cantidad importante, en esta etapa cambia de martensita tetragonal a martensita cubica.
2. En la segunda etapa de 200 a 300°C, ocurre la descomposición de la austenita retenida.
3. En la tercera etapa de 200 a 350°C, ocurre el remplazo del carburo épsilon por cementita (Fe_3C), la martensita pierde la tetragonalidad.
4. En la cuarta etapa; por arriba de 350°C, la cementita pierde su estructura cristalina haciéndose esferoidizada, existe recristalización de la martensita.

Al progresar el calentamiento la coalescencia y globulización de la cementita continua y a 600°C a grandes aumentos la matriz queda constituida por ferrita y glóbulos de cementita.

Las variables asociadas con el revenido que afectan la microestructura y las propiedades mecánicas de un acero revenido incluyen:

- Temperatura de revenido.
- Tiempo de revenido.
- Velocidad de enfriamiento desde la temperatura de revenido.
- Composición del acero incluyendo el contenido de carbono, contenido de aleantes y contenido de elementos residuales.

La temperatura y el tiempo son variables interdependientes en el proceso de revenido, bajas temperaturas y tiempos largos pueden usualmente producir el mismo resultado que temperaturas altas y tiempos cortos; estos efectos se deben a la difusión del carbono y a los elementos aleantes proporcionando diferentes propiedades mecánicas en función de la temperatura y tiempo de revenido.

La velocidad de enfriamiento desde la temperatura de revenido afecta a la tenacidad del acero, altas velocidades de enfriamiento disminuyen la tenacidad[5, 6 y 13].

1.7. Fragilidad por revenido.

Cuando se efectúa el revenido de algunas clases de aceros en la zona de temperaturas comprendida entre los 250°C y 400°C aproximadamente, se ha observado experimentalmente que hay una ligera disminución de la tenacidad del material. Esta fragilidad se inicia en los comienzos de la etapa dos del revenido y se presenta precisamente cuando la cementita forma una red o película que envuelve las agujas de martensita, la fragilidad es máxima cuando

mayor es la continuidad de esa red de cementita; en cambio a temperaturas más elevadas al producirse la coalescencia de la cementita, tiende a desaparecer esa red y a aumentar la tenacidad[5 y 6].

El mecanismo de activación de la fragilidad por revenido para éste tipo de aceros es la precipitación de cementita en forma de placas alrededor de los bordes de las agujas de martensita y a la segregación de impurezas.

La fragilidad por revenido se detecta por un incremento en la temperatura de transición dúctil - frágil en una probeta Charpy con entalle. El incremento en la temperatura de transición debido a las condiciones del tratamiento térmico son acompañados de un cambio gradual en el modo de fractura frágil, cambiando de superficies de fractura completamente transgranular a superficies de fractura completamente intergranular[11].

Capítulo II. Desarrollo Experimental.

2.1. Caracterización y preparación del material.

El material empleado fue un acero UNS G41400 de 12.7 mm de espesor sin tratamiento térmico con la siguiente composición química y las siguientes propiedades mecánicas, mostradas en las Tablas I y II, respectivamente:

Tabla I. Composición química.

% C	% Mn	% P Max	% S Max	% Si	% Cr	% Mo
0.4	0.87	0.035	0.04	0.27	0.95	0.2

Tabla II. Propiedades mecánicas.

Resistencia a la tracción	Esfuerzo de fluencia
792 MPa	620 MPa

Este material se clasifica como acero al cromo - molibdeno, y posee buenas características de templabilidad, ductilidad, resistencia al desgaste y capacidad para soldarse. Este acero se utiliza ampliamente para construir recipientes sujetos a presión, fabricar partes estructurales de los aviones, ejes de automóviles, etc.[7].

La microestructura del acero se determinó en la condición de recibido y en la dirección de laminación, utilizando las técnicas de metalografía, microscopía óptica, microscopía de barrido electrónico y fotomicrografía.

La observación de la microestructura se realizó con un microscopio Olympus PMG3 y con un microscopio de barrido electrónico Jeol modelo JSM 5200. La microestructura se reveló utilizando un ataque químico de Nital al 2% aplicado durante 15 s.

2.2. Maquinado de las probetas para impacto.

De la placa de acero, se extrajeron las probetas para la prueba de impacto, éstas se maquinaron de acuerdo a la norma ASTM E-23[8], con entalle en V; como se ilustra en la Fig. 2.1. El entalle de las probetas se maquinó con una orientación L - T[9], donde L representa el plano del entalle que es perpendicular a la dirección de laminación y T la dirección de propagación de la grieta, como se ilustra en la Fig. 2.2.

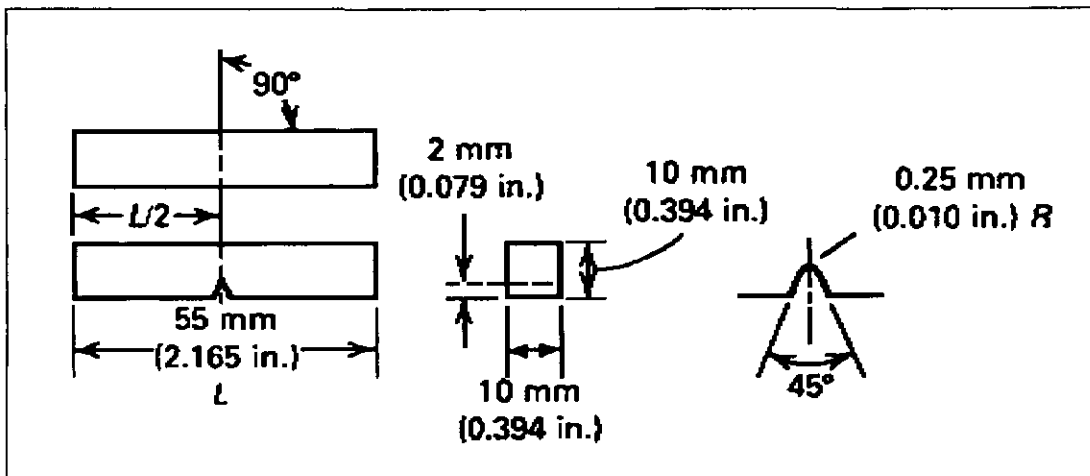


Fig. 2.1. Dimensiones estándar según la norma ASTM E-23 para probetas Charpy con entalle en V.

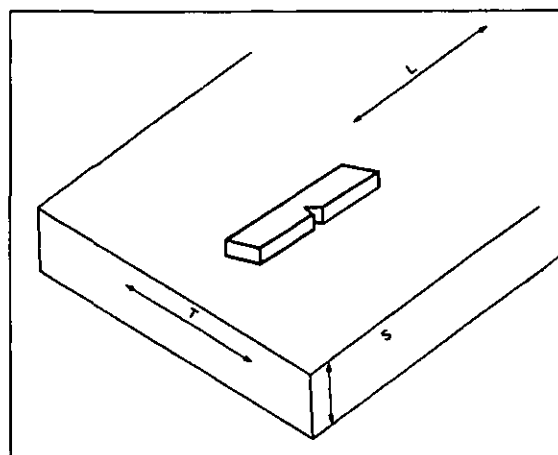


Fig. 2.2. Orientación del plano del entalle. L: longitud (laminación, extrusión, eje de forja), T: ancho (transversal larga), S: espesor (transversal corta).

2.3. Condiciones de los tratamientos térmicos.

Las probetas de impacto tipo Charpy se sometieron a un ciclo de tratamiento térmico de temple y revenido para producir diferentes grados de tenacidad.

El tratamiento de temple consistió de una austenización a 850°C por espacio de 30 minutos seguido de un rápido enfriamiento en aceite como medio de temple. Inmediatamente después, las probetas se introdujeron en el horno de revenido para evitar agrietamiento, las condiciones de revenido se muestran en la Tabla III:

Tabla III. Condiciones de revenido.

Condición	Tiempo de permanencia	Medio de enfriamiento
Revenido a 100°C	1, 1.5, 2 horas	Aire quieto
Revenido a 400°C	1, 1.5, 2 horas	Aire quieto
Revenido a 650°C	1, 1.5, 2 horas	Aire quieto

Los tratamientos térmicos se realizaron en dos hornos Linberg tipo mufla, que proporcionan una temperatura máxima de 1200°C[17].

2.4. Pruebas de impacto con el péndulo instrumentado.

El comportamiento a la fractura dinámica se realizó mediante la prueba de impacto Charpy, empleando un péndulo instrumentado marca SATEC modelo SI - 1D3 con capacidad máxima de 162.7 J. La Fig. 2.3. muestra un esquema del péndulo instrumentado. La galga empleada es marca VISUAL MEASUREMENT utilizada para convertir los esfuerzos mecánicos debido al impacto en una señal eléctrica y balanceada por medio de un puente de Wheatstone. Las señales generadas se registraron en una tarjeta osciloscopio marca Keithley utilizada para obtener una señal de salida digital.

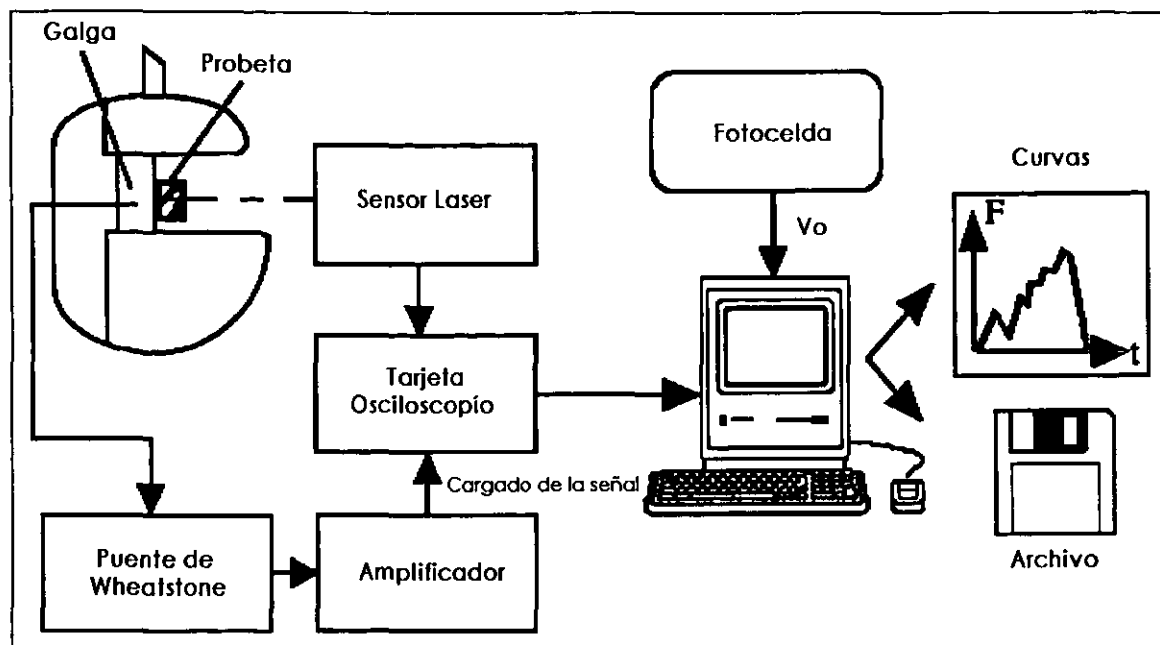


Fig. 2.3. Esquema del péndulo instrumentado.

La carga de impacto se registró a través de la señal proporcionada por una galga de 350Ω , excitada con un transductor acondicionador de señales a 5 V, con una ganancia de 1 k y una frecuencia de 10 KHz, en esta etapa a la señal se le elimina ruido y se amplifica. La velocidad inicial de impacto (v_0) se midió con una fotocelda acoplada a un láser, todos estos componentes están conectados a una PC personal. La velocidad de impacto medida con el osciloscopio fue de 5.2 m/s, la energía de compensación es de 1 J [18].

2.5. Ensayo de dureza.

Se utilizó el ensayo de dureza para obtener una inmediata caracterización de la respuesta del acero al tratamiento térmico. Las durezas se midieron en un durómetro marca Buehler, empleando la escala Rockwell C, con una carga de 150 kg y empleando un penetrador de diamante.

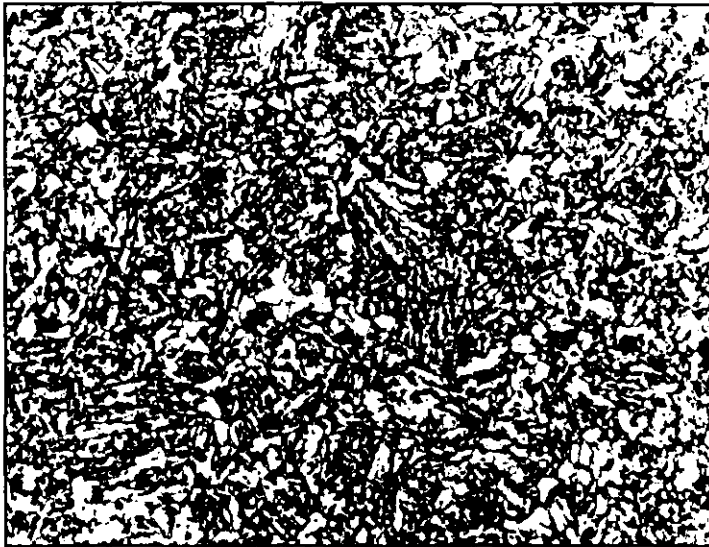
2.6. Microscopía de barrido electrónico.

La caracterización topográfica de las superficies de fractura de las probetas Charpy, se realizó con microscopía de barrido electrónico. La caracterización consistió en determinar regiones de iniciación y propagación de la grieta y asociarlos con los diferentes mecanismos de fractura, asociado con las curvas carga vs tiempo obtenidas de la prueba Charpy instrumentada.

Capítulo III. Resultados.

3.1. Microestructura del acero en condición de recibido.

El análisis metalográfico muestra una microestructura que consiste de una matriz de granos poligonales de ferrita conteniendo a la perlita como se observa en la Fig. 3.1.



**Fig. 3.1. Metalografía del acero UNS G41400.
x150, ataque químico con Nital 2.**

3.2. Microestructura del acero en condición de revenido.

Empleando el diagrama tiempo – temperatura – transformación de el acero UNS G41400, se realizó el análisis de las microestructuras desarrolladas con los diferentes tratamientos de temple y revenido, el cual se presenta en la Fig. 3.2. Sobre el diagrama se indican el tiempo y temperatura para cada tratamiento, observándose las diferentes zonas de transformación que experimenta el acero durante estos tratamientos. Inicialmente el material parte de la zona de martensita, pasando por la zona de bainita inferior, hasta llegar a la zona de perlita + ferrita[17].

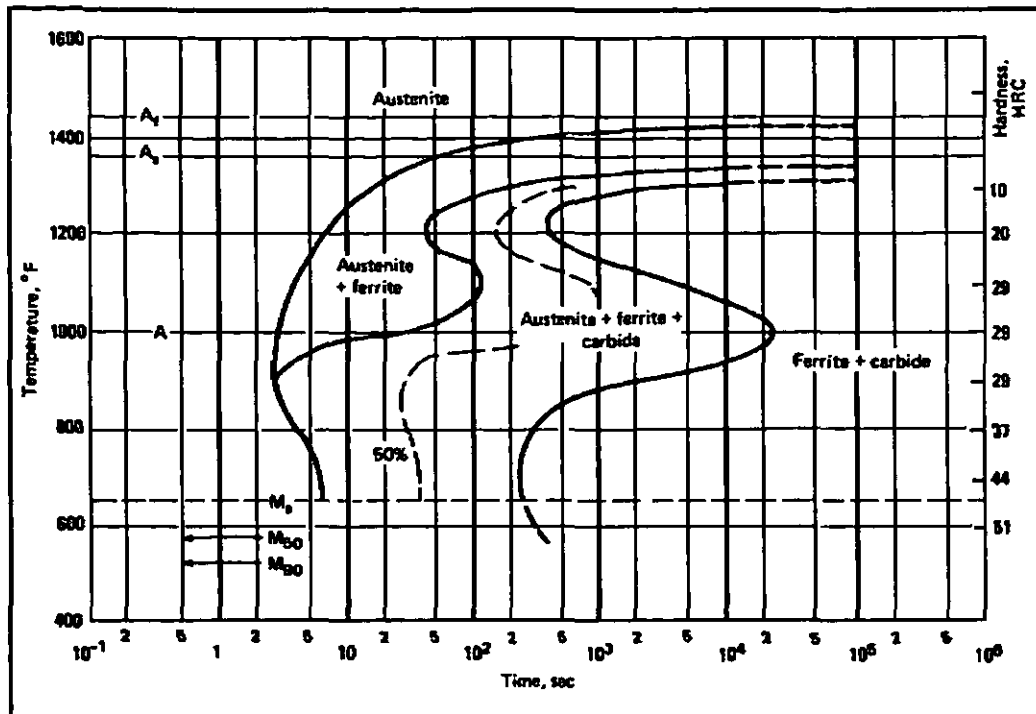
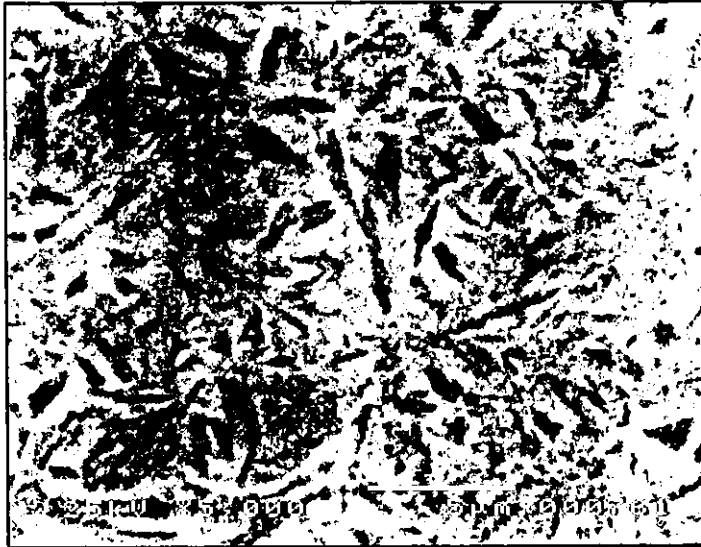


Fig. 3.2. Diagrama TTT del acero UNS G41400.

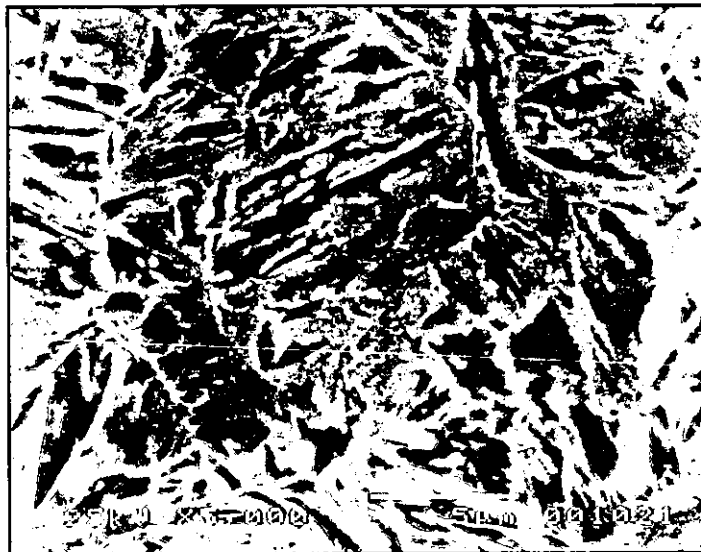
3.2.1. Revenido a 100°C.

