INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO EN LA ENERGÍA ABSORBIDA PARA UN ACERO 1045 TRATADO TÉRMICAMENTE DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS

JORGE ENRIQUE PATIÑO PÉREZ
PAULA ANDREA POTES DIAZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2017

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE REVENIDO EN LA ENERGÍA ABSORBIDA PARA UN ACERO 1045 TRATADO TÉRMICAMENTE DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS

JORGE ENRIQUE PATIÑO PÉREZ
PAULA ANDREA POTES DÍAZ
Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIEROS MECÁNICOS

Director
Ing. CARLOS ARTURO BOHÓRQUEZ ÁVILA

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2017

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 6
2. JUSTIFICACIÓN 7
3. OBJETIVOS 8
   3.1 OBJETIVO GENERAL 8
   3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8
4. MARCO TEÓRICO 9
   4.1 ACEROS DOBLE FASE 9
   4.2 TRANSFORMACIONES DE FASE 9
   4.3 AUSTENITA-PERLITA 9
   4.4 AUSTENITA-BAINITA 10
   4.5 AUSTENITA-MARTENSITA 10
   4.6 MARTENSITA REVENIDA 11
   4.7 REVENIDO 13
   4.8 FRAGILIDAD DE REVENIDO 13
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO 15
   5.1 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RÉPLICAS NECESARIAS PARA TENER VALIDEZ ESTADÍSTICA EN LOS ENSAYOS REALIZADOS 15
   5.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS PARA REALIZAR ENSAYO DE IMPACTO 18
   5.3 SECUENCIA DE TRATAMIENTO 21
   5.4 ENSAYO DE DUREZA E IMPACTO 25
   5.5 PREPARACIÓN DE PROBETAS Y TOMA DE MICROGRAFÍAS 26
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS REALIZADOS 28
   6.1 DUREZAS 28
      6.1.1 Durezas del material base y temples 28
      6.1.2 Dureza de revenidos realizados al temple desde 740°C 28
      6.1.3 Dureza de revenidos realizados al temple desde 770°C 31
   6.2 IMPACTO 34
   6.3 MICROSCOPÍA ÓPTICA 38
   6.4 MICRODUREZAS 43
   6.5 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) 44
7. CONCLUSIONES 52
8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 53
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54
10. ANEXOS 55
   10.1 Anexo 1 55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Factores de tiempo y temperatura 16
Tabla 2 Valores estadísticos del ensayo de dureza material de suministro 16
Tabla 3 Relación del factor A con Φ y grados de libertad 17
Tabla 4 Relación entre n y la probabilidad de acierto 17
Tabla 5 Composición química del acero AISI SAE 1045 22
Tabla 6 Dureza promedio del material base y temples 28
Tabla 7 Dureza promedio de los revenidos realizados al temple desde 740°C 29
Tabla 8 Dureza promedio de los revenidos realizados al temple desde 770°C 31
Tabla 9 Energía absorbida promedio del material base y temples 34
Tabla 10 Energía absorbida promedio para las probetas templadas desde 740°C y revenidas según la temperatura indicada 35
Tabla 11 Energía absorbida promedio para las probetas templadas desde 770°C y revenidas según la temperatura indicada 37
Tabla 12 Micrografías ópticas según tratamientos indicadas (series de imágenes 1) 39
Tabla 13 Micrografías ópticas según tratamientos indicadas (serie de imágenes 2) 40
Tabla 14 Micrografías ópticas según tratamientos indicadas (serie de imágenes 3) 41
Tabla 15 Micrografías ópticas según tratamientos indicadas (serie de imágenes 4) 42
Tabla 16 Microdurezas promedio por serie de tratamiento 43
Tabla 17 Micrografías obtenidas por SEM 46
Tabla 18 Imágenes de las rupturas de las probetas de impacto 48
Tabla 19 Imágenes de las rupturas de las probetas de impacto 49
Tabla 20 Imágenes de las rupturas de las probetas de impacto 50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Transformación de fase Martensita-Martensita revenida 11
Figura 2 Cuadro de transformaciones de fase del acero 12
Figura 3 Diagrama de fabricación de la probetas Charpy 18
Figura 4 Influencia de la dirección de laminado sobre la energía absorbida 19
Figura 5 Proceso de corte realizado en la sierra automatizada GZS 402NA 20
Figura 6 Características geométricas de la probeta para el ensayo charpy medidas en mm 20
Figura 7 Entalla de probeta Charpy fabricada 21
Figura 8 Disposición de las probetas para la realización de los temples 23
Figura 9 Secuencias de tratamientos realizados 24
Figura 10 Prueba de dureza en escalas HRB y HRC 25
Figura 11 Realización de pruebas de impacto 26
Figura 12 Resultados finales de cada proceso de preparación de las probetas 27
Figura 13 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 550 °C para el material templado desde 740 °C 29
Figura 14 Resultado del ensayo de dureza Vs tiempo de revenido a 600 °C para el material templado desde 740 °C 30
Figura 15 Resultado del ensayo de dureza Vs tiempo de revenido a 650 °C para el material templado desde 740 °C 30
Figura 16 Resultado del ensayo de dureza Vs tiempo de revenido a 550 °C para el material templado desde 770 °C 32
Figura 17 Resultado del ensayo de dureza Vs tiempo de revenido a 600 °C para el material templado desde 770 °C 32
Figura 18 Resultado del ensayo de dureza Vs tiempo de revenido a 650 °C para el material templado desde 770 °C 33
Figura 19 Porcentaje de variación en la dureza 33
Figura 20 Rupturas del material base y temples desde 740 y 770 °C 34
Figura 21 Gráficas de energía absorbida para las probetas templadas desde 740°C y revenidas a diferentes temperaturas VS tiempo de revenido 36
Figura 22 Gráficas de energía absorbida para las probetas templadas desde 770°C y revenidas a diferentes temperaturas VS tiempo de revenido 38
Figura 23 Microscopio electrónico de barrido Tescam Vega 3 SB 45

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros Dual Phase son materiales que se destacan por una combinación de fases (ferrítica y martensítica) permitiendo ofrecer mejores propiedades a los aceros, como lo son la ductilidad y una buena resistencia mecánica, son de gran importancia en la fabricación de vehículos ya que optimizan su desempeño y permite el ahorro de materiales. Es válido decir que el acero recibe un proceso a temperaturas intercríticas, permitiendo obtener las características mencionadas.

Por medio de microscopía óptica y electrónica se revelaron diferentes microestructuras y se realizaron pruebas de impacto, dando a conocer un análisis completo del material, se encuentra que es viable la adquisición de las propiedades dual phase para el acero seleccionado y pueden ser aplicadas a la industria automotriz.

El acero doble fase o denominado de alta resistencia se caracteriza por propiedades de resistencia y buena formabilidad, por medio de procesos intercríticos se obtienen propiedades dual phase, a estas se les aplica tratamientos térmicos específicos logrando un revenido. Para los ensayos de fractura se obtiene un incremento en la ductilidad del material dependiendo el tiempo de revenido; las temperaturas que se trabajaron para realizar los revenidos estuvieron por encima de 550°C hasta los 770°C y por medio de los resultados obtenidos, es apropiado decir que al aplicar estos tratamientos, las propiedades de dureza y ductilidad mejoran, permitiendo realizar nuevas aplicaciones según requieran el aprovechamiento de las características obtenidas.

2. JUSTIFICACIÓN

Con el propósito de ampliar la investigación de los materiales en el área de ingeniería, se realiza este proyecto de grado enfocado en complementar los estudios en el acero AISI/SAE 1045, identificando su comportamiento al ser sometido a diferentes cambios de temperatura, para observar su comportamiento en la absorción de energía en un impacto dinámico.

Esta investigación tiene varios aspectos ventajosos como es el estudio de los aceros Dual Phase, el cual en el mercado presenta un costo elevado por su proceso de fabricación, por esta razón se decidió generar la fase dual del acero a partir de una secuencia de tratamientos térmicos.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de la temperatura de revenido en la energía al impacto que puede absorber un acero AISI/SAE1045 tratado térmicamente desde temperaturas intercríticas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la cantidad de probetas necesarias para establecer el comportamiento del material.
2. Establecer la secuencia de tratamientos térmicos.
3. Realizar las pruebas de impacto según la norma ASTM E23, ensayos de dureza, análisis de fractura, toma de micrografías ópticas y SEM.
4. Determinar la influencia de la temperatura de revenido en la cantidad de energía absorbida.