Haciendo referencia al diagrama TTT de éste acero, en esta etapa el material se encuentra en la zona de transformación de martensita revenida, donde los cambios microestructurales no son muy significativos, manteniéndose las propiedades constantes, la Fig. 3.3. muestra las microestructuras a ésta temperatura de revenido.

En ésta etapa, la microestructura consta de agujas de martensita de forma acicular; por efecto del tiempo de tratamiento, en estas condiciones principalmente hay una reducción de esfuerzos elásticos internos, además se inicia la precipitación de carbono (carburo épsilon). La estructura cristalina de la martensita cambia de martensita tetragonal a martensita cubica, que es más estable.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.3. Evolución de la microestructura en las diferentes condiciones de revenido a 100°C, (a) 1 h, (b) 1.5 h y (c) 2 h. NiFe al 2%

El tamaño de las agujas en general, a x5000 es menor a 5 μm y están dispersas en todo el material, manteniendo una forma alargada y acicular, la precipitación de carbono no es apreciable por la resolución del microscopio, pero se encuentra presente debido a la expulsión del carbono de las agujas de martensita; el tiempo de revenido prácticamente no tiene efecto sobre la microestructura.

La martensita revenida se caracteriza por tener una alta dureza, dando un comportamiento frágil a las probetas[5, 6].

3.2.2. Revenido a 400°C.

La Fig. 3.4. muestra las diferentes microestructuras obtenidas a esta temperatura de revenido. Se observa una estructura acicular conteniendo precipitados de carburo ϵ . Las agujas están formadas por placas de ferrita, similar a la martensita revenida pero son burdas, aparentemente la precipitación de carburo se presenta en el interior y en los bordes de las agujas de ferrita[5, 6].



(a)



(b)



(c)

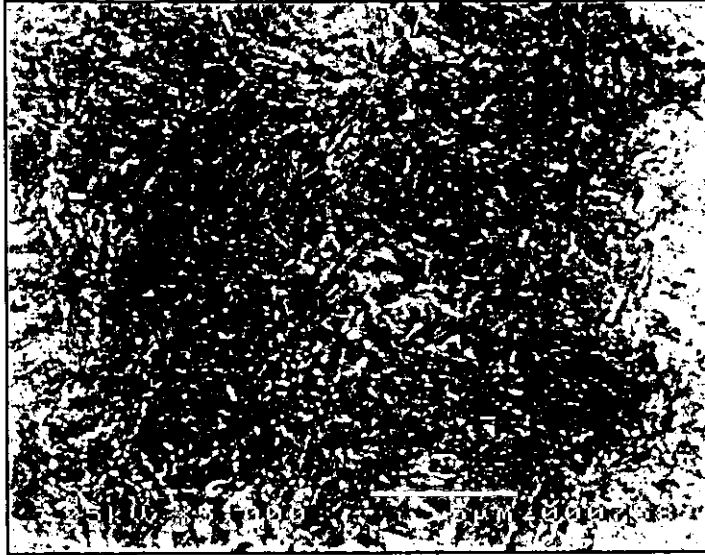
Fig. 3.4. Evolución de la microestructura en las diferentes condiciones de revenido a 400°C, (a) 1 h, (b) 1.5 h y (c) 2 h. Nital al 2%

El efecto del tiempo de revenido en ésta condición no presenta un cambio apreciable en la microestructura de las probetas. Esta microestructura se caracteriza por tener una menor dureza y una mayor tenacidad, que en la condición de revenido anterior.

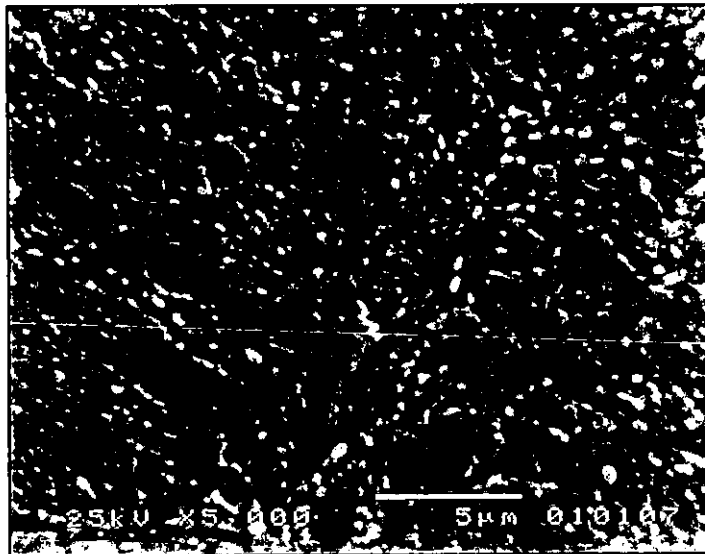
3.2.3. Revenido a 650°C.

La Fig. 3.5. muestra las microestructuras obtenidas en ésta temperatura de revenido, se aprecia la pérdida de la forma acicular de las agujas de ferrita además de una mayor cantidad de precipitado de carburo de hierro (cementita) en el interior y en los bordes de las agujas de ferrita. La cantidad de cementita precipitada incrementa con el tiempo de revenido. Debido al incremento en la cantidad de cementita precipitada, se observa un ligero cambio en la microestructura.

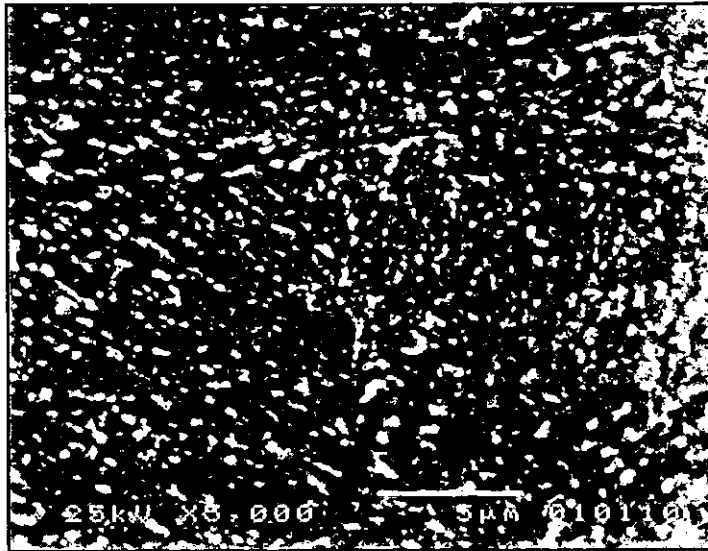
La dureza es menor con respecto a las condiciones anteriores y por lo tanto la tenacidad aumenta[5, 6].



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.5. Evolución de la microestructura en las diferentes condiciones de revenido a 650°C, (a) 1 h, (b) 1.5 h y (c) 2 h. Nitral al 2%

3.3. Efecto del revenido en la dureza del acero UNS G41400.

Las Figs. 3.6. y 3.7. muestran el efecto del tiempo y temperatura de revenido sobre la dureza, en la Fig. 3.6. se observa que para una temperatura de revenido constante, la dureza del material no cambia con respecto al tiempo.

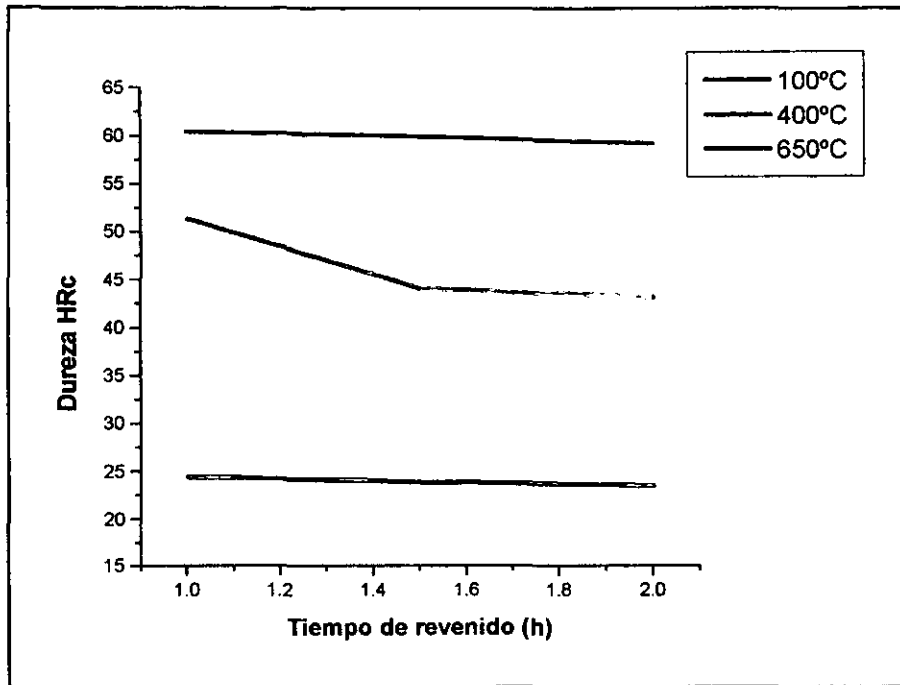


Fig. 3.6. Efecto del tiempo de revenido a las diferentes temperaturas de revenido.

Con base a ésta observación en la Fig. 3.7. se observa que al incrementar la temperatura de revenido disminuye la dureza.

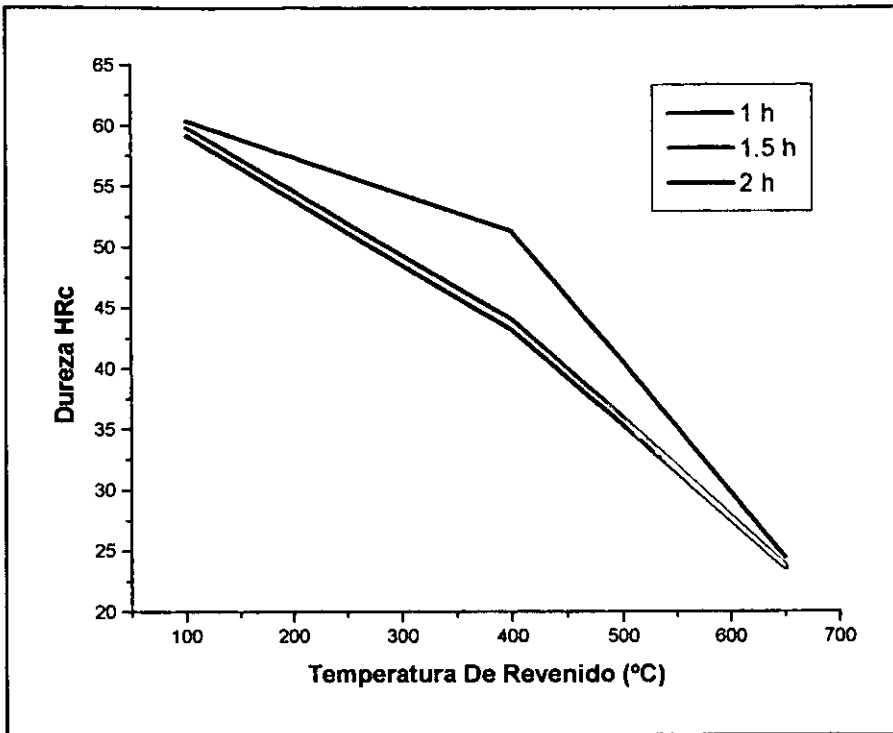


Fig. 3.7. Efecto de la temperatura de revenido a los diferentes tiempos de revenido.

3.4. Pruebas de impacto en el péndulo instrumentado.

3.4.1. Revenido a 100°C.

La Fig. 3.8. muestra las curvas carga vs tiempo obtenidas bajo éstas condiciones de revenido. En las curvas se observa que en las probetas de 1 h y 1.5 h de tratamiento el valor de la carga máxima es de 10.5 kN alcanzándose este valor de carga máxima aproximadamente a 80 μ s; en el caso de la probeta de 2 h de tratamiento la carga máxima es de 13 kN alcanzándose a 100 μ s.

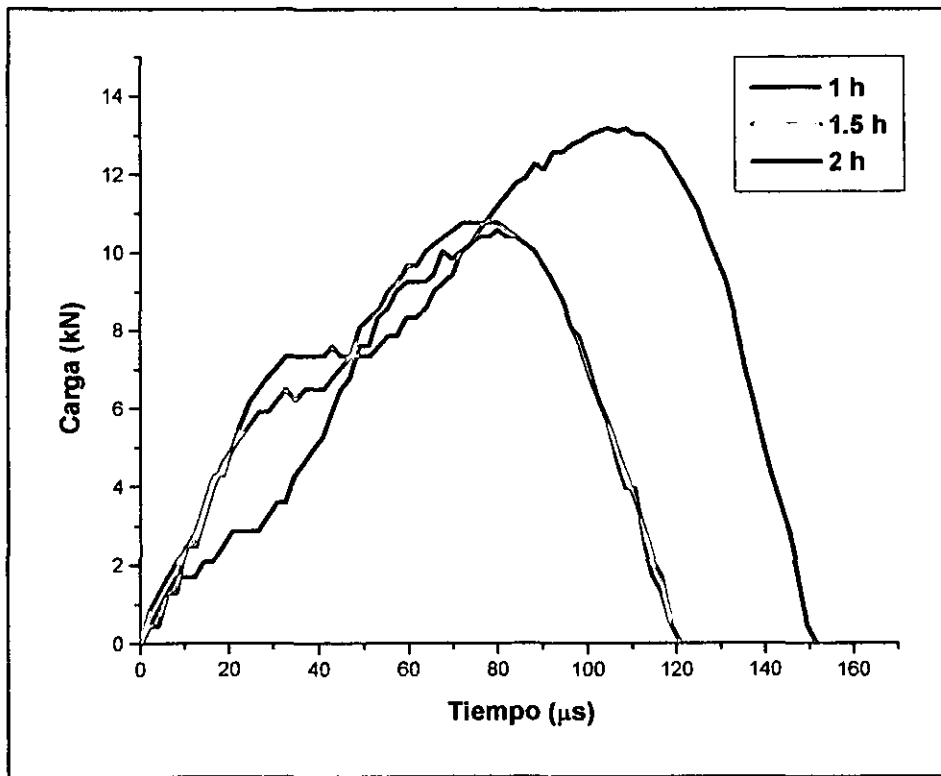


Fig. 3.8. Curvas carga vs tiempo, revenido a 100°C.

Con respecto a la Fig. 3.8. se observa que el área bajo la curva se incrementa con forme se aumenta el tiempo de revenido, bajo estas condiciones de revenido los tiempo registrados en el proceso de fractura de las probetas es muy corto asociando este comportamiento a una propagación inestable de la grieta.

3.4.2. Revenido a 400°C.

La Fig. 3.9. muestra las curvas carga vs tiempo obtenidas bajo éstas condiciones de revenido. Se observa que a medida que se incrementa el tiempo de revenido, se incrementa el valor de la carga máxima y el tiempo para alcanzar dicho valor, pero a dos horas de tratamiento se aprecia una disminución en el valor de la carga máxima debido a un efecto microestructural llamado fragilidad por revenido. Los valores de carga máxima fueron de 13, 20 y 15 kN; a los tiempos de 150, 250 y 220 μ s.

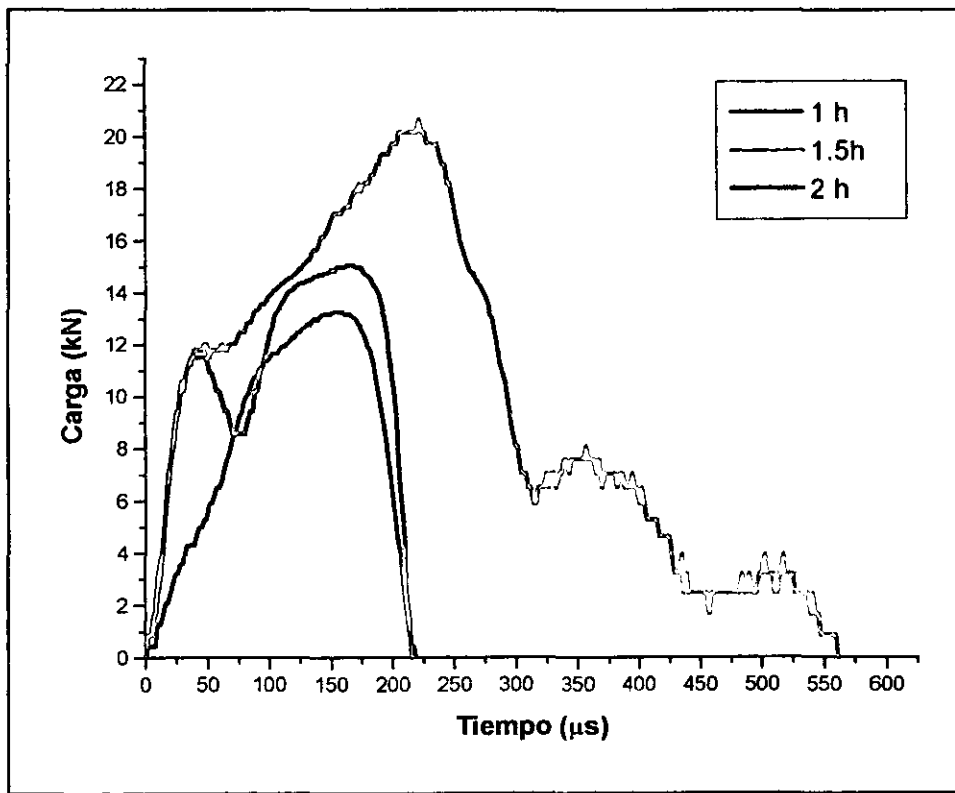


Fig. 3.9. Curvas carga vs tiempo, revenido a 400°C.

Con respecto a la Fig. 3.9. se observa que el área bajo la curva se incrementa conforme se aumenta el tiempo de revenido, en estas condiciones de revenido los tiempos que se registraron durante el proceso de fractura son mayores que en la condición anterior, asociando esto a la aparición de un incipiente comportamiento dúctil en las probetas.

3.4.3. Revenido a 650°C.

La Fig. 3.10. muestra la curva carga vs tiempo para esta temperatura de revenido a una hora, debido a las condiciones del material el valor de la carga máxima se incrementa mucho en relación a las pruebas anteriores, se observa que la carga P_{GY} alcanza un valor de 14.7 kN y la carga máxima es cercana a los 15 kN; el tiempo registrado fue de 14 ms alcanzando la ruptura total de la probeta.

Para las condiciones de hora y media y dos horas de tratamiento térmico, no fue registrada la curva carga vs tiempo; debido a que el valor de energía absorbida excede la escala del péndulo.

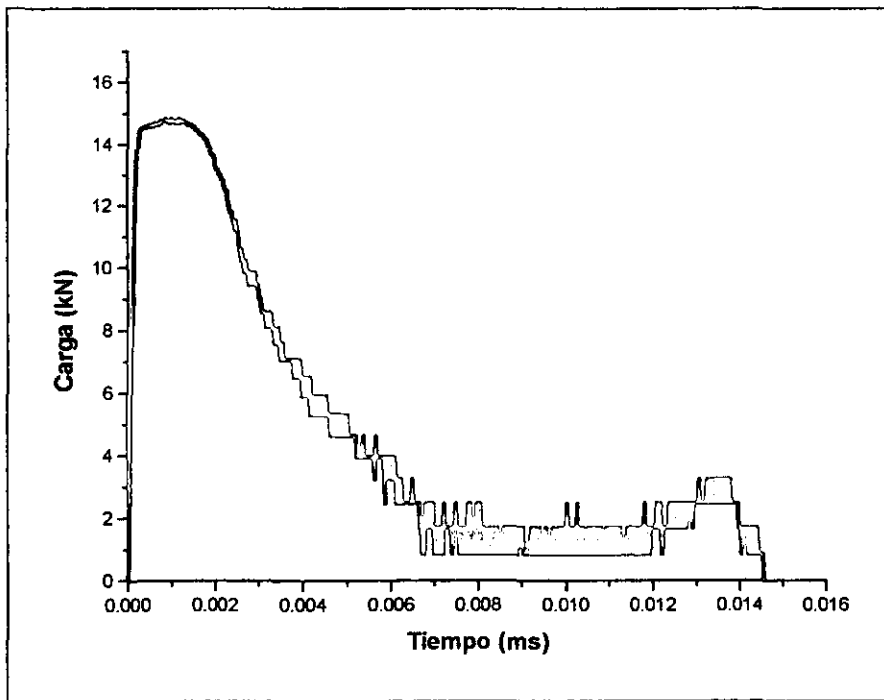


Fig. 3.10. Gráfica carga vs tiempo, revenido a 650°C por 1 h.

3.5. Efecto del tratamiento térmico de revenido en la fractura del acero UNS G41400.

3.5.1. Relación entre la curva carga vs tiempo y la superficie de fractura.

En las Fig. 3.11. a 3.13. se muestra la relación que existe entre la curva carga vs tiempo y la superficie de fractura de las probetas. Las curvas carga vs tiempo se han dividido en dos regiones.

- a) Energía para la iniciación de la grieta.
- b) Energía para la propagación de la grieta.

Con respecto a la curva carga vs tiempo se aprecia que :

- El área bajo la curva se incrementa con la temperatura de revenido y por lo tanto se incrementa la tenacidad.
- Las energías de iniciación y propagación de la grieta también incrementan con la temperatura de revenido.
- La región de la iniciación de la grieta ocupa una mayor extensión que la energía de propagación de la grieta.

Considerando las curvas carga vs tiempo obtenidas por el péndulo instrumentado y las correspondientes superficies de fractura, se observa que:

Revenido a 100°C:

- El aspecto macroscópico de la fractura, revela una superficie de fractura plana, sin apreciable deformación plástica, la cual se asocia a una fractura frágil.
- La superficie de fractura presenta una pequeña zona plana cerca del entalle asociada a la iniciación de la grieta, esta zona de iniciación de grieta

presenta variaciones en cuanto a espesor y extensión a lo largo del entalle. A medida que incrementa el tiempo y temperatura de revenido esa zona incrementa su extensión y espesor.

- La superficie de fractura restante corresponde a la zona de propagación de la grieta, y se caracteriza por la presencia de marcas radiales muy finas, las cuales emanan de la zona de iniciación. Estas marcas radiales se asocian a una propagación inestable de la grieta.
- El contorno de la probeta muestra una incipiente zona labio de corte, la cual se asocia a la separación final de la probeta. Debido al comportamiento frágil del material en la curva carga vs tiempo no se registran zonas de deformación plástica sino solo una subida rápida de la curva hasta la carga máxima y una caída abrupta de la carga todo esto asociado a la propagación inestable de la grieta.

Revenido a 400°C :

- El aspecto macroscópico revela una superficie de fractura plana en el centro, con agrietamiento secundario, la región plana ésta rodeada por una zona labio de corte; apreciándose deformación plástica, la cual se asocia a un modo de fractura mixto. Además de que se presenta una expansión en la cara contraria al entalle.
- La superficie de fractura presenta una zona fibrosa apreciable cerca del entalle de mayor espesor con respecto a la condición anterior asociado a la iniciación de la grieta.
- Después de la zona de iniciación, se observa una zona de marcas radiales muy burdas y ocupa una extensión menor comparada con la condición anterior, esta región corresponde a la zona de propagación de la grieta, y se caracteriza por una propagación inestable.

- El contorno de la probeta también muestra una zona labio de corte, esa región presenta una mayor extensión comparada con las probetas revenidas a 100°C, el labio de corte también se asocia con un desgarre dúctil.
- La curva carga vs tiempo muestra zonas de comportamiento plástico como la carga de cedencia, además de que al llegar a la carga máxima la propagación de la grieta es más estable presentándose la ruptura del material hasta la carga de fractura; así como una propagación de la grieta más lenta que en la condición anterior.

Revenido a 650°C :

- El aspecto macroscópico revela una superficie de fractura plana en el centro, grietas secundarias más grandes que las observadas en los casos anteriores y rodeada por una zona labio de corte; apreciándose deformación plástica, la cual se asocia a un modo de fractura mixto. La expansión es más severa.
- La superficie de fractura presenta una zona fibrosa más apreciable cerca del entalle de mayor espesor que se asocia a la iniciación de la grieta. Después de la zona de iniciación se observa una zona de marcas radiales muy burdas ocupando una extensión menor comparada con la condición anterior, esta región corresponde a la zona de propagación de la grieta, y se caracteriza por una propagación inestable.
- El contorno de la probeta también muestra una zona labio de corte, esta región presenta una mayor extensión comparada con las probetas revenidas a 400°C, el labio de corte también se asocia con un crecimiento estable de la grieta.
- En la curva carga vs tiempo se observa un comportamiento de ruptura dúctil, donde se observa que al llegar al punto de la carga máxima la grieta

propaga de manera estable manteniéndose un instante en ese punto y después continua propagando de manera estable hasta la carga de ruptura, en donde la propagación continua siendo estable debido a la presencia de la zona labio de corte.

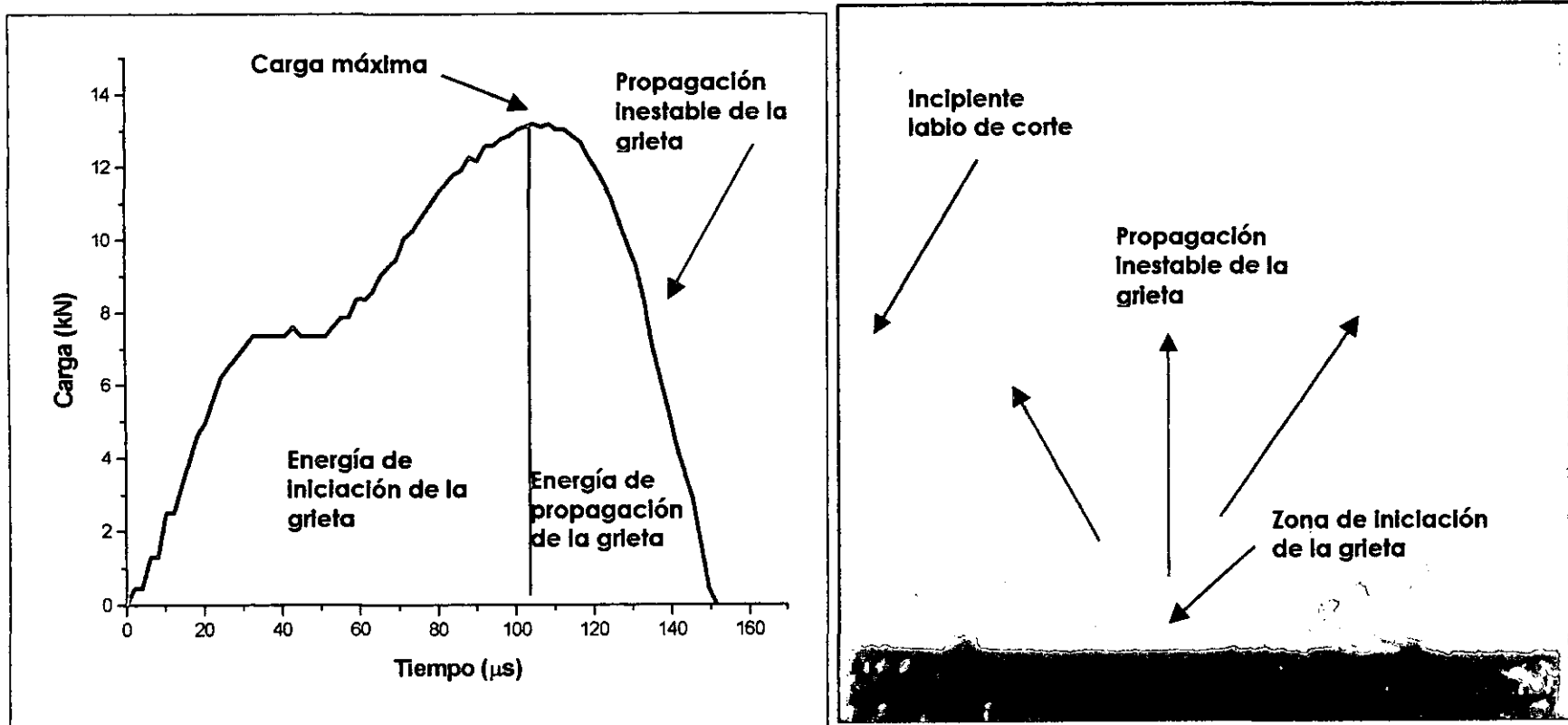


Fig. 3.11. Relación de la curva carga vs tiempo con los rasgos de la superficie de fractura de la probeta revenida a 100°C por dos horas.

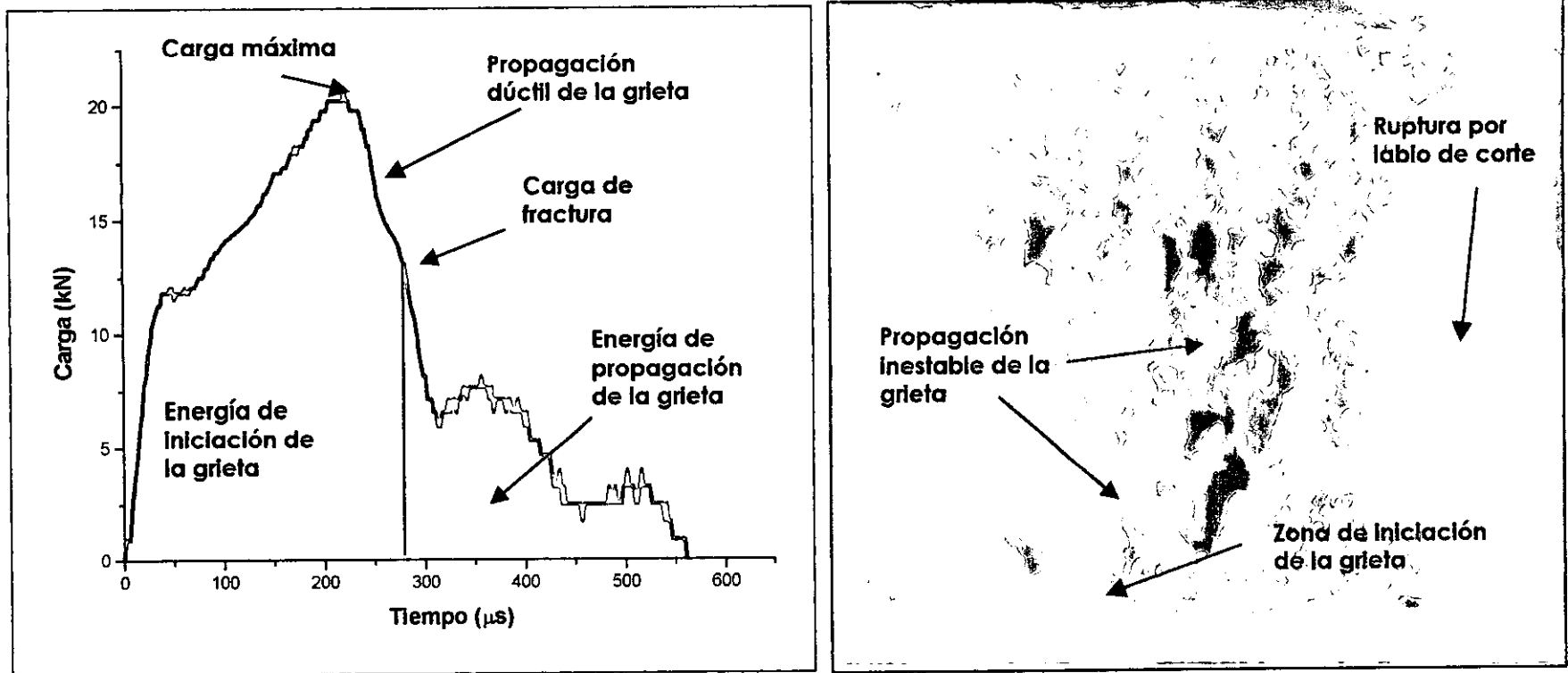


Fig. 3.12. Relación de la curva carga vs tiempo con los rasgos de la superficie de fractura de la probeta revenida a 400°C por hora y media.

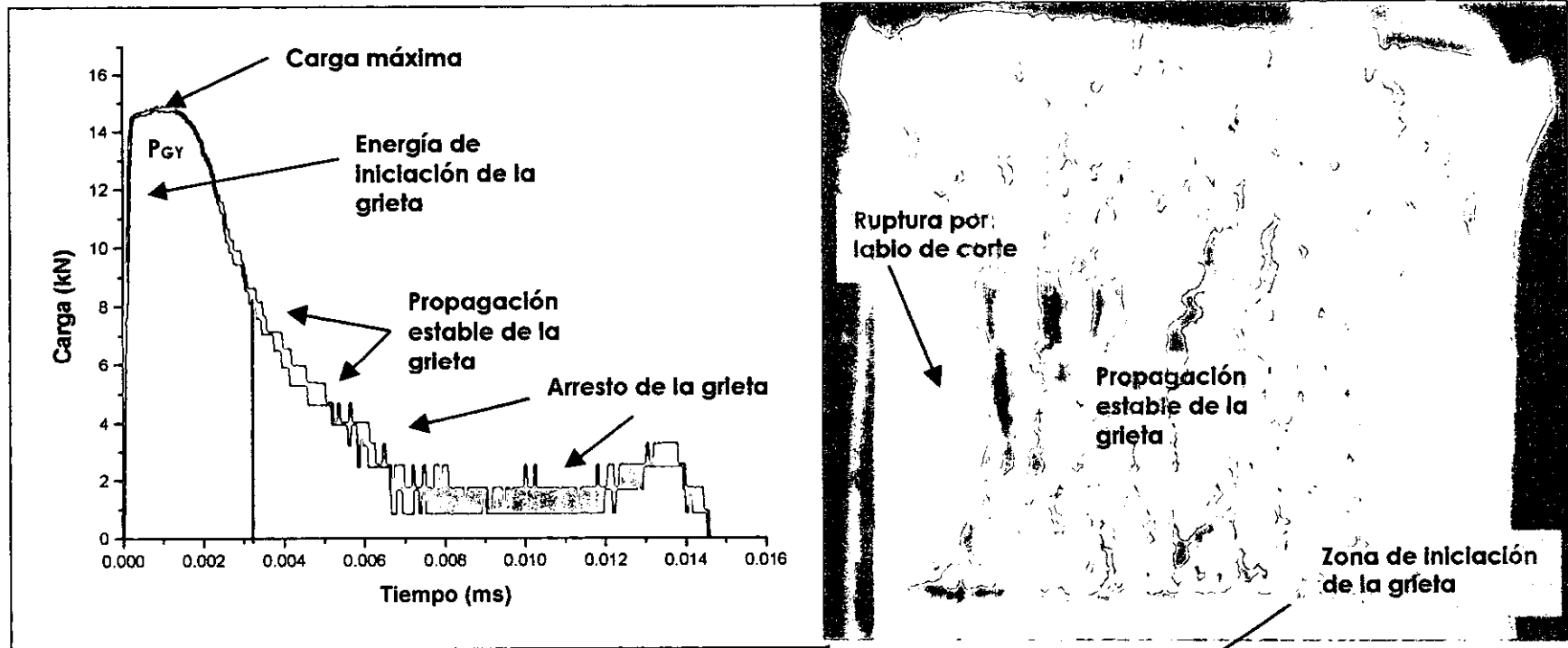


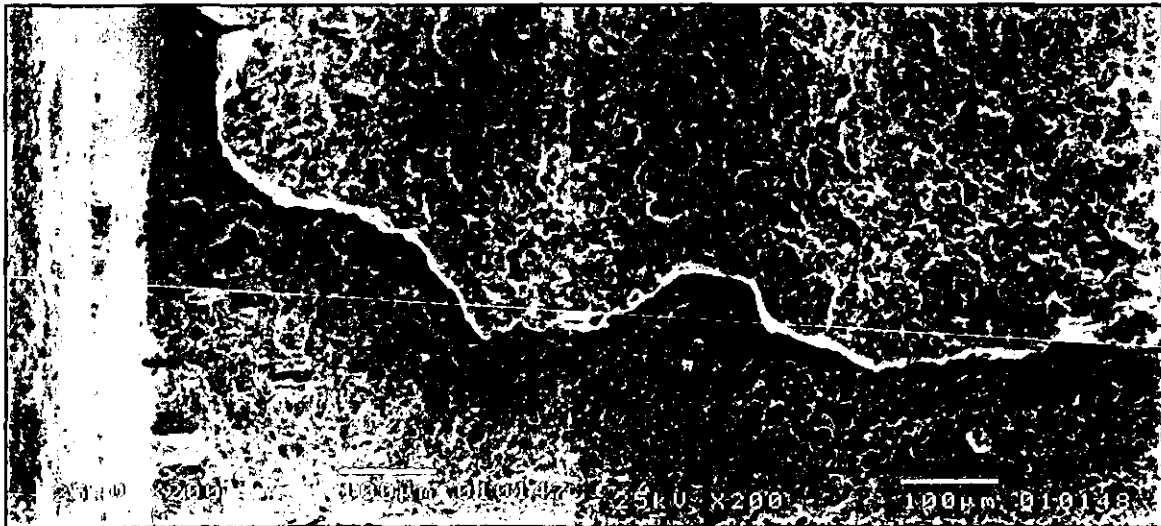
Fig. 3.13. Relación de la curva carga vs tiempo con los rasgos de la superficie de fractura de la probeta revenida a 650°C por una hora.