4. MARCO TEORICO

4.1 ACEROS DOBLE FASE

Los aceros doble fase se hallan en la familia AHSS (aceros avanzados de alta resistencia), estos reducen el peso del material y no cambian la resistencia mecánica del mismo. La microestructura de este tipo de materiales se encuentra formada por ferrita, martensita y pequeñas cantidades de bainita y austenita (causada por el tratamiento térmico).Esta estructura permite lograr muy alta resistencia con buena formabilidad (resistencia a la tensión hasta los 980 Mpa) y resistencia a la fatiga, así como una gran capacidad de absorción de energía, por lo que es utilizado principalmente en la industria automotriz en partes del chasis.

4.2 TRANSFORMACIONES DE FASE

Una transformación de fase produce algunas alteraciones de la microestructura constituye y puede ser subdivididas en tres categorías:

1. Difusión simple: No cambia el número o composición de las fases presentes algunos ejemplos de esta son la solidificación de metales puros, recristalización y crecimiento de grano, trasformaciones alotrópicas.
2. Difusión compleja: En función de la difusión puede que se lleven a cabo alteraciones en las composiciones de fases y en algunas ocasiones, en el número de fases.
3. Sin difusión: En esta no existe una migración representativa del carbono en la microestructura formando una fase meta estable.

4.3 AUSTENITA-PERLITA

Enfriando lentamente la austenita con una concentración intermedia de carbono, se transforma en ferrita con un contenido de carbono inferior y cementita con un porcentaje muy superior de carbono. Los átomos de carbono necesitan difundir para segregar selectivamente. Los átomos de carbono se difunden de la región ferrítica a las capas de cementita para conseguir la concentración del 6.70% en peso de C y la perlita se propaga, a partir de los límites de grano hacia el interior de los granos austeníticos.

La perlita tiene forma de láminas porque los átomos de carbono necesitan difundir la distancia mínima dentro de esta estructura, la temperatura juega un importante papel en la velocidad de la transformación austenita-perlita. La relación de espesores de las láminas de ferrita y cementita en la perlita es de 8 a 1, aproximadamente, sin embargo, el espesor absoluto de una lámina depende de la temperatura de transformación. A temperaturas inferiores y muy próximas a la eutectoide se forman láminas de ferrita α y de Fe3C; esta microestructura se

denomina perlita gruesa y se forma porque los átomos de carbono pueden difundir a lo largo de distancias relativamente largas, formando láminas gruesas. A medida que disminuye la temperatura, se forman láminas más delgadas ya que la velocidad de difusión del carbono decrece. La estructura de láminas delgadas producida en la proximidad de 540°C se denomina perlita fina.
La perlita fina es más dura y resistente que la perlita gruesa, La razón de este comportamiento radica en los fenómenos que ocurren en los límites de fases a-F e3C. En primer lugar hay un alto grado de adherencia entre las dos fases en el límite. Por lo tanto, la resistencia y la rigidez de la fase cementita restringe la deformación de la fase ferrita, más blanda, en las regiones adyacentes al límite; es decir, la cementita refuerza a la ferrita. Este grado de reforzamiento es más elevado en la perlita fina porque es mayor la superficie de límites de fases por unidad de volumen del material. Además, los límites de fases sirven de barrera para el movimiento de dislocaciones del mismo modo que los límites de grano. En la perlita fina y durante la deformación plástica las dislocaciones deben cruzar más límites de fases que en la perlita gruesa. De este modo el mayor reforzamiento y restricción del movimiento de las dislocaciones en la perlita fina se traducen en mayor dureza y resistencia mecánica.
La perlita gruesa es más dúctil que la perlita fina, Este comportamiento es consecuencia de la mayor restricción de la perlita fina a la deformación plástica

4.4 AUSTENITA-BAINITA

La microestructura bainítica consta de las fases ferrita y cementita, en su formación intervienen procesos de difusión. La bainita forma agujas o placas, dependiendo de la temperatura de transformación; los detalles microestructurales de la bainita son tan finos que su resolución sólo es posible mediante el microscopio electrónico La transformación bainítica también depende del tiempo y de la temperatura y se puede representar en un diagrama de transformación isotérmico, a temperaturas inferiores a las de formación de la perlita. Las transformaciones perlítica y bainítica compiten entre sí y sólo una parte de una aleación se puede transformar en perlita o en bainita; la transformación en otro microconstituyente sólo es posible volviendo a calentar hasta formar austenita.

4.5 AUSTENITA-MARTENSITA

El enfriamiento rápido (o temple), hasta temperatura próxima a la ambiental, del acero austenizadó origina otro microconstituyente denominado martensita, que resulta como una estructura de no equilibrio de la transformación sin difusión de la austenita. Se puede considerar un producto de transformación competitivo con la perlita o la bainita. La transformación martensítica tiene lugar a velocidades de temple muy rápidas que dificultan la difusión del carbono. Si hubiera difusión se formarían las fases ferrita y cementita. La transformación martensítica no es bien conocida. Sin embargo, gran número de átomos se mueven de modo cooperativo,

lo que representa pequeños desplazamientos de un átomo respecto a sus vecinos. Esta transformación significa que la austenita FCC experimenta una transformación polimórfica a la martensita tetragonal centrada en el cuerpo (BCT).
Todos los átomos de carbono permanecen como solutos intersticiales en la martensita y constituyen una disolución sólida sobresaturada capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a temperaturas que implican una apreciable velocidad de difusión. La mayoría de los aceros retienen la estructura martensítica casi indefinidamente a temperatura ambiente. La transformación martensítica no sólo ocurre en el acero, sino que otros sistemas de aleación se caracterizan por experimentar transformaciones sin difusión.
La austenita es ligeramente más densa que la martensita y, por lo tanto, el volumen aumenta durante la transformación de fase que ocurre durante el temple. Consiguientemente, el temple rápido de piezas relativamente grandes puede producir grietas debido a las tensiones internas; problema especialmente importante si el contenido en carbono del acero es superior al 0,5% en peso.
La martensita resultante del temple es muy dura y muy frágil y, por lo tanto, inservible para la mayoría de las aplicaciones; además, las tensiones internas introducidas durante el temple ejercen un efecto fragilizante. La ductilidad y la tenacidad de la austenita se incrementan y las tensiones internas se reducen mediante el tratamiento térmico conocido como revenido.

4.6 MARTENSITA REVENIDA

El revenido se lleva a cabo calentando el acero martensítico a una temperatura inferior a la eutectoide durante un período de tiempo específico. Normalmente el revenido se realiza calentando entre los 250 y 650°C; sin embargo, las tensiones internas se pueden eliminar a temperaturas de unos 200°C. Durante el tratamiento térmico de revenido se puede conseguir, por un proceso de difusión, la formación de martensita revenida, según la reacción.

Figura 1 Transformación de fase Martensita-Martensita revenida

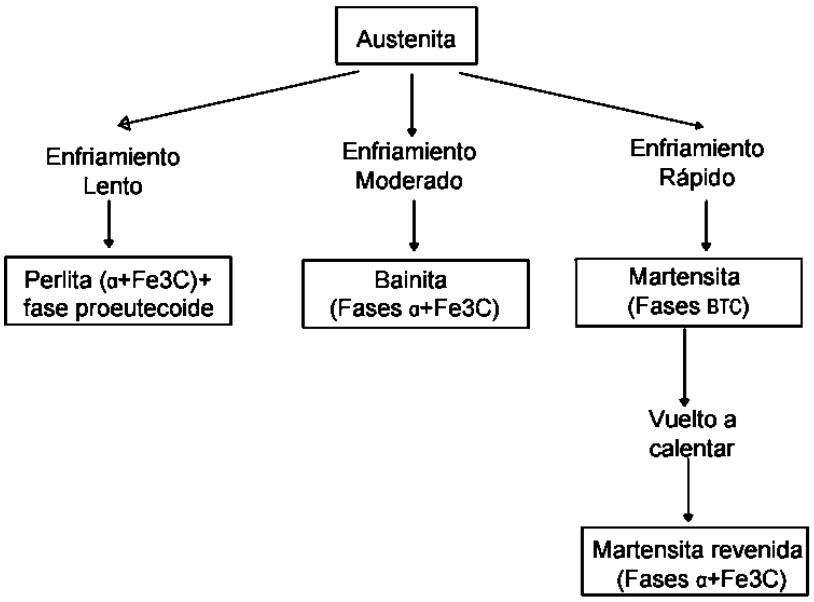
martensita (monofásica BCT)	→	martensita revenida (bifásica $\alpha + Fe_3C$)

Fuente: Autores

Donde la martensita monofásica BCT sobresaturada de carbono se transforma en martensita revenida, compuesta por las fases ferrita estable y cementita, según indica el diagrama de fases hierro-carburo de hierro. La microestructura de la martensita revenida consiste en partículas extremadamente pequeñas de cementita

embebidas en una matriz ferrítica continua y uniformemente dispersas. Es una estructura parecida a la esferoidita excepto en el tamaño, que es mucho más pequeño. La martensita revenida casi es tan dura y resistente como la martensita, pero mucho más dúctil y tenaz. La dureza y la resistencia se explican por la gran superficie de límite de fase por unidad de volumen que existe en las diminutas y numerosas partículas de cementita. De nuevo, la dura fase cementita refuerza la matriz ferrítica mediante los límites, que también actúan como barrera para el movimiento de las dislocaciones durante la deformación plástica. La fase ferrita continua también es muy dúctil y relativamente tenaz y aporta estas dos propiedades a la martensita revenida. El tamaño de las partículas de cementita influye en el comportamiento mecánico de la martensita revenida; incrementando el tamaño de las partículas, decrece el área de los límites de fase y, por consiguiente, resulta un material más blando y menos resistente, ya que es más dúctil y tenaz. A demás, el revenido determina el tamaño de las partículas de cementita. Las variables de este tratamiento térmico son la temperatura y el tiempo y la mayoría de los tratamientos de revenido se realizan a temperatura constante. Puesto que la transformación martensita-martensita revenida significa difusión del carbono, un incremento de temperatura acelera la difusión, la velocidad de crecimiento de las partículas de cementita y, por consiguiente, la velocidad de ablandamiento

Figura 2 Cuadro de transformaciones de fase del acero



Fuente: Autores

4.7 REVENIDO

Es el tratamiento térmico efectuado sobre un producto templado con el fin de obtener modificaciones que le confiera las características de empleo deseadas. El ciclo térmico de este tratamiento, se compone de las siguientes etapas:

1. Calentamiento hasta una temperatura determinada pero inferior a Ac1.
2. Uno o varios mantenimientos a una o varias temperaturas determinadas.
3. Uno o varios enfriamientos hasta la temperatura ambiente (generalmente al aire, agua o aceite).

El objetivo del revenido es mejorar la tenacidad de los aceros templados, a costa de disminuir la dureza, la resistencia mecánica y su límite elástico. En el revenido se consigue también eliminar, o por lo menos disminuir, las tensiones internas del material producidas a consecuencia del temple. El proceso completo de temple más revenido se conoce como bonificado, que como su nombre lo indica, mejora o beneficia el acero, aumentando su vida. Calentando por encima de 650°C, se obtiene estructura de grano grueso, al bajar la temperatura de revenido, se van obteniendo estructuras cada vez más finas y más duras, en términos generales la temperatura de revenido varía entre 200 y 650°C. Para un acero dado, la permanencia a la temperatura del revenido depende de la forma y dimensiones de la pieza, en general, para los aceros con contenido medio de carbono se recomienda una hora, más una hora por pulgada de espesor.

4.8 FRAGILIDAD DE REVENIDO

Algunos aceros revenidos disminuyen la tenacidad determinada mediante la resistencia al impacto y este fenómeno recibe el nombre de fragilidad de revenido. Esta fragilización ocurre cuando el acero se reviene temperaturas superiores a 575°C y se enfría lentamente hasta temperatura ambiente o cuando se reviene a temperaturas comprendidas entre 375 y 575°C. Los aceros aleados susceptibles de fragilizarse por revenido contienen apreciables porcentajes de elementos de aleación como manganeso, níquel o cromo y, además, pequeñas concentraciones de una o más impurezas como antimonio, fósforo, arsénico y estaño. La presencia de los elementos aleantes y de las impurezas traslada la transición frágil-dúctil a elevadas temperaturas; de este modo la temperatura ambiente representa la condición frágil de esta transición. Se ha observado que la propagación de grietas en este material frágil es intergranular; esto es, la rotura ocurre a lo largo de los límites de grano austeníticos. Además, los elementos de aleación y las impurezas del acero segregan en estos límites de grano. La fragilidad de revenido se puede prevenir por:

- Control composicional.
- Calentamiento superior a 575°C o inferior a 375°C seguido de temple a temperatura ambiente. Además, la falta de tenacidad de un acero fragilizado se puede subsanar calentando a 600°C y enfriar rápidamente a 300° C.

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO

5.1 CALCULO DE LA CANTIDAD DE RÉPLICAS NECESARIAS PARA TENER VALIDEZ ESTADÍSTICA EN LOS ENSAYOS REALIZADOS

Para la realización del experimento, se tomaron dos factores, la temperatura de revenido y duración del mismo (tiempo de revenido), se determinó el numero de probetas (número de réplicas) basado en un diseño experimental factorial de dos niveles, por medio de los parámetros φ^2,seleccionándolo en relación a que factor será sensible el diseño a diferencias potenciales, importantes entre los tratamientos, para establecer la cantidad de muestreos, es necesario referirse las curvas de operación característica en el apéndice cinco del texto diseño y análisis de experimentos[1]

La siguiente ecuación relaciona los diferentes factores del diseño experimental factorial de dos niveles

$$\varphi^2 = \frac{nbD^2}{2a\sigma^2} \qquad (1)$$

Donde:

- n = número de probetas, (Confiabilidad del diseño experimental).
- a = número de variables factor (a), tomamos como variable el tiempo, por lo tanto, tomamos el valor de 3.
- b = número de variables factor (b), tomamos como variable la temperatura, por lo tanto, tomamos el valor de 3.
- D = diferencia de las medias, podemos hallar el valor D con la siguiente ecuación $D = 3\sigma$
- σ^2 = desviación estándar
- φ^2 = Es la diferencia especificada entre las medias de 2 tratamientos

Para este tipo de diseño sus grados de libertad son:

- Grados de libertad V_1= a-1
- Grados de libertad V_2=ab(n-1)

La siguiente tabla muestra los factores de tiempo y temperatura

[1] Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. 2da edición Balderas 95, México, D.F. Universidad Estatal de Arizona. 648

Tabla 1 Factores de tiempo y temperatura

Tiempos de revenido [min]	Temperaturas de Revenido [°C]		
10	550	600	650
20	550	600	650
30	550	600	650

Fuente: Autores

Se hallaron la diferencia de las medias D y la desviación estándar a σ^2 de dureza para el acero SAE 1045 realizando pruebas de dureza a las probetas de acero AISI SAE 1045 en estado de suministro

Tabla 2 Valores estadísticos de ensayo de dureza material de suministro

Dureza estado de suministro [HRB]	Diferencias	Diferencias	Varianza	Desviación estándar
87	-1,16	1,3456		
88,8	0,64	0,4096		
88,9	0,74	0,5476		
87,5	-0,66	0,4356		
89,5	1,34	1,7956		
89,2	1,04	1,0816		
87,6	-0,56	0,3136		
86,9	-1,26	1,5876	1,412571	1,188516
89,5	1,34	1,7956		
85,5	-2,66	7,0756		
88,8	0,64	0,4096		
87,4	-0,76	0,5776		
88,7	0,54	0,2916		
87,6	-0,56	0,3136		
89,5	1,34	1,7956		

Fuente: Autores

La selección de la confiabilidad del sistema α equivaler a 0,05 (5%) ya que es la elección más utilizada y adecuado para hallar la probabilidad de aceptación de esta manera la diferencia media queda definida de la siguiente manera :

$$D = 3\sigma \qquad (2)$$

D=3*(1,090119)
D= 3,27057243

De esta manera la ecuación 1 queda de la siguiente manera:

$$\varphi^2 = \frac{n * 3 * (3{,}27057243)^2}{2 * 3 * 1{,}188516}$$
$$\varphi^2 = 4{,}5n$$
$$\varphi = 2{,}121$$

Teniendo el valor de φ se debe hallar los grados de libertad V_1 y V_2 Tomando la tabla 3, para el modelo factorial de efectos fijos, factor A esto con el fin de seleccionar la adecuadamente la curva de operación característica.