3.5.2. Fractografías de las diferentes condiciones de revenido.

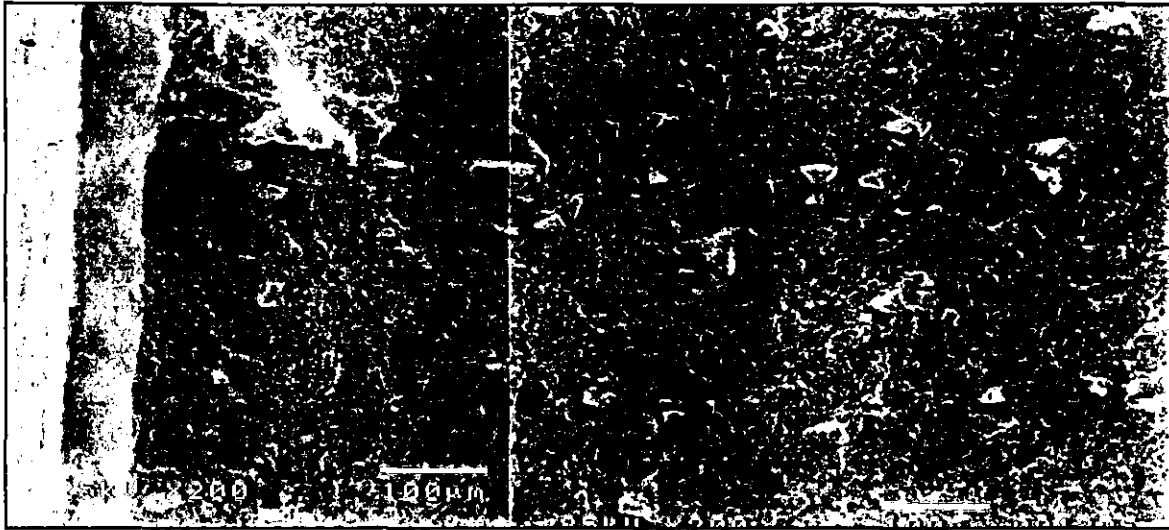
3.5.2.1. Revenido a 100°C.

En las Fig. 3.14. a 3.16. se observa que en las superficies de fractura a esta condición de revenido, hay un ligero incremento en la extensión y tamaño de la zona de iniciación de grieta, así como un incremento en la cantidad de microgrietas y en las zonas de desgarramiento dúctil alrededor de estas también llamadas lenguas que solo ocasionan un frenado de la grieta, sin presentar esto diferencias apreciables entre la probetas.

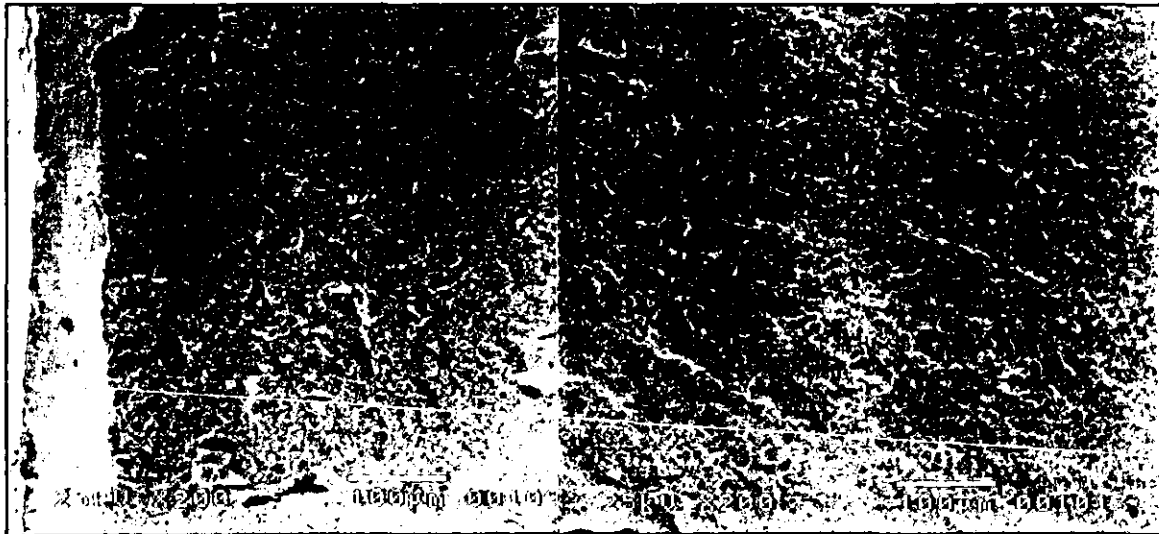
La superficie de fractura es plana irregular en todos los casos, presentando ciertos desniveles como escalones, asociado esto a una propagación inestable de la grieta. En la Fig. 3.14. se presenta una vista de la superficie de fractura en donde se observan dos zonas dentro de la superficie de fractura, la zona de iniciación de la grieta y la zona de propagación de la grieta.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.14. Vista general de la superficie de fractura de las probetas revenidas a 100°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

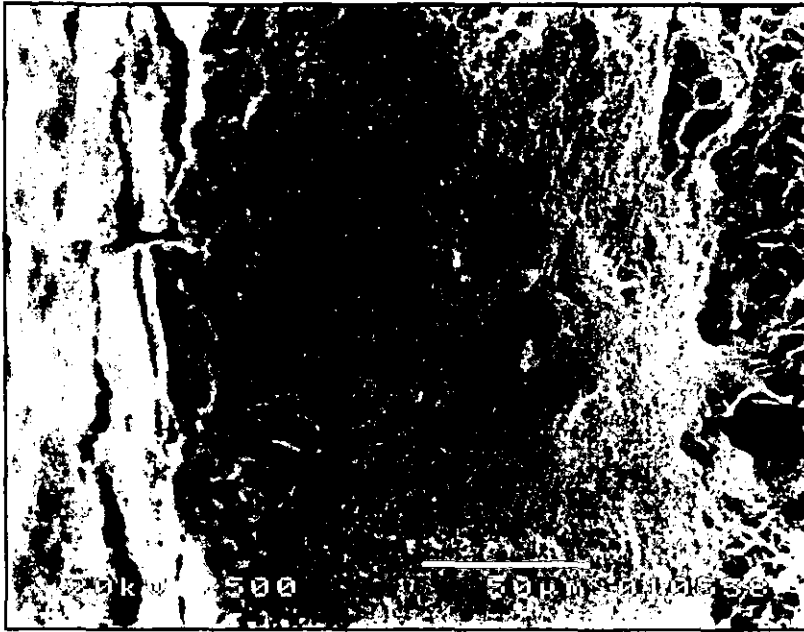
La Fig. 3.15. muestra la zona de iniciación de la grieta para los diferentes tiempos de revenido, observándose el incremento del tamaño de la grieta.



(a)



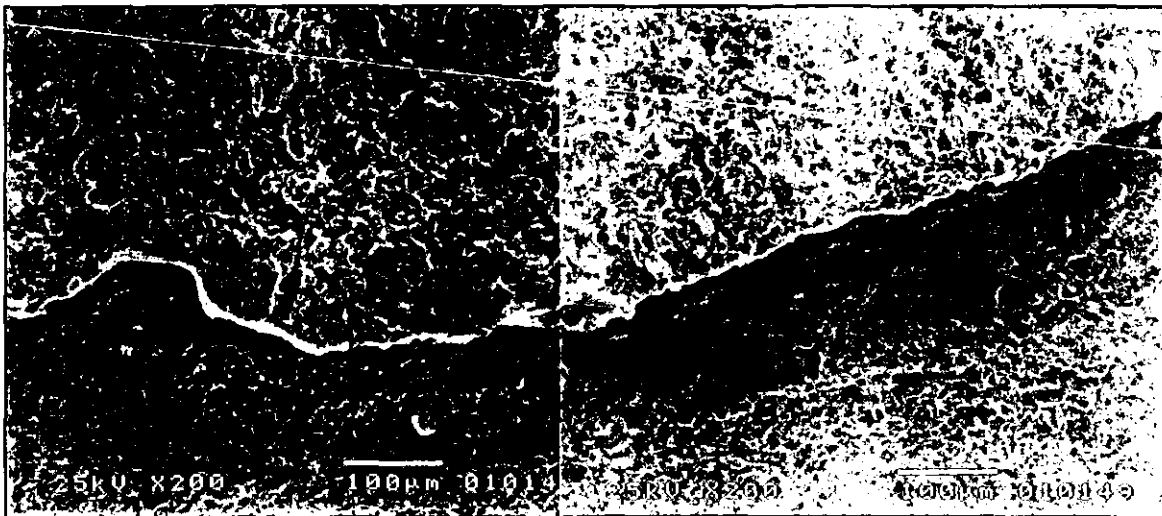
(b)



(c)

Fig. 3.15. Vista de la zona de iniciación de grieta de las probetas revenidas a 100°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

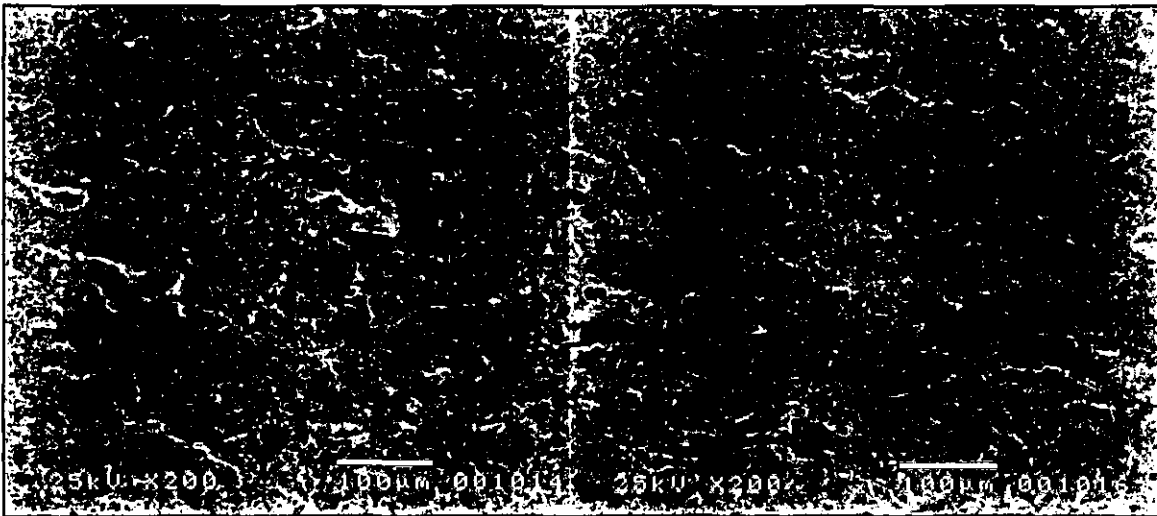
La Fig. 3.16. muestra la zona de propagación de la grieta, donde la trayectoria de propagación de la grieta es intergranular, propia de la fractura por clivaje, además se observan las microgrietas, las lenguas y la interconexión entre grietas.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.16. Vista de la zona de propagación de la grieta de las probetas revenidas a 100°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

3.5.2.2. Revenido a 400°C.

En las Fig. 3.17. a 3.19. se muestran observaciones de la superficie de fractura a esta condición de revenido, los rasgos de fractura presentan zonas planas irregulares y zonas de desgarramiento dúctil, la apariencia de la superficie de fractura no es plana en su totalidad, ya que se presentan zonas de

desgarramiento dúctil asociado a la presencia de poros que aumentan en cantidad y dimensiones conforme se incrementa el tiempo de revenido.

La zona de iniciación de la grieta incrementa su tamaño presentando en su interior algunos poros que retardan la propagación de la grieta, en la zona de propagación de la grieta las microgrietas presentan una mayor interconexión entre sí y con los poros dejando rasgos de fractura menos finos que en la condición anterior, presentándose en algunas zonas fractura por clivaje y en otras ruptura por coalescencia de poros.

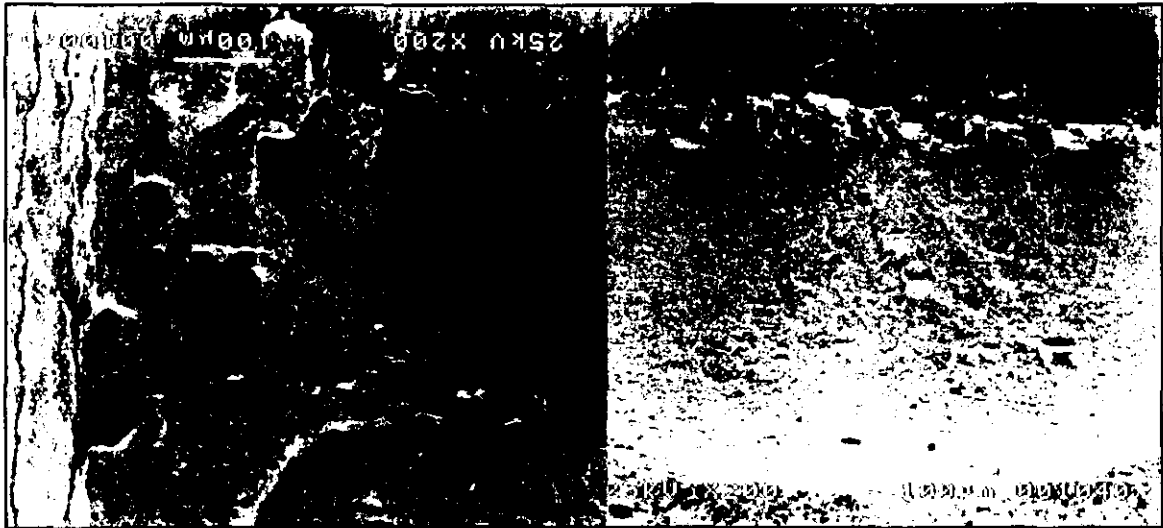
La Fig. 3.17. muestra una vista general de la superficie de fractura, observándose el incremento de la zona de iniciación de la grieta y los diferentes rasgos de fractura que presenta la zona de propagación de la grieta.



(a)



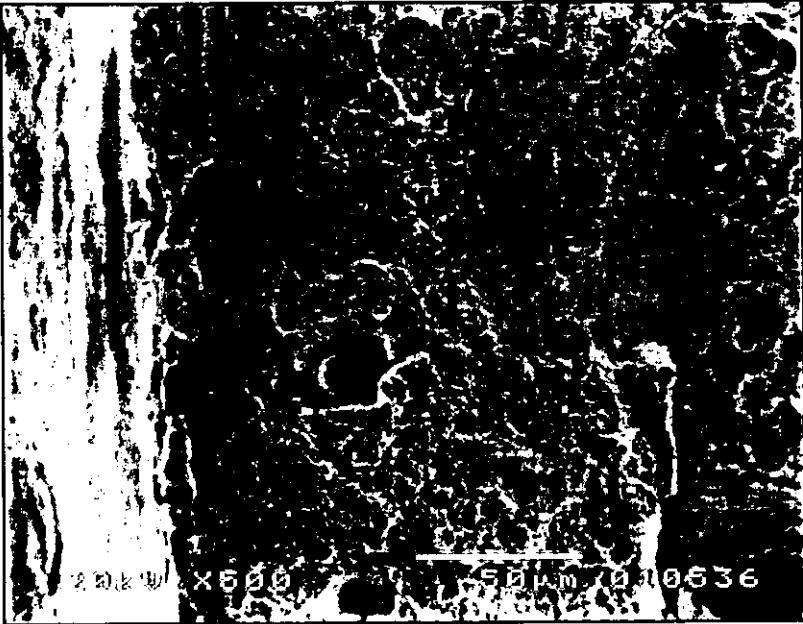
(b)



(c)

Fig. 3.17. Vista general de la superficie de fractura de las probetas revenidas a 400°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

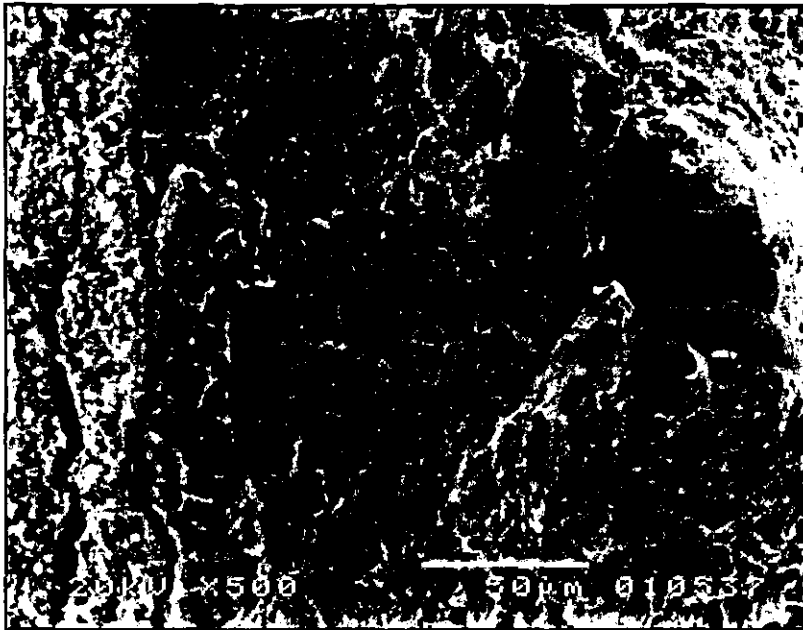
La Fig. 3.18. muestra la zona de iniciación de la grieta para los diferentes tiempos de revenido, observándose el incremento del tamaño de la grieta y el incremento en la cantidad de poros dentro de esta zona.



(a)



(b)

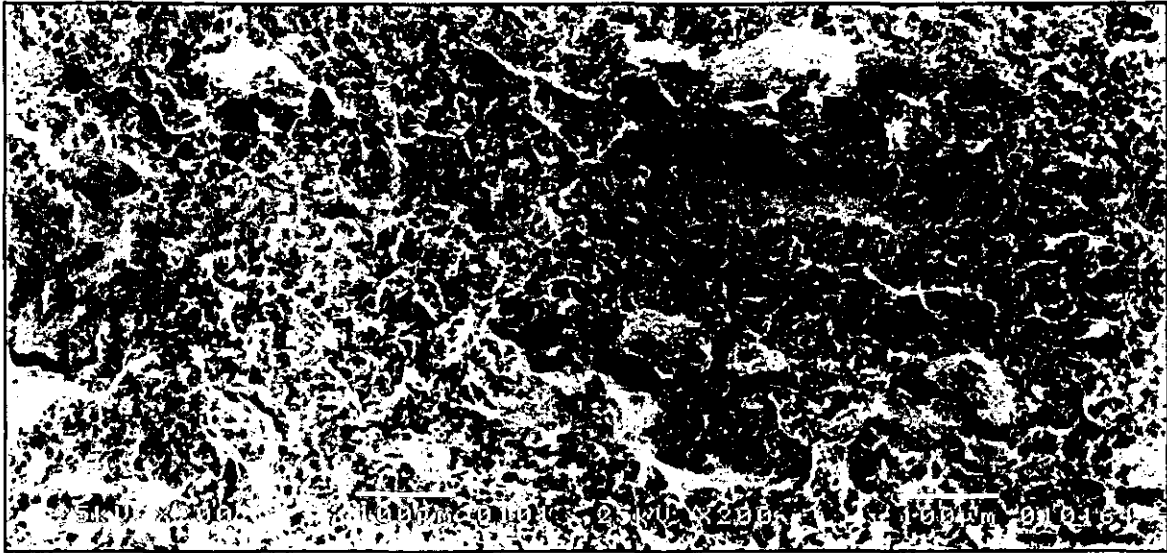


(c)

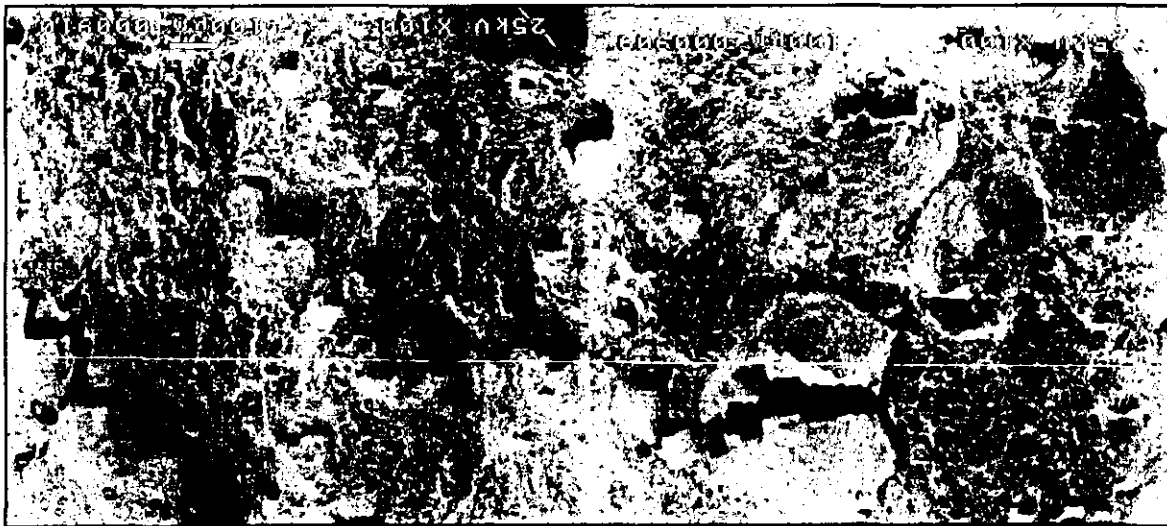
Fig. 3.18. Vista de la zona de iniciación de grieta de las probetas revenidas a 400°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

La Fig. 3.19. muestra la zona de propagación de la grieta, donde la trayectoria de propagación de la grieta es transgranular e intergranular, asociado a un modo mixto de fractura, la interconexión entre grietas es mayor asistida por la presencia de porosidades en la superficie de fractura, presentando largas trayectorias de propagación.