Tabla 3 Relación del factor A con Φ y grados de libertad

Factor	Φ	V_1	V_2
A	$\frac{bn\sum_{i=1}^{a}\tau^2}{a\sigma^2}$	a-1	Ab(n-1)

Fuente: Fuente: Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. 2da edición.

Con todas las variables halladas, se selecciona la curva característica de operación adecuada, del texto Diseño y análisis de experimentos

Tabla 4 Relación entre n y la probabilidad de acierto

n	φ	φ^2	a	b	σ	σ^2	D	V1	V2	β	Probabilidad de acierto (1-B)*100 [%]
1	1,7320	3							1	0,77	23
2	2,4494	6	3	3	1,090	1,188	3,565	2	9	0,056	94,35
3	3	9							18	0,016	98,4

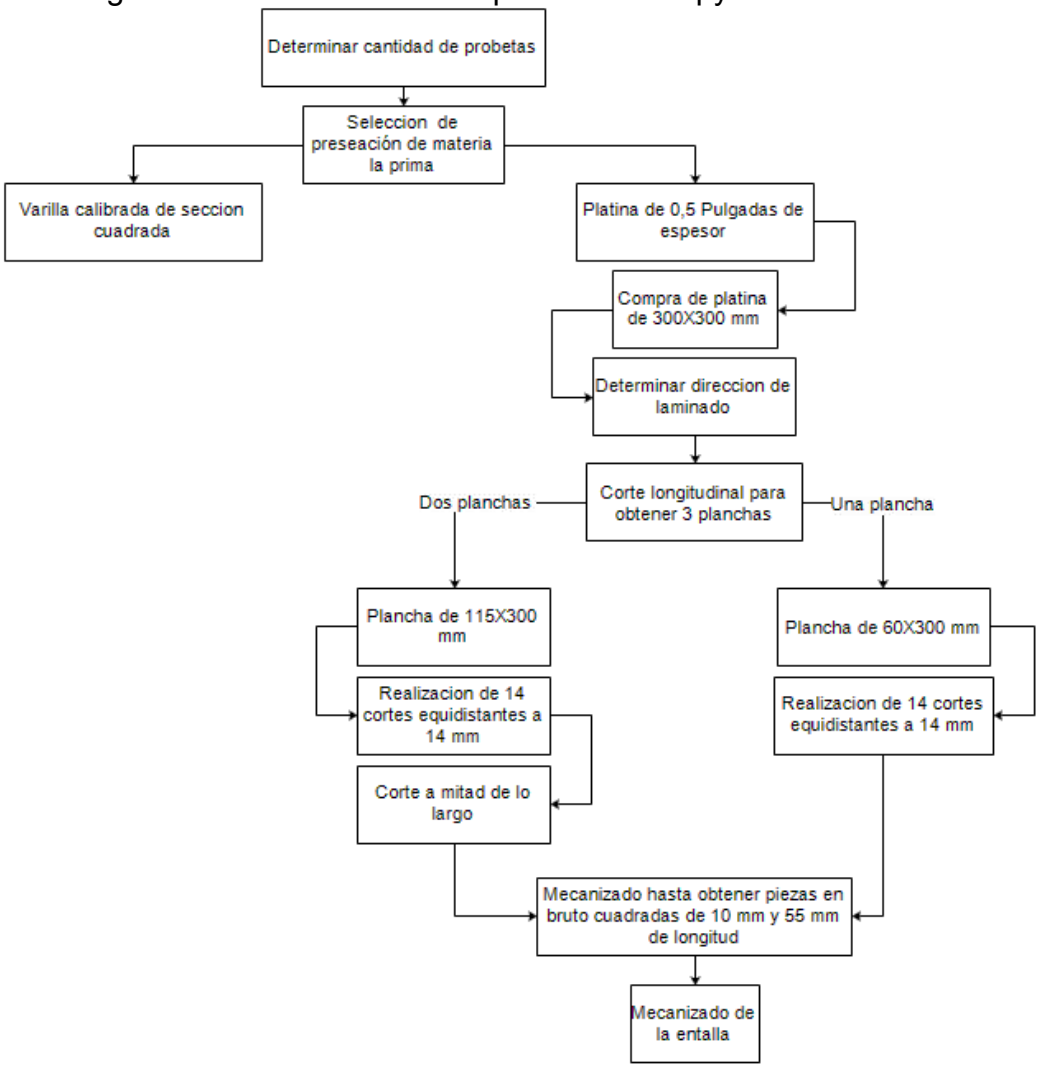
Fuente: autores

Se obtiene que por medio de las curvas de operación características que si n=3 los grados de libertad del V1= 2 y V2= 18, un α= 0,05 interceptándose con un ϕ=2 se obtiene un riesgo de cerca de 0,01 o una probabilidad aproximada de 98%, por tanto, para esta prueba la probabilidad es aceptable y se obtiene una mayor confiabilidad. Por tanto, se requieren un mínimo de 3 probetas por tratamiento para este proyecto en total se usaron 63 probetas.

5.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS PARA REALIZAR ENSAYO DE IMPACTO

Después de determinar el número de probetas a fabricar se procedió a establecer la presentación y tamaño de la materia prima, para la fabricación de la probetas de impacto se encuentran comercialmente dos opciones, la primera es varilla cuadrada de sección cuadrada, y la segunda es platinas de media pulgada de espesor se concluyó que la mejor opción comercial disponible era la segunda opción principalmente por su costo y disponibilidad de proveedores se determinó que el tamaño de esta platina debía ser de 30X30 centímetros, se seleccionó como proveedor de esta platina a la *COMPAÑÍA GENERAL DE ACEROS S.A*, el proceso de fabricación de las probetas se muestra en el siguiente esquema

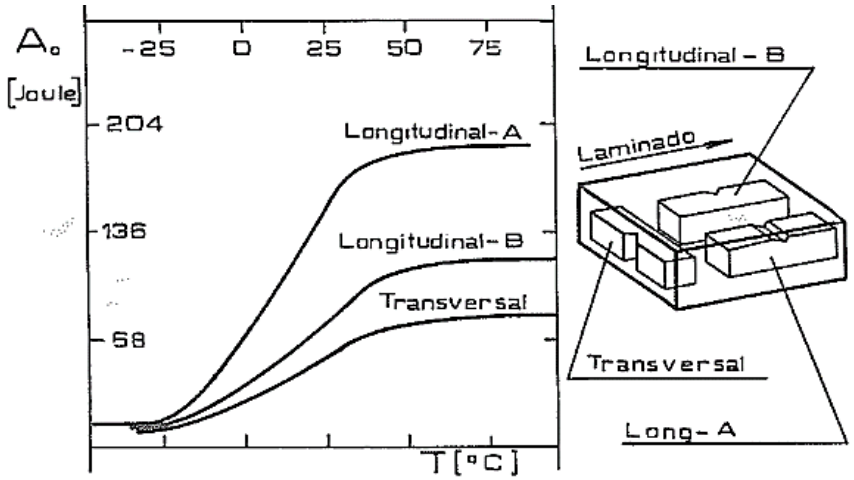
Figura 3 Diagrama de fabricacion de la probetas Charpy



Fuente: Autores

Para determinar la dirección de corte se tomó de la platina una muestra cuadrada de 2 centímetros, se pulió y atacaron dos de sus caras enfrentadas a 90°, Antonio Gonzales y Carlos Gonzales muestran que el valor de energía máxima absorbida depende de la dirección que tiene la entalla respecto a la dirección de laminado[2] siendo la dirección Longitudinal-B la que optimiza la energía absorbida esto se observa en la figura 3

Figura 4 Influencia de la dirección de laminado sobre la energía absorbida



Fuente: Gonzales A, Gonzales C. *LABORATORIOS DE ENSAYOS INDUSTRIALES*. 14th ed. Buenos Aires,Argentina: Ediciones Litenia; 1999.