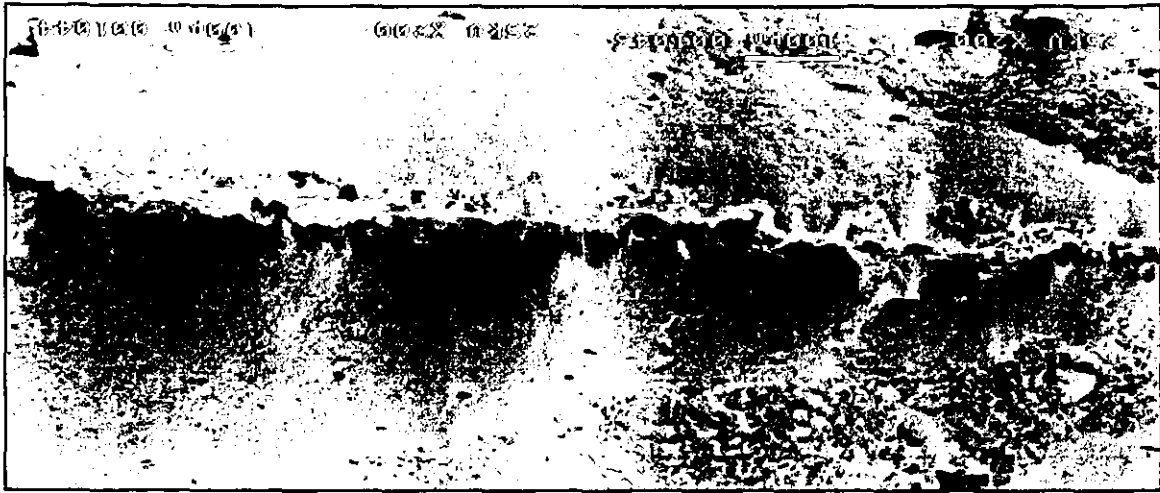
El tamaño de las zonas de desgarramiento dúctil que rodean a las grietas incrementa su extensión conectándose con otras zonas incrementando el frenado de la grieta, como se observa en las curvas carga vs tiempo.



(a)



(b)



(c)

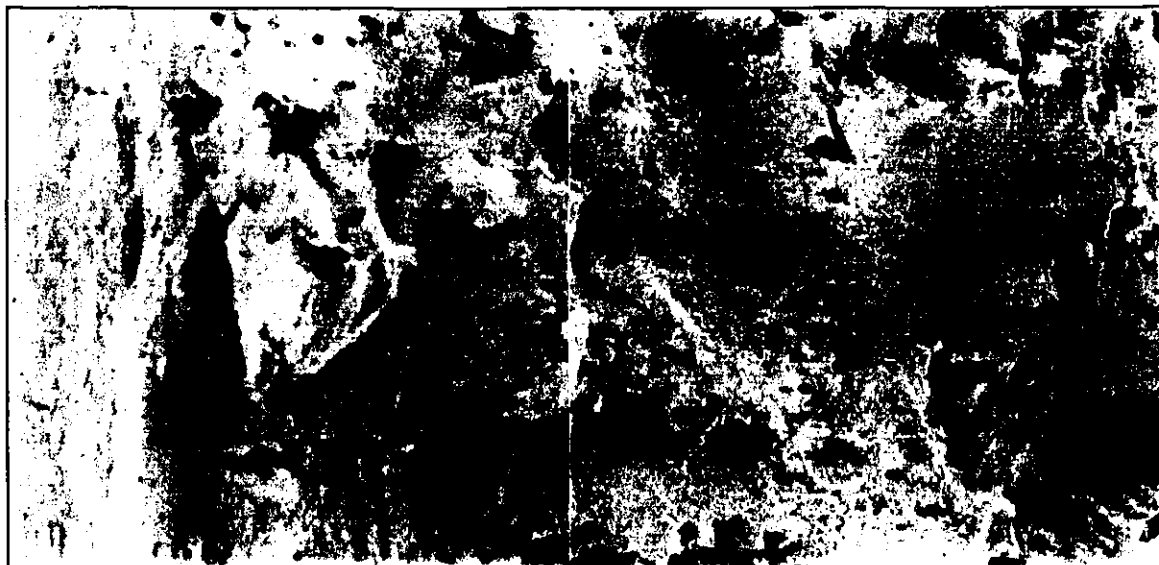
Fig. 3.19. Vista de la zona de propagación de la grieta de las probetas revenidas a 400°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

3.5.2.3. Revenido a 650°C.

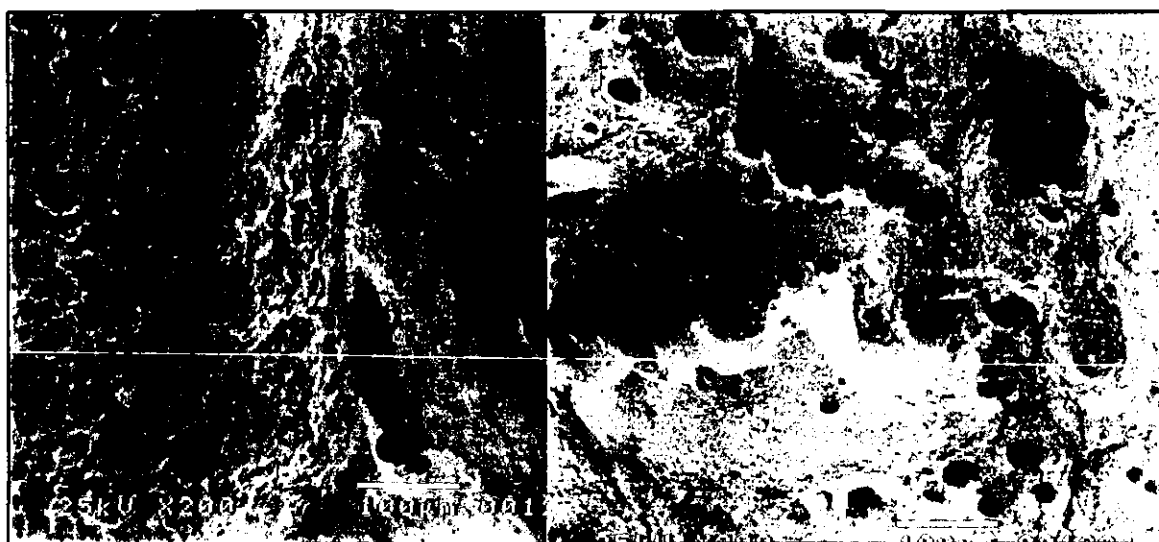
Las Fig. 3.20. a 3.22. muestran diferentes observaciones de la superficie de fractura a esta condición de revenido, la superficie presenta muchas irregularidades, las zonas planas desaparecen quedando solo zonas de desgarramiento, asociado a que solo prevalece la ruptura por coalescencia de poros como mecanismo de fractura.

La coalescencia entre poros esta presente desde la zona de iniciación de grieta que para esta etapa ha incrementado su tamaño, dejando zonas bastante irregulares y grietas de gran profundidad. En la zona de propagación de la grieta prevalece la coalescencia entre poros, dejando rasgos de mucha deformación plástica, zonas de desgarramiento y grietas de mucha profundidad.

La Fig. 3.20. muestra una vista general de la superficie de fractura, donde se puede observar el incremento en la coalescencia de los poros dentro de la zona de iniciación y propagación de la grieta.



(a)



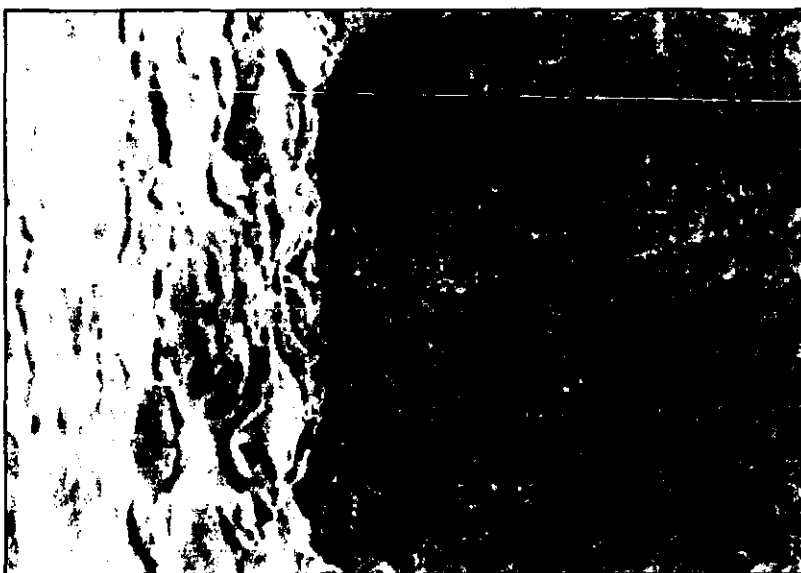
(b)



(c)

Fig. 3.20. Vista general de la superficie de fractura de las probetas revenidas a 650°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

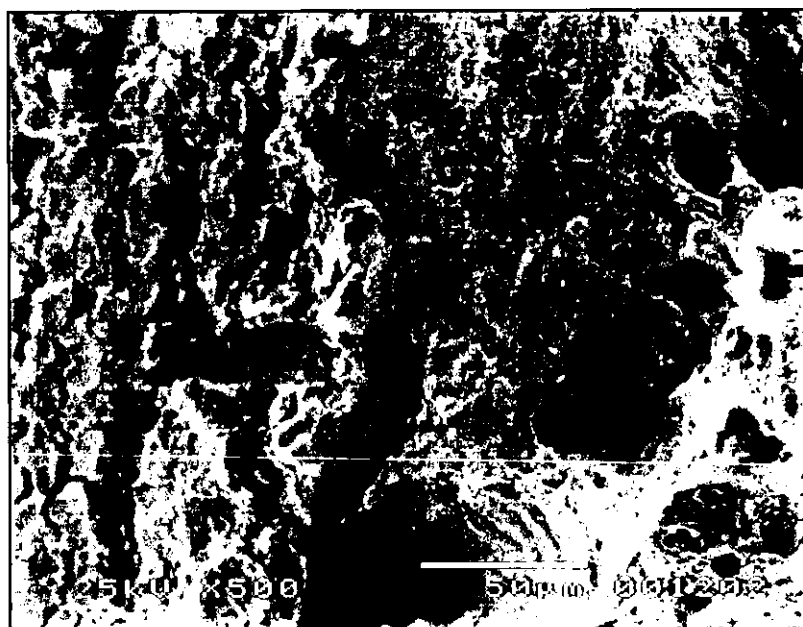
La Fig. 3.21. muestra los diferentes rasgos de la zona de iniciación de grieta a esta condición de revenido, se puede apreciar que conforme se eleva el tiempo de revenido la cantidad y profundidad de los poros también aumenta, pasando de una zona de rasgos regularmente planos a zonas de total irregularidad en su superficie.



(a)



(b)

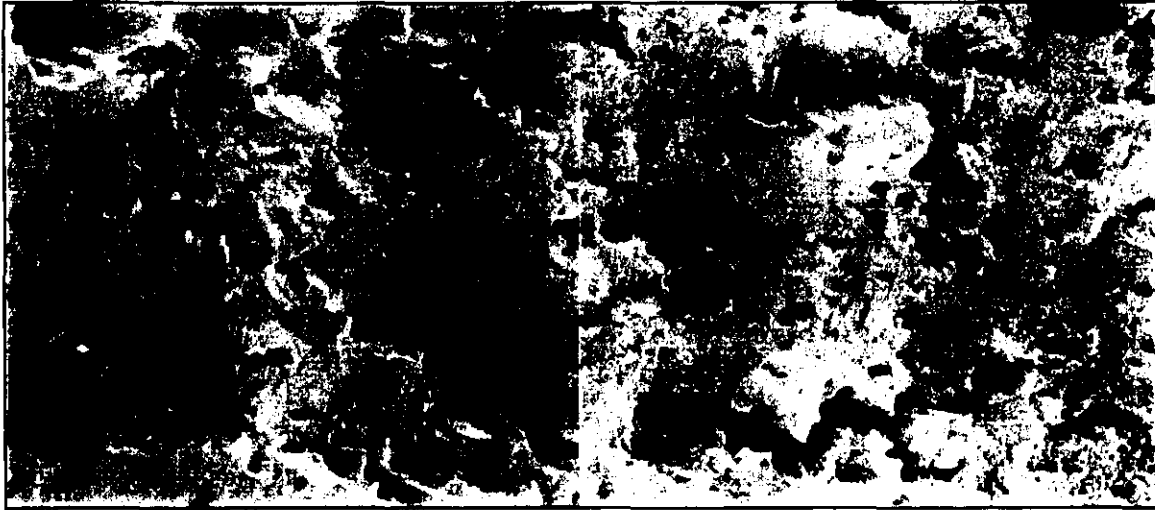


(c)

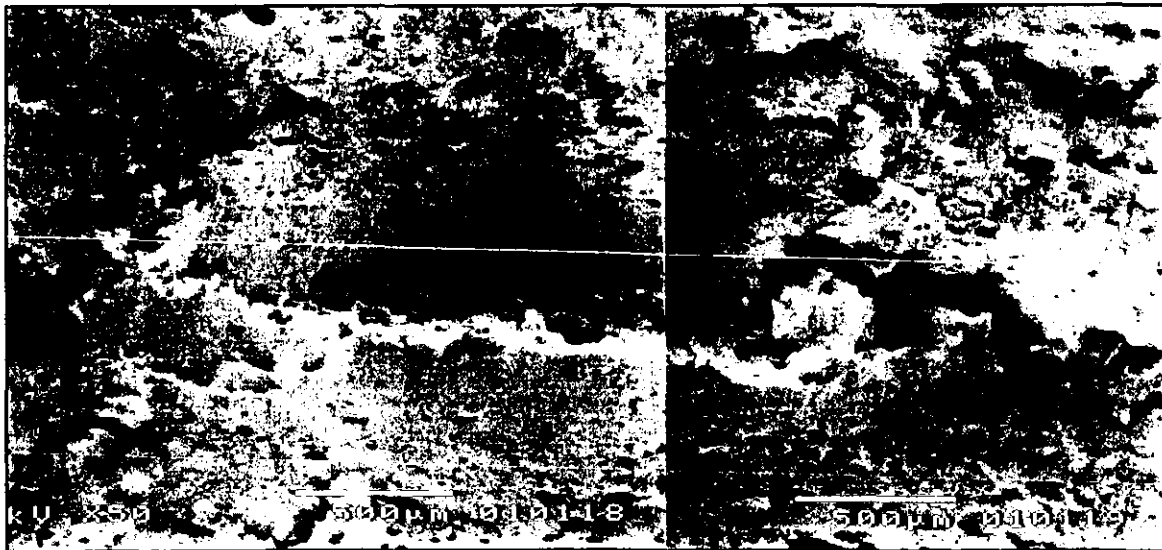
Fig. 3.21. Vista de la zona de iniciación de grieta de las probetas revenidas a 650°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

La Fig. 3.22. muestra las superficies de la zona de propagación de la grieta, la coalescencia entre poros incrementa conforme se incrementa el tiempo de

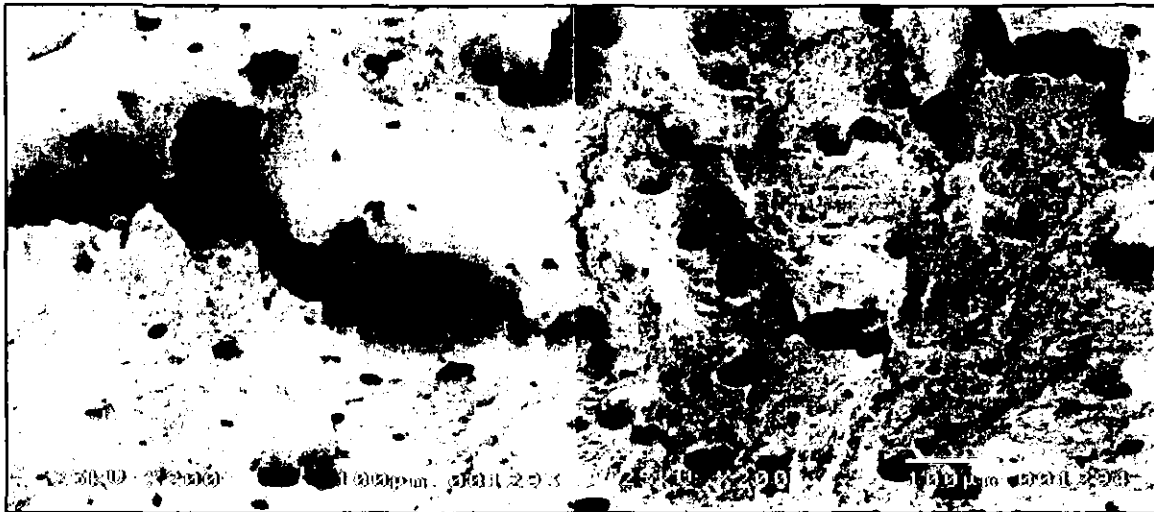
revenido, las zonas conocidas como lenguas se eliminan por completo, dejando grandes zonas de desgarramiento dúctil, grietas de gran extensión y profundidad debido a la coalescencia de los poros.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.23. Vista de la zona de propagación de la grieta de las probetas revenidas a 650°C por (a) 1 h, (b) 1.5 h, (c) 2 h.