Después de determinar la dirección de laminación se realizaron dos cortes quedando finalmente con tres tiras de material dos de 115X300 mm y una de 60X300 mm estos cortes se efectuaron en una sierra automática GZS 402NA de forma lenta con refrigerante para que el aumento de la temperatura producido por el proceso de corte no afectara al material, Las tres tiras se juntaron y se realizaron 14 cortes equidistantes a 14 mm con la misma sierra automática quedando con 28 piezas de 115x14 mm que se cortaron a la mitad quedando finalmente con 56 piezas de 57X14 mm y 14 de 60x14 mm, algunas partes del proceso de cortes explicada se observa en la siguiente figura

[2] Gonzales, A., & Gonzales, C. (1999). LABORATORIOS DE ENSAYOS INDUSTRIALES (14th ed.). Buenos Aires,Argentina: Ediciones Litenia. 283

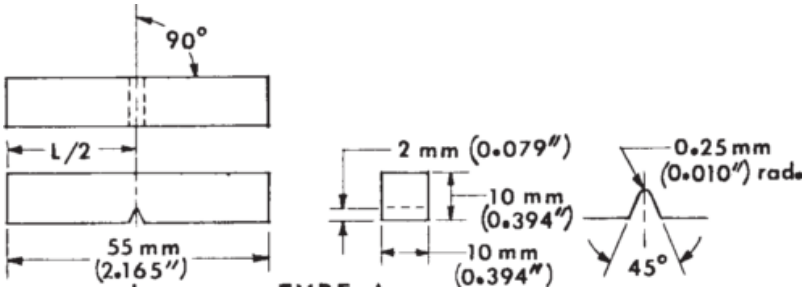
Figura 5 Proceso de Corte realizado en la sierra automatizada GZS 402NA



Fuente: Autores

Los trozos resultantes del corte fueron mecanizados en una fresadora XZX7550CW hasta obtener piezas en bruto de sección cuadrada de 10 mm y 55 mm de longitud, y la entalla de pieza se realizó en la misma máquina, los parámetros geométricos de las probetas para el ensayo de impacto según la norma ASTM E23[3] se observan en la siguiente figura

Figura 6 Características geométricas de la probeta para el ensayo charpy medidas en mm

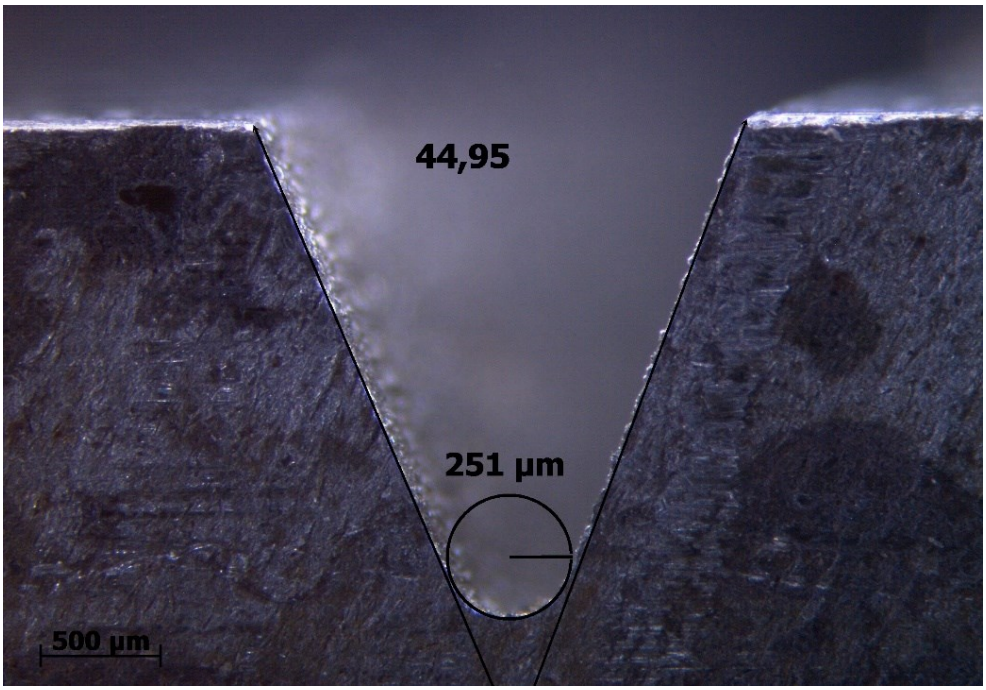


Fuente: Norma ASTM E-23

[3] ASTM International. (2013). Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Astm (Vol. I).

Después de mecanizadas las 63 probetas, se seleccionaron muestras al azar y se verifico las dimensiones de la entalla tomando imágenes con un estereoscopio Discovery V8 y procesándolas en el software AxioVision 4.8, las probetas mecanizadas cumplían con las características exigidas en la norma como se observa en la siguiente imagen

Figura 7 Entalla de probeta Charpy fabricada



Fuente: Autores

5.3 SECUENCIA DE TRATAMIENTO

Para determinar las temperaturas intercríticas (AC_1 y AC_3) del material a analizar en este caso AISI SAE 1045, es necesario conocer de forma exacta la composición química del material puesto que estas temperaturas están en función de dicha composición, Para definir la composición exacta se realizó un ensayo de Espectrometría de masa, en el Espectrómetro UV-Vis-NIR perteneciente al laboratorio de física de la Universidad Nacional de Colombia, la composición del material se observa en la siguiente tabla

Tabla 5 Composición Química del acero AISI SAE 1045

Elemento Químico	Porcentaje (%)
Fe	98,316
Si	0,268
Mo	0,012
Al	0,044
C	0,451
Cu	0,024
W	0,005
Nb	0,002
Mn	0,773
Ni	0,024
Co	0,005
B	0,002
P	0,02
Cr	0,041
Ti	0
Pl	0,008
S	0,006
V	0,002
Sn	0,002
Mg	0
N	0

Fuente: Autores

Se calcularon las temperaturas intercríticas según la teoría de Kasatkin[4] que se muestran a continuación

AC_1= 723 – 7,08 Mn + 37,7 Si + 18,1 Cr + 44,2 Mo + 8,95 Ni + 50,1 V + 21,7 Al + 3,18 W + 297 S – 830 N – 11,5 C Si – 14,0 Mn Si – 3,10 Si Cr – 57,9 C Mo – 15,5 Mn Mo – 5,28 C Ni – 6,0 Mn Si + 6,77 Si Ni – 0,80 Cr Ni – 27,4 C V + 30,8 Mo V – 0,84 Cr^2 - 3,46 Mo^2 - 0,46 Ni^2 - 28V^2 (3)

AC_3= 912 – 370 C – 27,4 Mn + 27,3 Si – 6,35 Cr – 32,7 Ni + 95,2 V + 190 Ti + 72,0 Al + 64,5 Nb + 5,57 W + 332 S + 276 P + 485 N – 900 B + 16,2 C Mn + 32,3 C Si + 15,4 C Cr + 48,0 C Ni + 4,32 Si Cr – 17,3 Si Mo – 18,6 Si Ni + 4,80 Mn Ni + 40,5 Mo V + 174 C^2 + 2,46 Mn^2 - 6,86 Si^2 + 0,322 Cr^2 + 9,90 Mo^2 + 1,24 Ni^2 - 60,2 V^2 (4)

[4] Gorni, A. A. (2012). Steel Forming and Heat Treating Handbook. são vicente, Brasil. 8.

Resultando que las temperaturas intercríticas son AC_1=727,03°C y AC_3=786,16°C, con estas temperaturas se decidió hacer dos temples en agua uno a 740°C y otro a 770°C, cada uno con una duración estimada de 15 minutos, estos temples fueron realizados en una mufla eléctrica LABTECH/LEF-P TYPE como se aprecia en la siguiente imagen. Para llegar de temperatura atmosférica a la temperatura requerida la mufla tardaba en promedio 30 minutos.

Figura 8 Disposición de las probetas para la realización de los temples



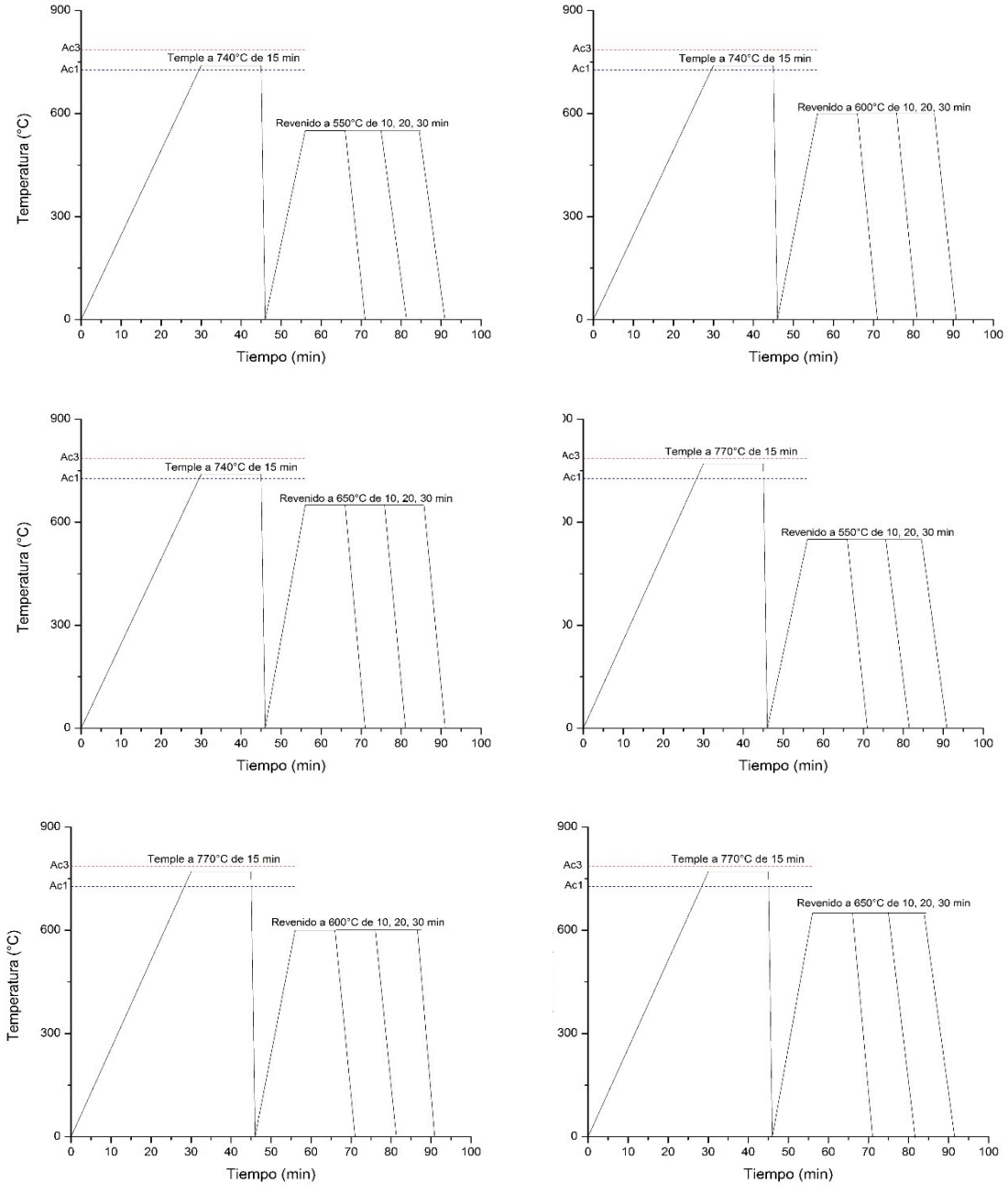
Fuente: Autores

Se decidió realizar revenidos a altas temperaturas, puesto que a este tipo de acero ya se le han realizado numerosos estudios, utilizando temperaturas medias y bajas, para este caso se decidió realizar revenidos por encima de 550°C, puesto que la transformación bainítica comienza a partir de esta temperatura, según se muestra en la siguiente ecuación:

$B_s = 830 – 270C – 90Mn – 35Si – 37 Ni – 70Cr – 83 Mo = 551,3°C$ (6)

A continuación, se muestra gráficamente la serie de tratamientos realizados:

Figura 9 Secuencias de tratamientos realizados



Fuente: Autores

5.4 ENSAYO DE DUREZA E IMPACTO

Después de realizados los tratamientos, se procedió a efectuar el ensayo de durezas siguiendo la norma ASTM E18[5], tomando cinco indentaciones por muestra con un durómetro GNEHM SWISS ROCK - 160DP, mostrado a continuación:

Figura 10 Prueba de dureza en escalas HRB y HRC



Fuente: Autores

Dando como resultado durezas en escala rockwell B Y rockwell C, para trabajar una sola escala y poder comparar los resultados de forma más eficiente, se convirtieron estas durezas a escala Vickers, según la norma ASTM E 140[6]

Para las pruebas Charpy, también denominadas pruebas de impacto se utilizó un péndulo Charpy Satec SI-1A el equipo utilizado se muestra en la figura 11, este

[5] ASTM International. (1981). Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of. Astm (Vol. 1).
[6] ASTM International. (2007). Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, and scleroscope hardness Astm (Vol. 1).

péndulo utiliza una masa del martillo de 13,333 Lb, cumpliendo la norma ASTM E 23.

Figura 11 Realización de pruebas de impacto



Fuente: Autores

Después de realizar el ensayo de impacto, se utilizó el estereoscopio Discovery V8, para observar la ruptura de las diferentes probetas.

5.5 PREPARACIÓN DE PROBETAS Y TOMA DE MICROGRAFIAS

Se seleccionaron muestras de cada tratamiento térmico realizado, se preparó cada probeta según la norma ASTM E 3[7] siguiendo el siguiente procedimiento:

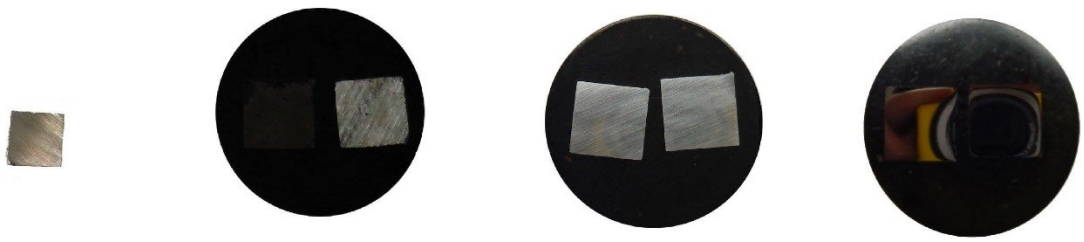
- Corte del material: Este corte se realizó en una cortadora abrasiva manual de METKON / METACUT 250, el resultado final de cada probeta fueron perfiles cuadrados de 10mm y con espesor que oscilaba entre los 5mm y 8 mm.

[7] ASTM International. (2011). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. Astm (Vol. 1)

- Encapsular: Para optimizar los recursos del laboratorio se colocaron dos muestras por capsula, en la prensa de montaje automático METKON ECOPRESS 50. Cada capsula tiene un diámetro de 30mm y una altura que varía de 10mm a 16mm.
- Lijado: Se desbasto cada capsula en lijadoras manuales usando lijas de 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000.
- Pulido: Se empleó el sistema de esmerilado y pulido METKON FORCIPOL 2V, en este equipo se utilizó algodón perchado y alúmina, para obtener el material con acabado lapeado.

A continuación, se muestra de izquierda a derecha los resultados finales de los procesos mencionados.

Figura 12 Resultados finales de cada proceso de preparación de las probetas



Fuente: Autores

Finalmente, todas las probetas fueron atacadas químicamente con 95% de alcohol etílico y 5% de ácido nítrico. Se utilizó el microscopio AXIO OBSERVER D1M para tomar micrografías a las probetas ya atacadas en aumentos de 200x, 500x y 1000x.

Después de tener las micrografías de cada probeta, se realizó una microscopia óptica de barrido (MEB) en el equipo Tescam Vega 3 SB perteneciente a los laboratorios de física de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.

6. RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS REALIZADOS

En este apartado se mostrarán los resultados de cada prueba realizada en el material y se dará una descripción de los factores ocurridos en cada ensayo.