3.5.3. Zona de iniciación de la grieta.

En las Fig. 3.24. y 3.25. se muestran el efecto del tiempo y la temperatura de revenido sobre el tamaño de la grieta, en la Fig. 3.24. se observa a medida que se incrementa la temperatura de revenido el tamaño de la grieta también va incrementando, el efecto del tiempo de revenido presenta el mismo efecto que el de la temperatura de revenido, como se muestra en al Fig. 3.25.; ya que se va dando al material diferentes grados de tenacidad, dando como resultado un comportamiento lineal para ambas variables, excepto en el caso de la probeta revenida a 400°C por dos horas que presenta una ligera disminución en el tamaño de grieta con respecto a la temperatura y tiempo de revenido, asociado al fenómeno llamado fragilidad por revenido.

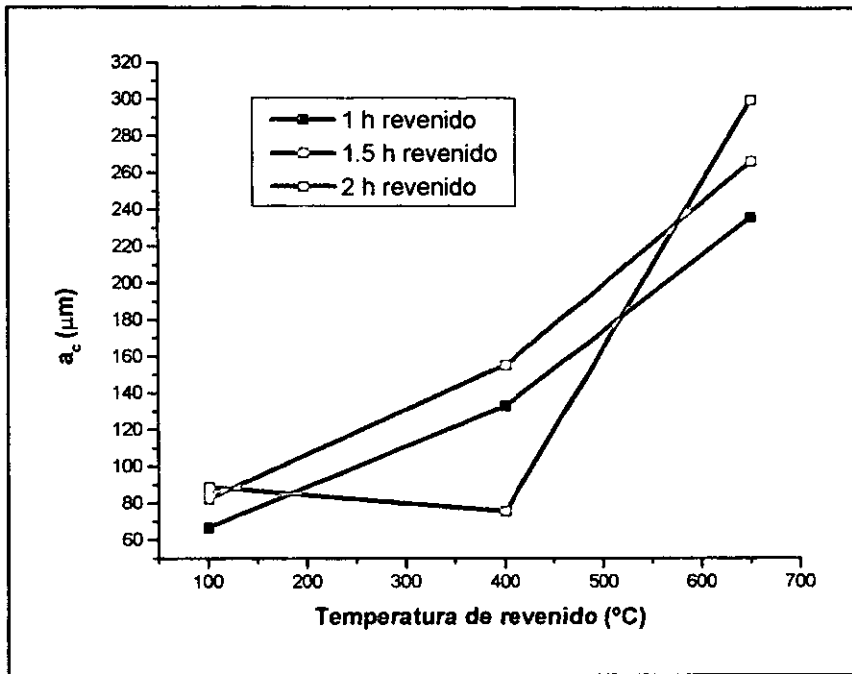


Fig. 3.24. Variación del tamaño de grieta con respecto a la temperatura de revenido.

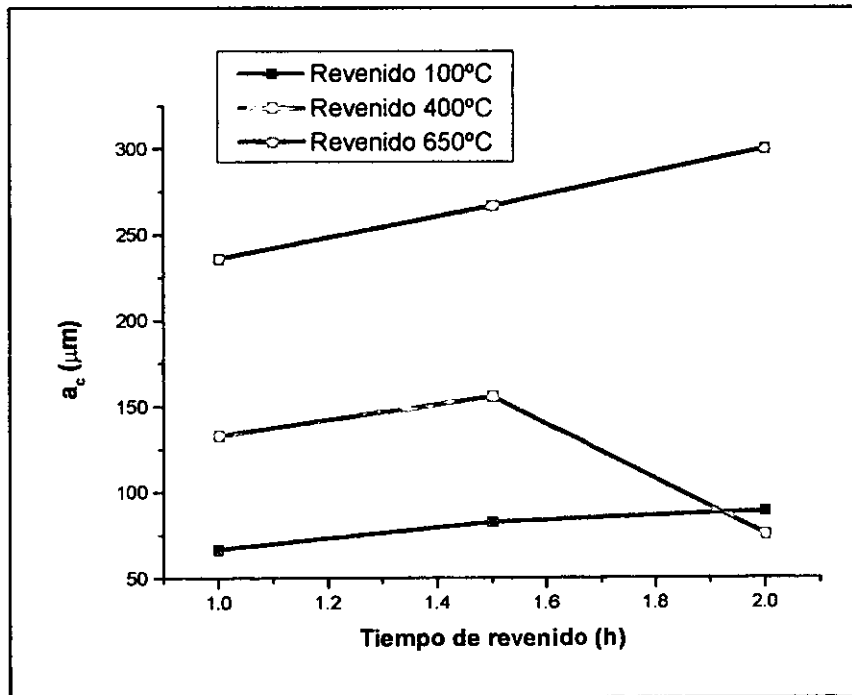
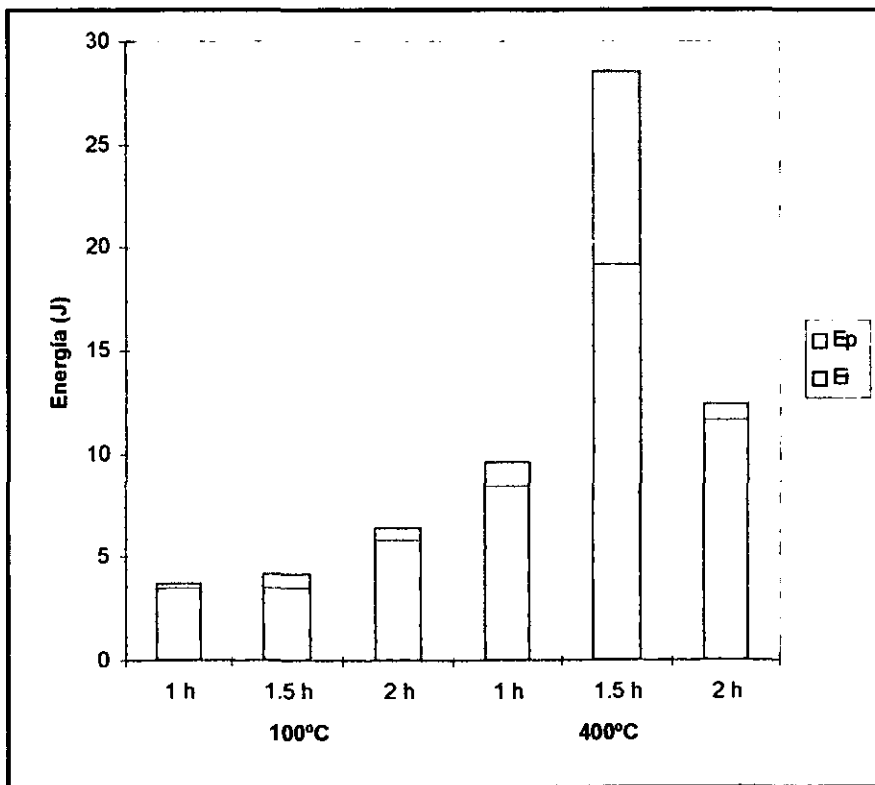


Fig. 3.25. Variación del tamaño de grieta con respecto al tiempo de revenido.

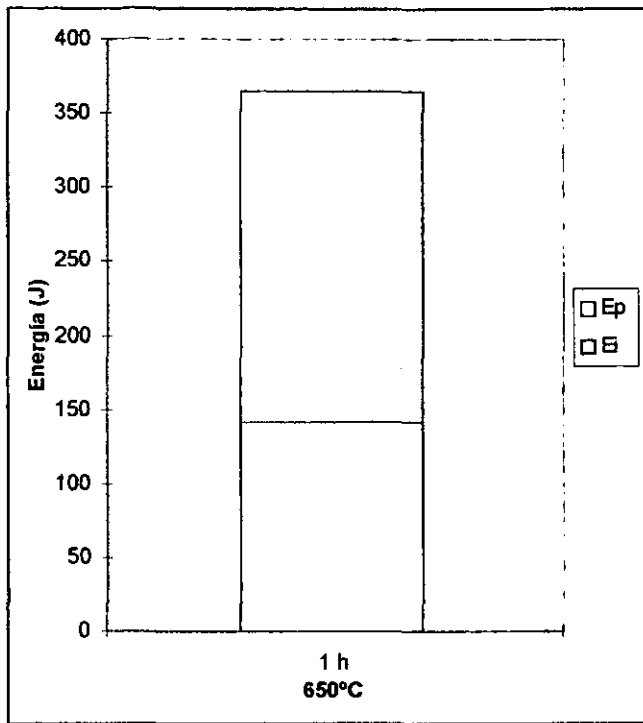
3.6. Energías de iniciación y propagación de grieta.

En la Fig. 3.26 se muestran los valores calculados de energía para la iniciación y propagación de la grieta, donde se aprecia que conforme aumenta el tiempo y la temperatura de revenido se necesita una mayor energía para poder producir una grieta, con excepción de la condición de revenido a 400°C por 2 h que presenta una disminución en su energía total asociado a fenómeno de fragilización por revenido.

Las energías se calcularon obteniendo el área bajo la curva aplicando la ecuación 1.1, adicionalmente se observa que la iniciación de la grieta proporciona la mayor contribución a la energía total que la energía de propagación, con lo cual se puede concluir que al alcanzar la grieta un tamaño crítico, esta se autopropaga, ya que se requiere mayor energía para iniciar una grieta que para propagarla.



(a)



(b)

Fig. 3.26. Energías de iniciación y propagación de la grieta para las diferentes condiciones de revenido.

3.7. Efecto de la temperatura de revenido sobre la tenacidad a la fractura del acero UNS G41400.

La Fig. 3.27. muestra el efecto de la temperatura de revenido sobre la fractura dinámica, acompañada de las microestructuras y fractografías correspondientes a cada condición del tratamiento de revenido. En la Fig. 3.27. se observa que al incrementar la temperatura de revenido se incrementa la tenacidad del material, así mismo se tienen diferentes modos de fractura debido a la microestructura obtenida, es decir, microestructuras de martensita revenida a 100°C presentan una fractura frágil, caracterizada por una superficie de fractura plana con irregularidades y por la presencia de marcas radiales que parten desde la zona de iniciación de la grieta haciendo que la propagación de la grieta sea de manera inestable, al incrementarse el tiempo de revenido se

presenta un cierto grado de frenado de la propagación de la grieta debido a la presencia de zonas de desgarramiento.

Una martensita revenida a 400°C presenta un modo mixto de fractura, donde se presenta una fractura frágil donde se observa una zona de fractura plana con muchas irregularidades y marcas radiales y una zona de fractura dúctil caracterizada por una superficie de fractura de aspecto fibroso, la zona labio de corte es apreciable además de que se presenta una deformación plástica en la cara contraria al entalle, el material presenta una propagación inestable de la grieta pero con un frenado mayor de la grieta.

Una microestructura de ferrita + perlita generada a 650°C, presenta una fractura dúctil o por desgarre, donde la superficie de fractura presenta la ruptura por coalescencia de poros apreciando zonas de deformación plástica y grietas con mucha profundidad, en estas condiciones de tratamiento se presenta el fenómeno de arresto de grieta, que es la habilidad del material a detener la propagación de una grieta.

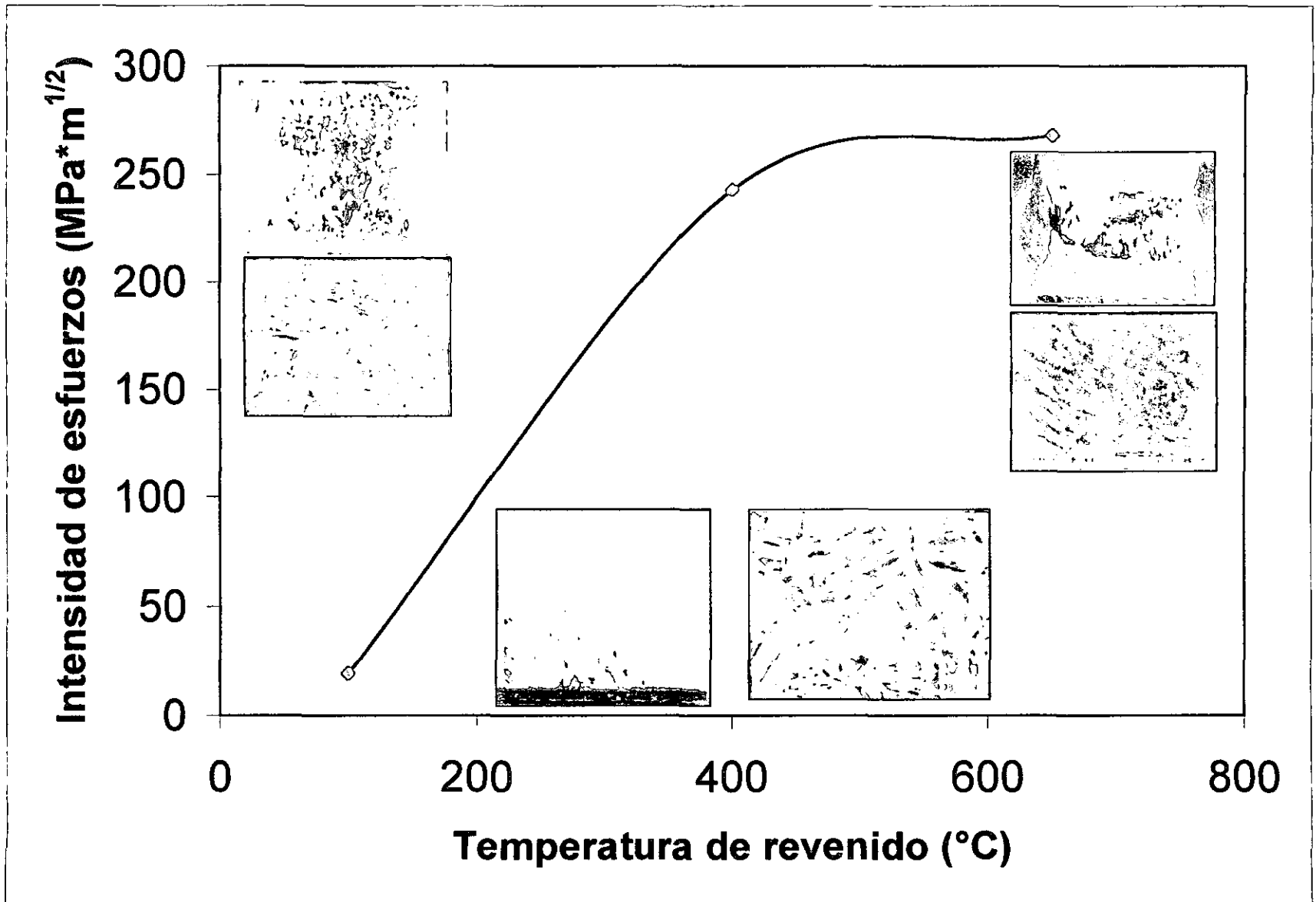


Fig. 3.27. Efecto de la temperatura de revenido sobre los valores de los factores de intensidad de esfuerzos para los diferentes grados de tenacidad.

Capítulo IV. Validación De Resultados.

Las Fig. 4.1. a 4.3. muestran la comparación de los resultados obtenidos en dureza y energía absorbida experimentalmente contra los resultados reportados en la literatura, la Fig. 4.1. muestra los resultados de energía absorbida registrados por la lectura del péndulo y los calculados a partir de la curva carga vs tiempo, donde se observa que a bajas temperaturas de revenido la variación entre los resultados es mínima, dando una tendencia lineal, en cambio; a altas temperaturas de revenido la variación entre los valores registrados y calculados es grande debido a que el material sobre pasa en algunos casos la escala del péndulo causando una lectura errónea.

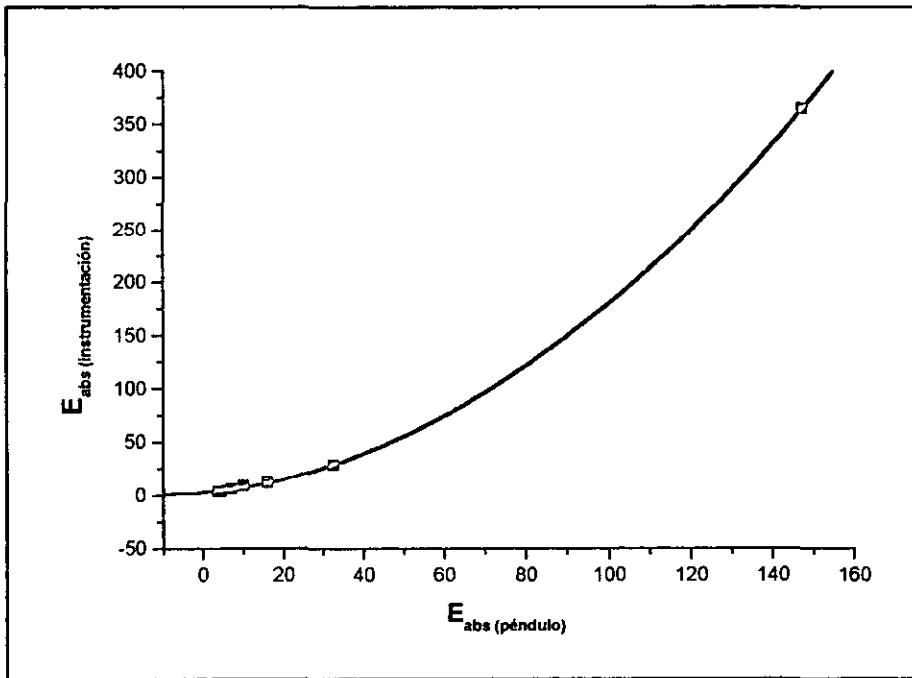


Fig. 4.1. Valores obtenidos con la instrumentación y con la lectura del péndulo.

La Fig. 4.2. muestra los valores de energía absorbida para un acero con 0.4% de contenido de carbono templado en aceite y revenido a diferentes temperaturas.

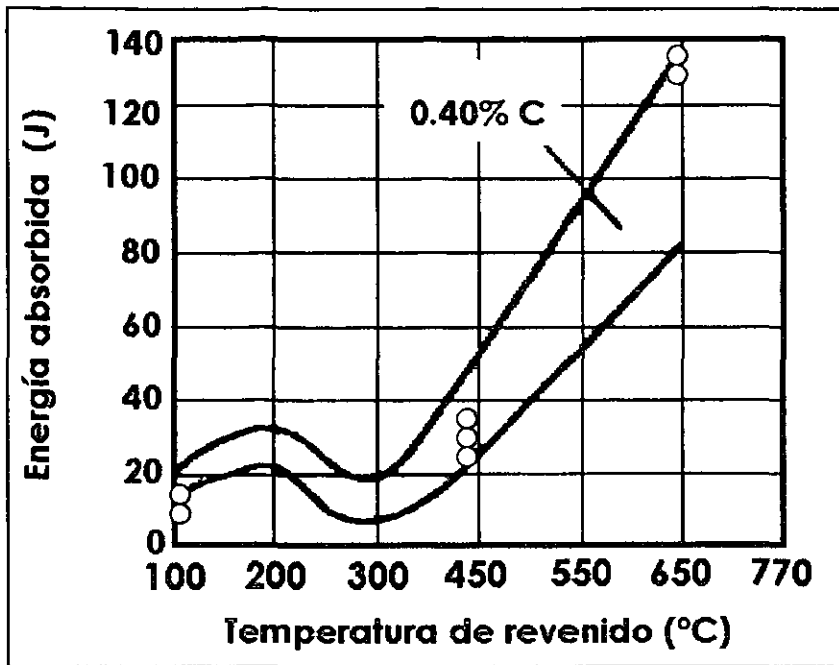


Fig. 4.2. Valores de energía absorbida del acero UNS G41400 a diferentes temperaturas de revenido.