6.1 DUREZAS

Los resultados obtenidos en el ensayo de dureza para cada probeta, fueron variando de acorde al tratamiento aplicado y a los tiempos de revenido, en la siguiente tabla se muestran los resultados promedios de cada uno de ellos.

6.1.1 Durezas del Material Base y Temples

Por serie de tratamientos se tomaron 15 durezas en total (cinco por cada probeta de impacto fabricada para la serie de tratamiento). En la siguiente tabla se muestran los resultados promedios:

Tabla 6 Dureza promedio del material base y temples

Tratamiento Térmico	Dureza Rockwell	Dureza Vickers [HV]
Material Base	88,16 HRB	176 HV
Material Tratado desde 740°C	21,59 HRC	246 HV
Material Tratado desde 770°C	54,23 HRC	580 HV

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados obtenidos por el durómetro, se puede observar que el material tratado térmicamente desde 770°C es el que opone mayor resistencia al ser penetrado, con un promedio de dureza total de 580HV, lo que era de esperarse ya que la temperatura de austenización que se aplica al material es la más alta produciendo un mayor porcentaje de martensita. En cuanto al material base la dureza adquirida es estándar y está entre los rangos establecidos por nuestro distribuidor (Cía. General de Aceros S.A.), por último, el material tratado térmicamente desde 740°C muestra resultados de dureza acordes a la temperatura de austenización aplicada, los 246HV alcanzados demuestran que la formación de martensita es menos dispersa que en la de 770°C.

6.1.2 Dureza de revenidos realizados al temple desde 740°C

Por serie de tratamientos se tomaron 15 durezas en total (cinco por cada probeta de impacto fabricada para la serie de revenido). En la siguiente tabla se muestran los resultados promedios

Tabla 7 Dureza promedio de los revenidos realizados al temple desde 740°C

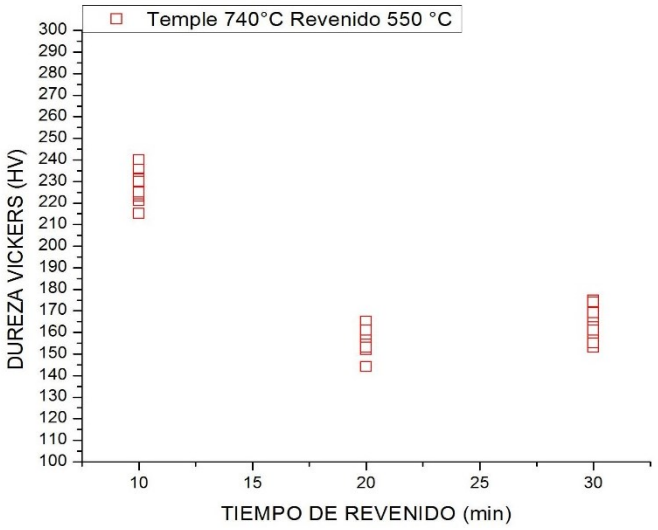
Temperatura de revenido [°C]	Tiempo [min]	Dureza Rocwell	Dureza Vickers [HV]
	10	97	227,2
550	20	83,6	158,2
	30	85,7	166,5
	10	97,6	231,8
600	20	82	153,3
	30	83,8	157,5
	10	93,2	200,6
650	20	82,6	154,8
	30	81,2	150,8

Fuente: Autores

Como se observa en la tabla, para los revenidos de 550°C y 600°C se evidencia un comportamiento similar en las durezas para el tiempo de 10 minutos con un rango aproximado de 229,5 HV, caso diferente para el revenido de 650°C donde la dureza decrece en un 14%. Para los tiempos de 20 y 30 minutos en cada revenido no se percibe una variación significativa, se podria decir que se mantienen constantes para cada uno.

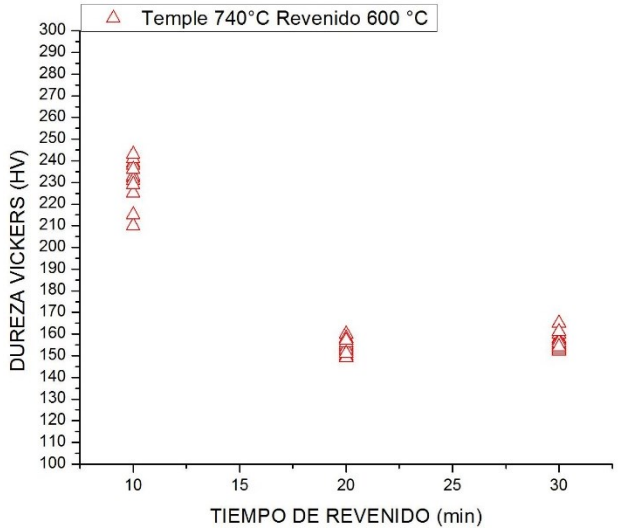
A continuacion se presentan las graficas de los revenidos realizados a las probetas templadas desde 740°C, donde se observa de forma mas clara los comportamientos descritos.

Figura 13 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 550 °C para el material templado desde 740 °C



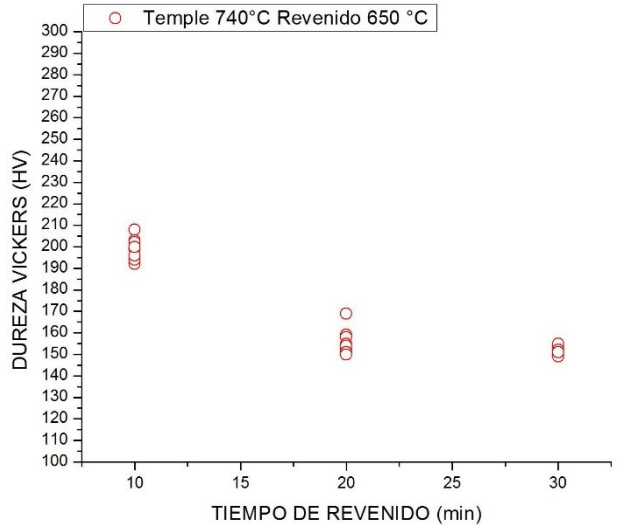
Fuente: Autores

Figura 14 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 600 °C para el material templado desde 740 °C



Fuente: Autores

Figura 15 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 650 °C para el material templado desde 740 °C



Fuente: Autores

6.1.3 Dureza de revenidos realizados al temple desde 770°C

Por serie de tratamientos se tomaron 15 durezas en total (cinco por cada probeta de impacto fabricada para la serie de revenido). En la siguiente tabla se muestran los resultados promedios:

Tabla 8 Dureza promedio de los revenidos realizados al temple desde 770°C

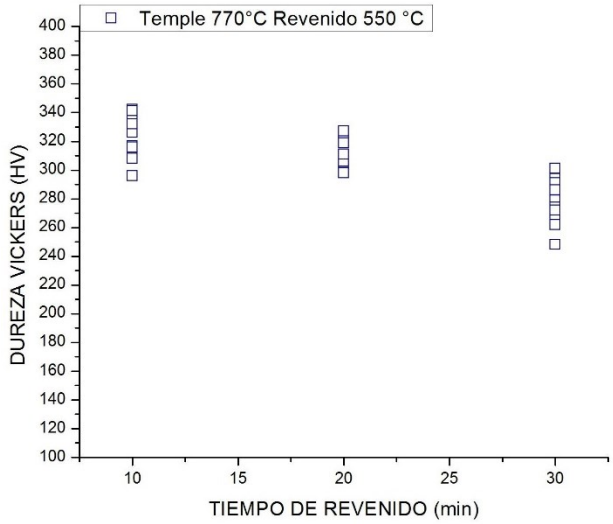
Temperatura de revenido [°C]	Tiempo [min]	Dureza Rocwell	Dureza Vickers [HV]
	10	33	327,6
550	20	31	320
	30	27	278,5
	10	24	263,6
600	20	24	263,1
	30	21	242,6
	10	23	257,3
650	20	24	258,4
	30	21	244,3

Fuente: Autores

Según los resultados obtenidos en la tabla, observamos que para el revenido de 550°C, en los tiempos de 10 y 20 minutos no se evidencia ninguna variación y se mantiene constante hasta los 30 minutos decreciendo un 8%, este comportamiento se presenta de forma similar para los revenidos de 600°C y de 650°C.