La Fig. 3.30. muestra los valores de dureza Rockwell C para el acero UNS G41400 templado en aceite, contra los obtenidos bajo las condiciones de revenido aplicadas a nuestro acero. Los resultados de dureza obtenidos son a los tres tiempos de revenido manejados generando una banda.

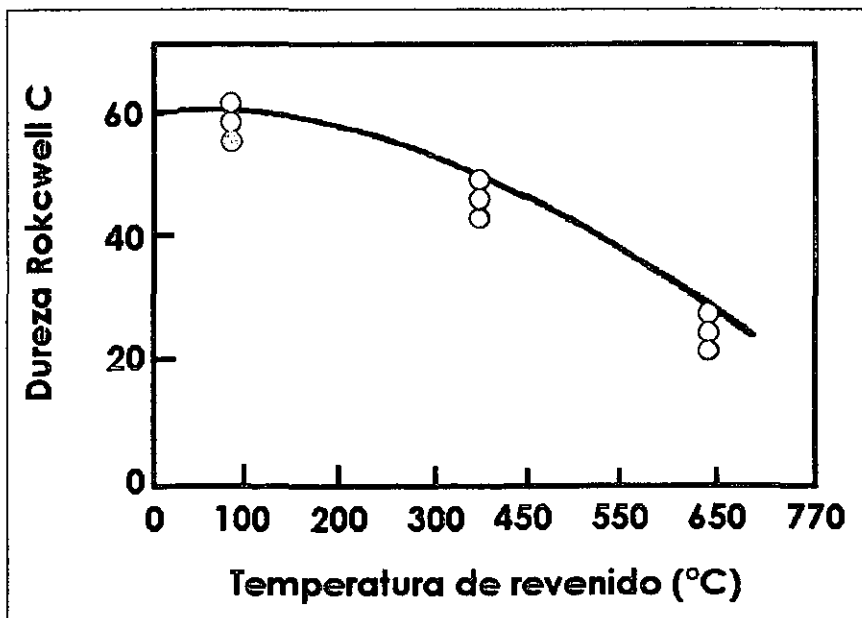


Fig. 4.3. Dureza del acero UNS G41400 templado en aceite y revenido a una hora.

Capítulo V. Conclusiones.

- El empleo de un péndulo instrumentado para el estudio del proceso de fractura de materiales, permite en principio obtener información adicional acerca del proceso de nucleación y crecimiento de una grieta generada durante una prueba de impacto mediante la curva carga vs tiempo.
- Los factores de intensidad de esfuerzos dinámicos, evalúan la tenacidad a la fractura de un material en condiciones de servicio, con el objetivo de aplicar dicho material a condiciones de servicio apropiadas.
- La tenacidad a la fractura del acero UNS G41400 incrementa con la temperatura y tiempo de revenido, así mismo el modo de fractura pasa de una fractura frágil hasta llegar a un desgarre dúctil.
- El acero UNS G41400, presenta el fenómeno de frenado de grieta a 400°C y 1.5 horas de tratamiento y arresto de grieta a 650°C y tiempos de revenido superiores a 1.5 horas, haciendo que se necesite mayor energía para generar una grieta que para propagarla.

Referencias.

[1] ASTM Metals Handbook Vol. 8., Mechanical Testing. Tenth Edition, 1990. ASM International.

[2] Zhuo Zhuang, Yongjin Guo. Analysis of dynamic fracture mechanisms in gas pipelines. Engineering Fracture Mechanics 64 (1999) 271-289.

[3] R. A. Wullaert. Applications of the Instrumented Charpy Impact Test. Impact Testing Of Metals, ASTM Special Technical Publication.

[4] S. Sahraoui and J. L . Lataillade, Analysis of load oscillations in instrumented impact testing. Engineering Fracture Mechanics 1998.

[5] ASTM Metals Handbook Vol. 4., Heat Treating. Tenth Edition, 1990. ASM International.

[6] R. E. Reed-Hill and R. Abbaschian, Principles of Physical Metallurgy, PWS-Kent Pub. Co., 1992.

[7] ASTM Metals Handbook Vol. 1., Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys. Tenth Edition, 1990. ASM International.

[8] Annual Book of ASTM Standards, Section 3. Metals Test Methods and Analytical Procedures. Volume 03.01. Metals-Mechanical testing; Elevated and Low Temperature Tests, 1986. Norma ASTM E 23.

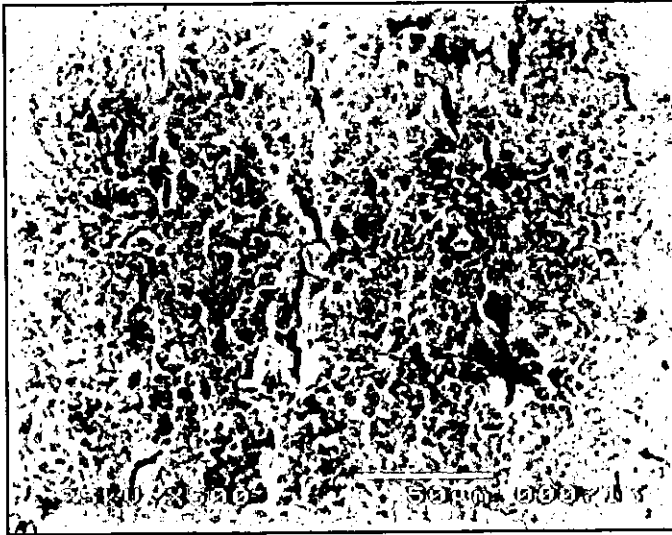
[9] Annual Book of ASTM Standards, Section 3. Metals Test Methods and Analytical Procedures. Volume 03.01. Metals-Mechanical testing; Elevated and Low Temperature Tests, 1986. Norma ASTM E 399.

- [10] Annual Book of ASTM Standards, Section 3. Metals Test Methods and Analytical Procedures. Volume 03.01. Metals-Mechanical testing; Elevated and Low Temperature Tests, 1986. Norma ASTM E 813.
- [11] ASTM Metals Handbook Vol. 11. Failure Analysis. Tenth Edition, 1990. ASM International.
- [12] Karl – Heinz Zum Gahr and Douglas V. Doane. "Optimizing Fracture Toughness and Abrasion Resistance in White Cast Irons". Metallurgical Transactions. Volume 11A, april 1980.
- [13] Temple del acero. Ellen Weyer, Ed. Aguilar, 1972.
- [14] Blanchette, Y., These De Maitrise, Ecole Polytechnique De Montreal, 1980.
- [15] Eligio Orozco, Jaime García. "Instrumentación de un péndulo para obtener registros de carga y tiempo de las probetas de impacto Charpy con entalle en V", 2001.
- [16] L. H. Zhu, Q. X. Zhao. "Application of instrumented impact test for studying dynamic fracture property of 9Cr-1Mo-V-Nb-N steel". Engineering Fracture Mechanics 64 (1999) 327-336.
- [17] Heat Treater's Guide. Standard Practices and Procedures For Steel. ASM, 1991.
- [18] Manuel Zapata Gómez. Tesis De Licenciatura, "Experimentación Asociada A La Instrumentación De Una Máquina De Pruebas De Impacto", 2001.

Anexo de fractografías.

A continuación se presentan fractografías de las superficies de fractura de las diferentes condiciones de revenido.

A.1. Revenido a 100°C por 1 h.



A.1. Vista de la superficie de fractura, donde se observa el agrietamiento secundario.



Fig. A.2. Vista de la superficie de fractura donde se observa el agrietamiento de la probeta y la presencia de zonas de desgarramiento dúctil.

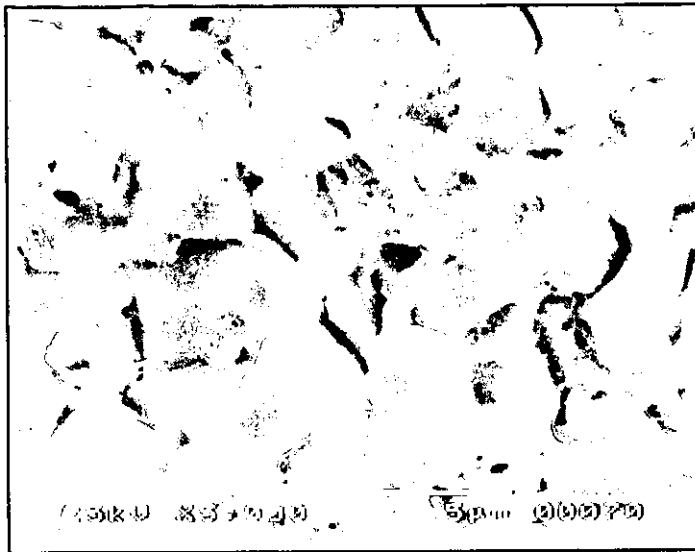


Fig. A.3. Vista de la superficie de fractura mostrando una fractura por clivaje.

A.2. Revenido a 100°C por 1.5 h.

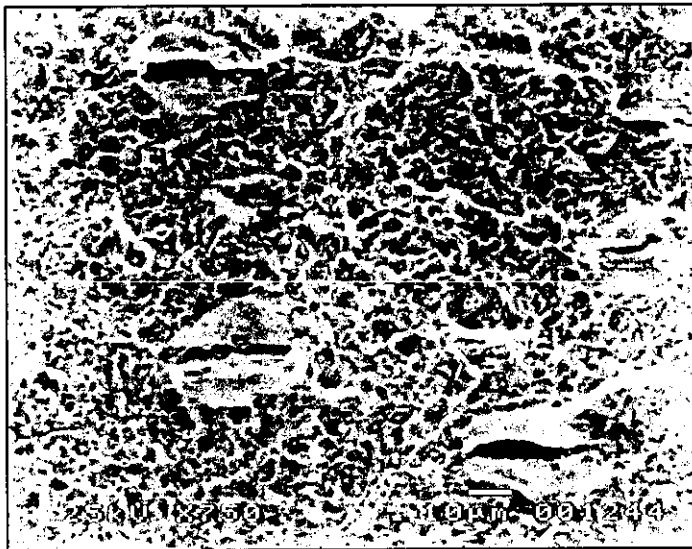


Fig. A.4. Grietas de diferentes tamaños rodeadas de rasgos de desgarramiento dúctil, dentro de la superficie de clivaje.

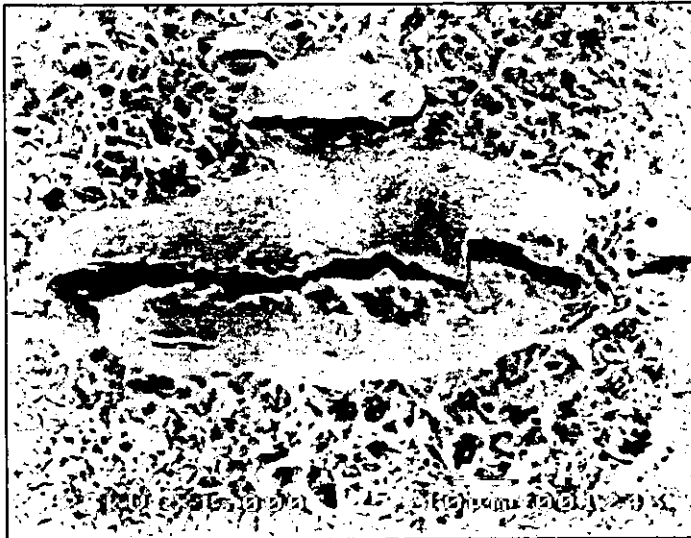


Fig. A.5. Grietas rodeadas de un desgarramiento dúctil, dentro de la superficie de clivaje.

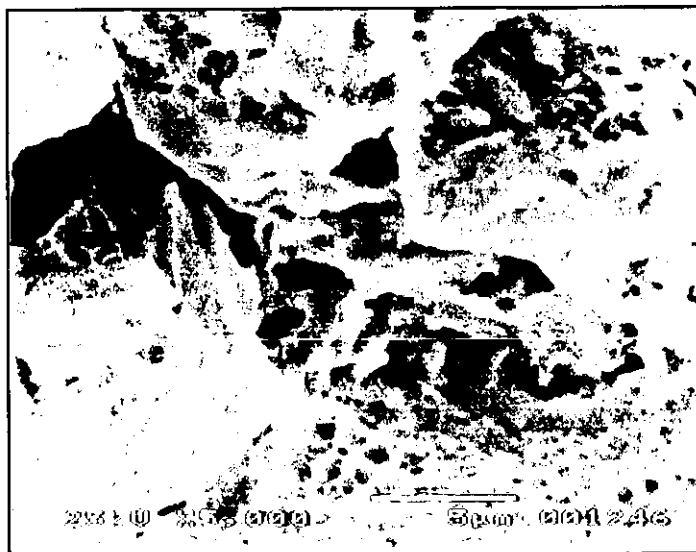


Fig. A.6. Acercamiento del interior de una grieta donde se presenta clivaje y coalescencia de poros.

A.3. Revenido a 100° por 2 h.

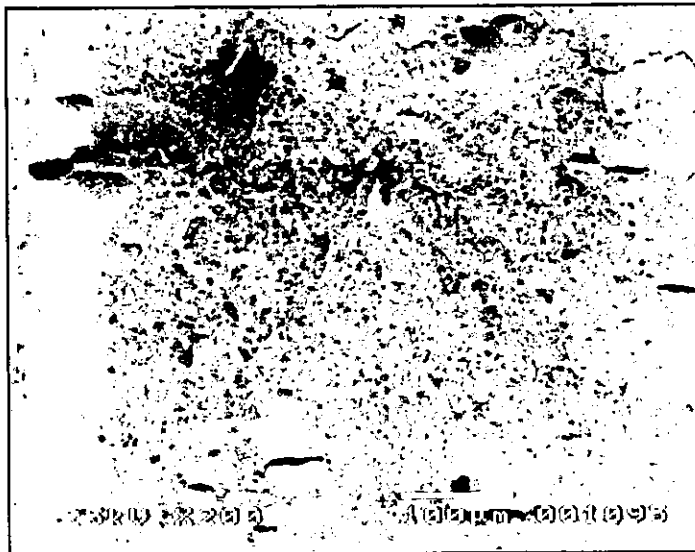


Fig. A.7. Vista de otra zona de la probeta donde se presentan zonas de mayor relieve y mayor conexión entre las grietas.

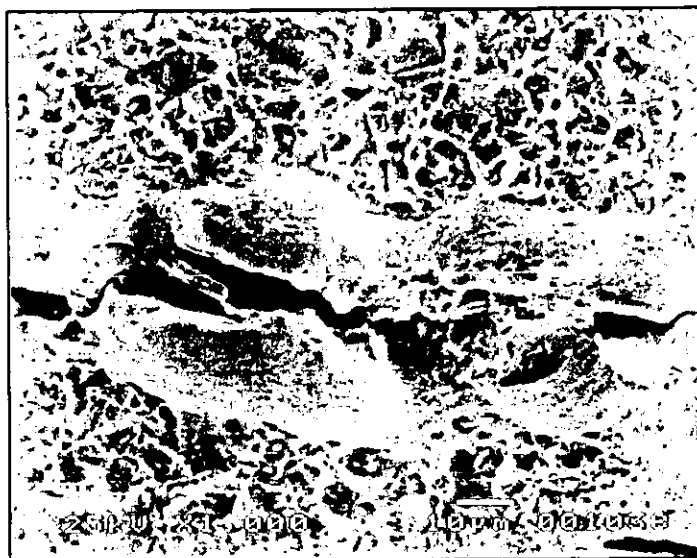


Fig. A.8. Vista de la conexión entre grietas y de la zona de desgarramiento dúctil alrededor de estas.



Fig. A.9. Vista del interior de una grieta donde se observa clivaje y coalescencia de poros.

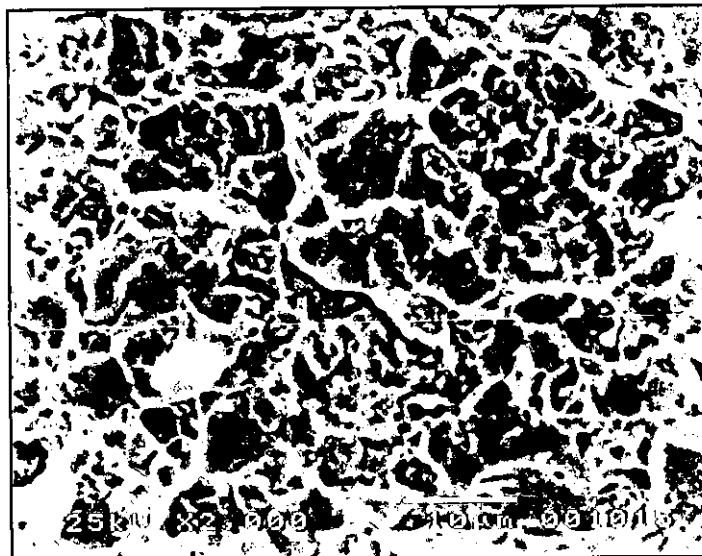


Fig. A.10. Vista de la superficie de fractura mostrando rasgos de fractura por clivaje.

A.4. Revenido a 400°C por 1 h.

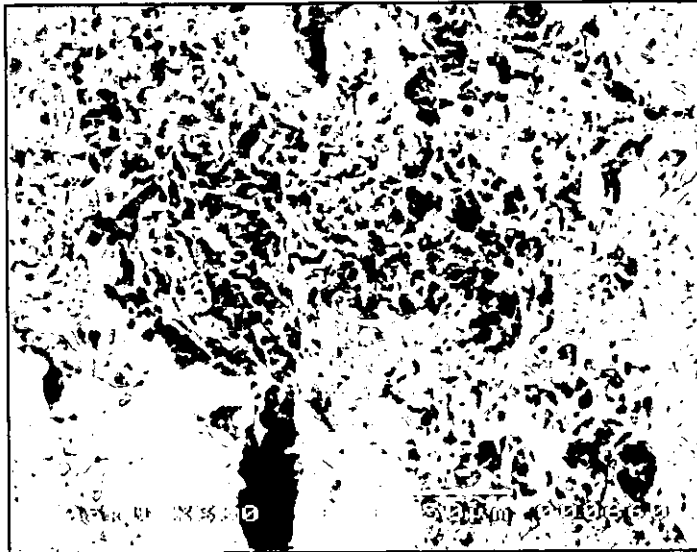


Fig. A.11. Vista de al zona frágil de la probeta, se presentan zonas de desgarramiento dúctil alrededor de las grietas.

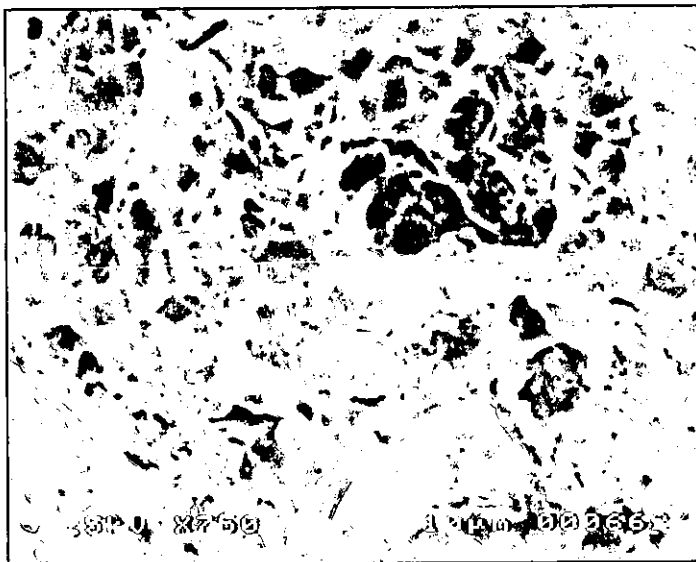


Fig. A.12. Vista de la superficie de fractura en la zona frágil, presentando una fractura por clivaje, con algunos rasgos de ruptura dúctil.

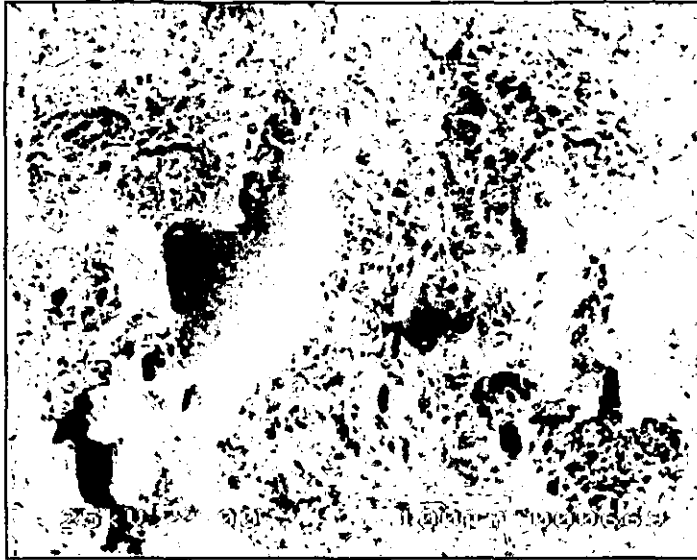


Fig. A.13. Vista de la zona dúctil de la probeta, se puede observar una conexión entre grietas con desgarramiento dúctil y presencia de poros.

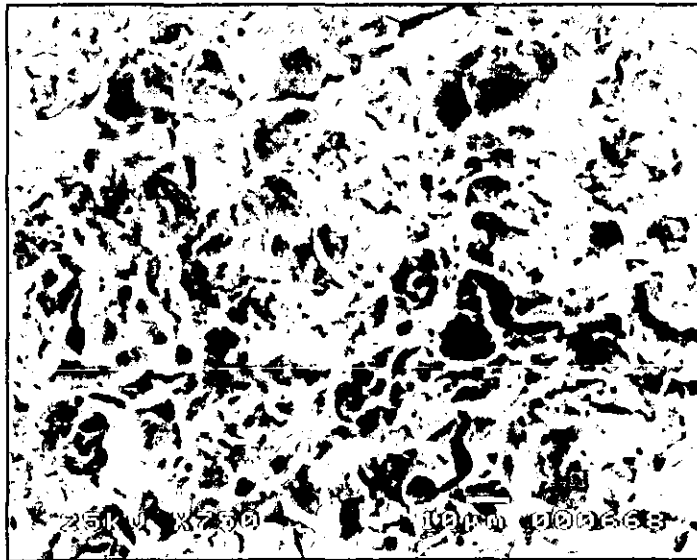


Fig. A.14. Vista de la superficie de fractura en la zona dúctil, la apariencia de los rasgos de clivaje son menos finos, con zonas de agrietamiento y presencia de poros.

A.5. Revenido a 400°C por 1.5 h.



Fig. A.15. Vista de la zona de iniciación de grieta donde se observa la presencia de poros y grietas que se conectan entre sí propagando una grieta desde está zona.

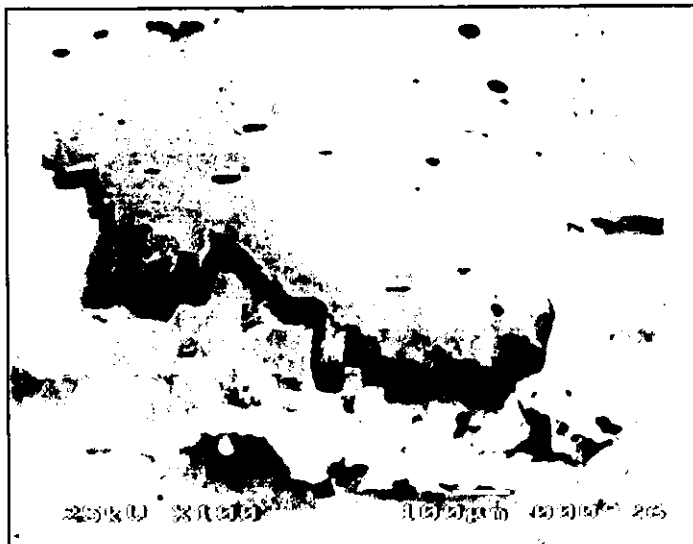


Fig. A.16. Vista de la zona del entalle mostrando una grieta por coalescencia de poros y grietas.

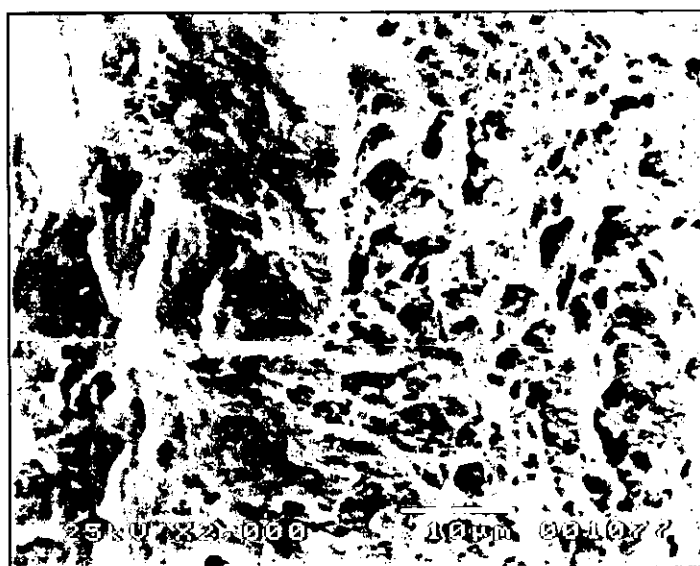


Fig. A.17. Vista de la superficie de fractura, mostrando rasgos de fractura fibrosa asociado al mecanismo de ruptura de coalescencia de poros.

A.6. Revenido a 400° por 2 h.



Fig. A.18. Vista de una zona donde se muestran los dos tipos de mecanismos de fractura: coalescencia de poros y clivaje.

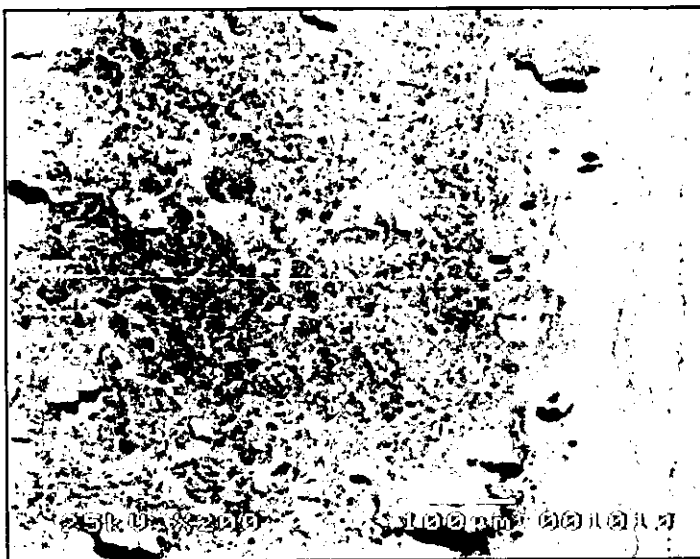


Fig. A.19. Superficie de fractura que muestra rasgos de fractura frágil debido a la fragilidad por revenido.

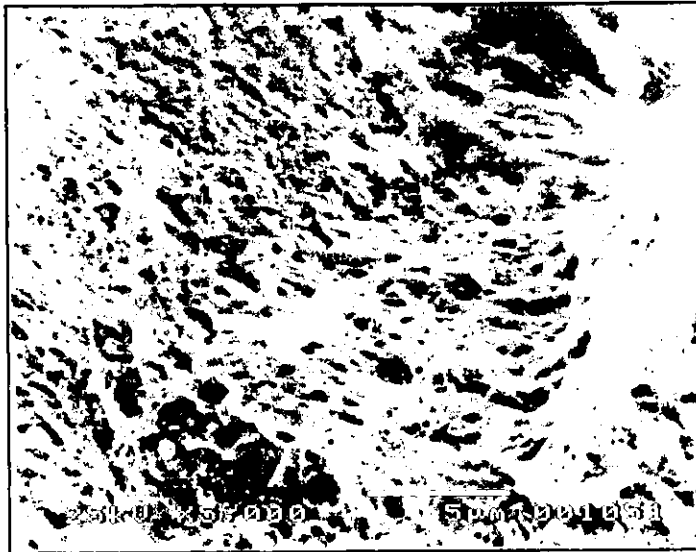


Fig. A.20. Vista del interior de la zona de desgarramiento dúctil en la grieta central, donde observa la coalescencia de poros.



Fig. A.21. Vista de la superficie de fractura donde se muestran rasgos de clivaje, sin presentar mucha definición en rasgos.

A.7. Revenido a 650°C por 1 h.



A.22. Vista general de la superficie de fractura en donde se aprecia un escalonamiento en la superficie de fractura asociado a el frenado de la grieta.

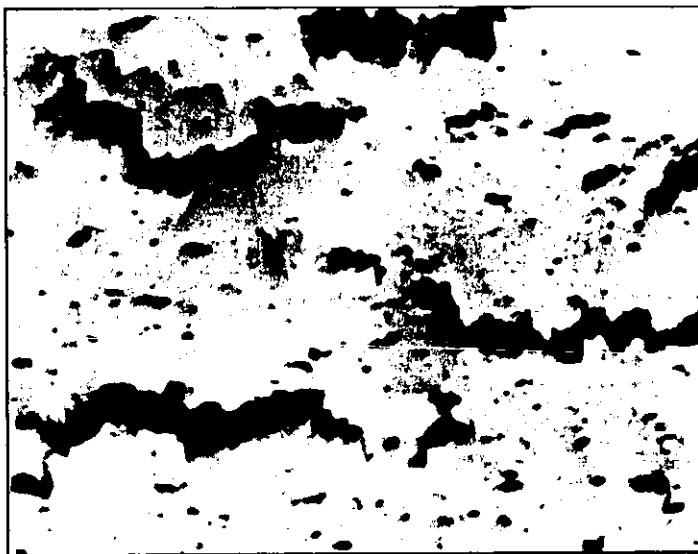


Fig. A.23. Superficie de fractura mostrando el mecanismo de ruptura por coalescencia de poros.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



Fig. A.24. Observación de la zona central de la probeta donde se observa el agrietamiento y una ligera coalescencia de poros



A.25. Vista de la zona de propagación en donde se observa la conexión entre grietas asistida por la coalescencia de poros.

A.8. Revenido a 650°C por 1.5 h.



Fig. A.26. Vista de la zona de iniciación de grieta donde se muestra una grieta ocasionada por la coalescencia de poros.

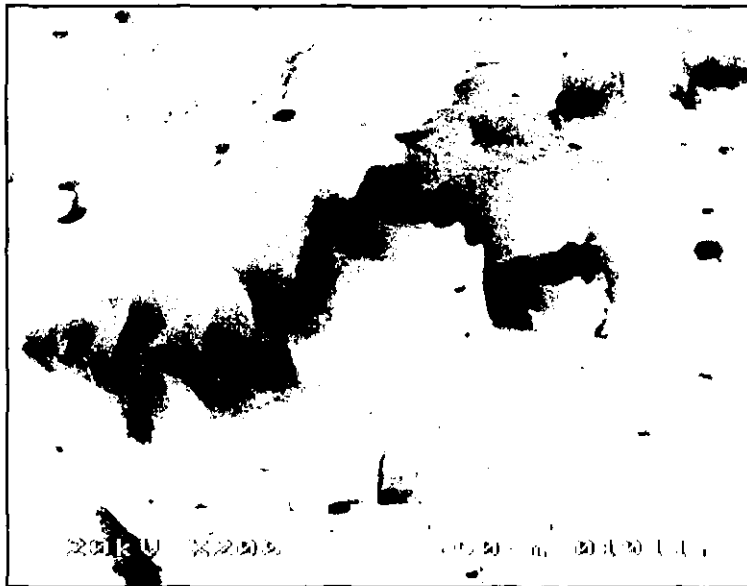


Fig. A.27. Vista de una grieta producida por la coalescencia de poros.

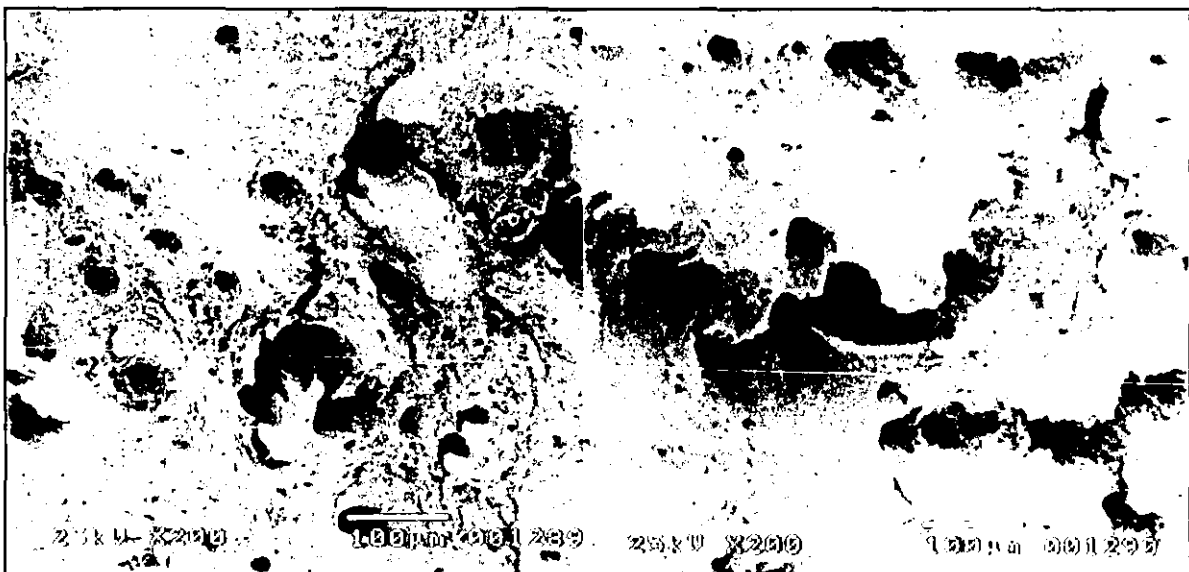


Fig. A.28. Vista de los rasgos de fractura por coalescencia de poros en la zona central de la probeta.

A.9. Revenido a 650°C por 2 h.

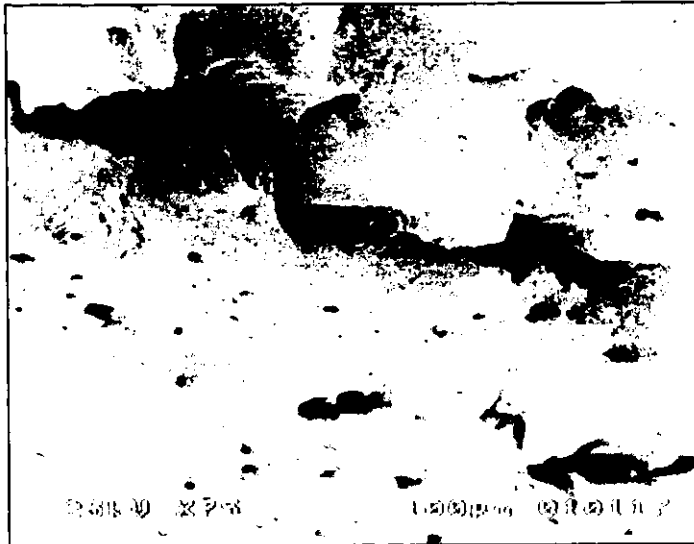
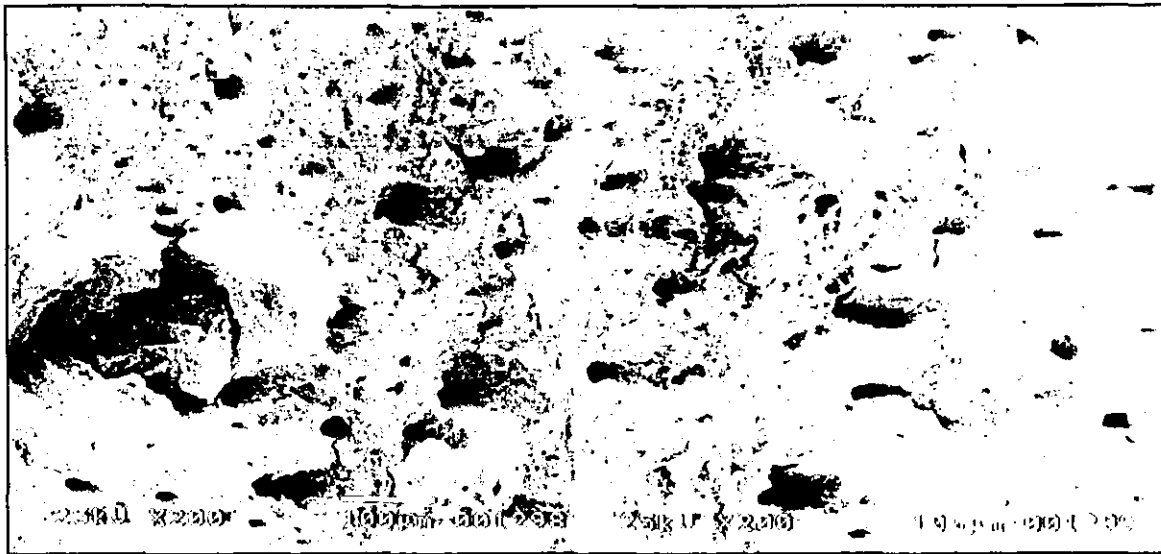


Fig. A.29. Vista de la superficie de fractura, mostrando la ruptura por coalescencia de poros.



Fig. A.30. Vista de una grieta de mucha profundidad, que presenta una gran zona de desgarramiento dúctil.



A.31. Vista de la zona de propagación de la grieta donde se observan rasgos de deformación plástica asociados al frenado de la grieta.