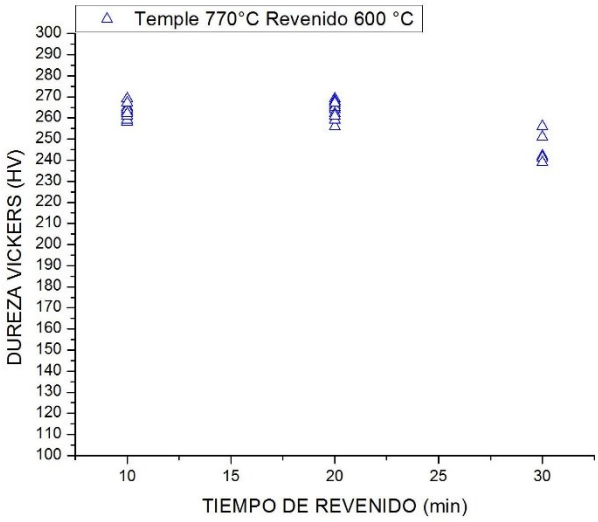
A continuación se presentan las graficas de los revenidos realizados a las probetas templadas a 770°C, donde se observa de forma mas clara los comportamientos descritos.

Figura 16 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 550 °C para el material templado desde 770 °C



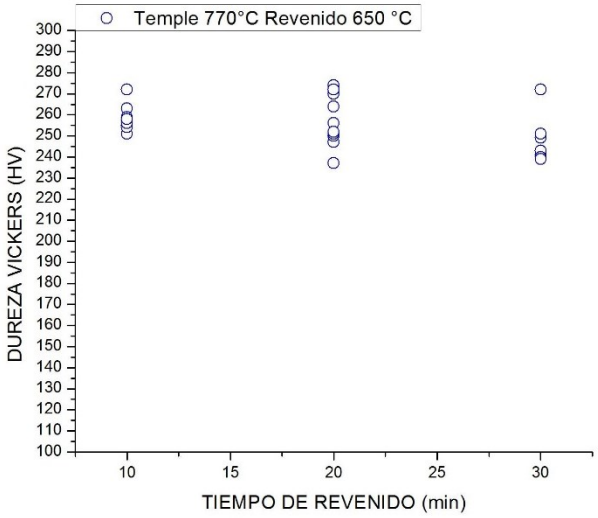
Fuente: Autores

Figura 17 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 600 °C para el material templado desde 770 °C



Fuente: Autores

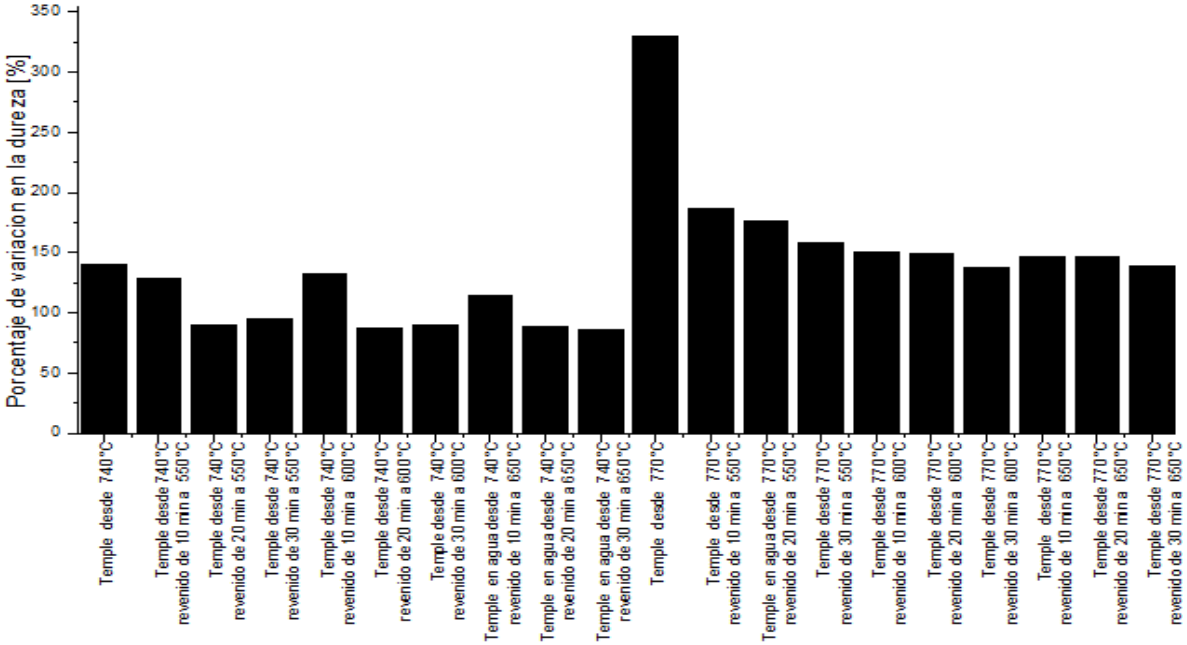
Figura 18 Resultado del ensayo de dureza Vs Tiempo de revenido a 650 °C para el material templado desde 770 °C



Fuente: Autores

La variación porcentual de la dureza según cada tratamiento térmico realizado se observa en la figura 19

Figura 19 Porcentaje de variación en la dureza



Fuente: Autores

6.2 IMPACTO

Los resultados obtenidos en el ensayo Charpy para cada probeta, fueron variando de acorde al tratamiento aplicado y al revenido, en la siguiente tabla se muestran los resultados promedios de cada uno de ellos:

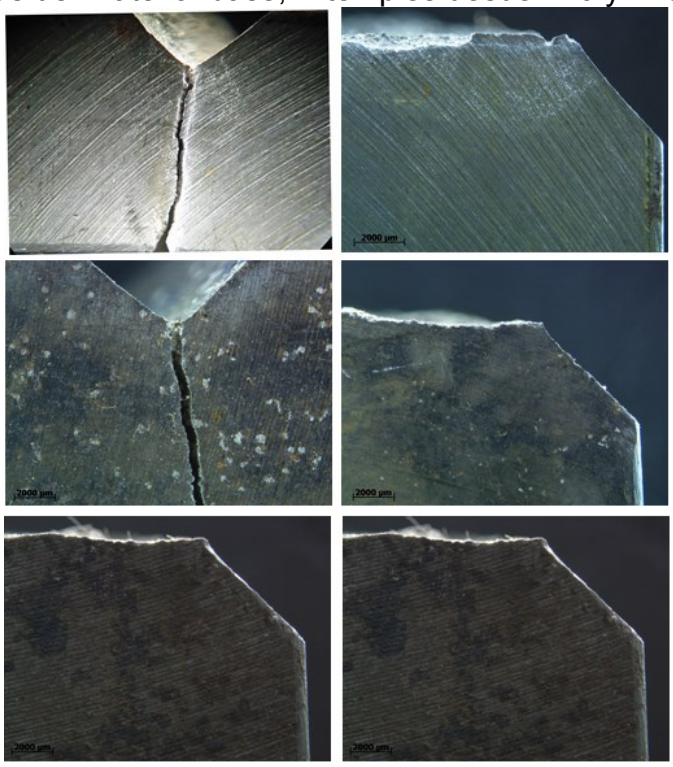
Tabla 9 Energía Absorbida promedio del material base y temples

Tratamiento Térmico	Energía Absorbida [J]
Material Base	26,79
Material templado desde 740°C	3,15
Material templado desde 770°C	5,52

Fuente: Autores

Tomando como punto de referencia el material normalizado, podemos observar que el material al ser templado se fragilizo puesto que tuvo un aumento considerable en la dureza. A continuación, se muestra la imagen en orden descendente las fracturas de las probetas del material base, temple desde 740°C y temple a 770°C:

Figura 20 Rupturas del material base, Y temples desde 740 y 770 °C



Fuente: Autores

En la imagen se observa que el material base es más resistente y por lo consiguiente dúctil, este obtiene una ruptura dúctil y se aprecia en la imagen con pequeñas crestas; a diferencia del material templado por estar fragilizado tiene una menor resistencia al impacto y para los dos casos se evidencia un corte uniforme.

Tabla 10 Energía absorbida promedio para las probetas templadas desde 740°C y revenidas según la temperatura indicada

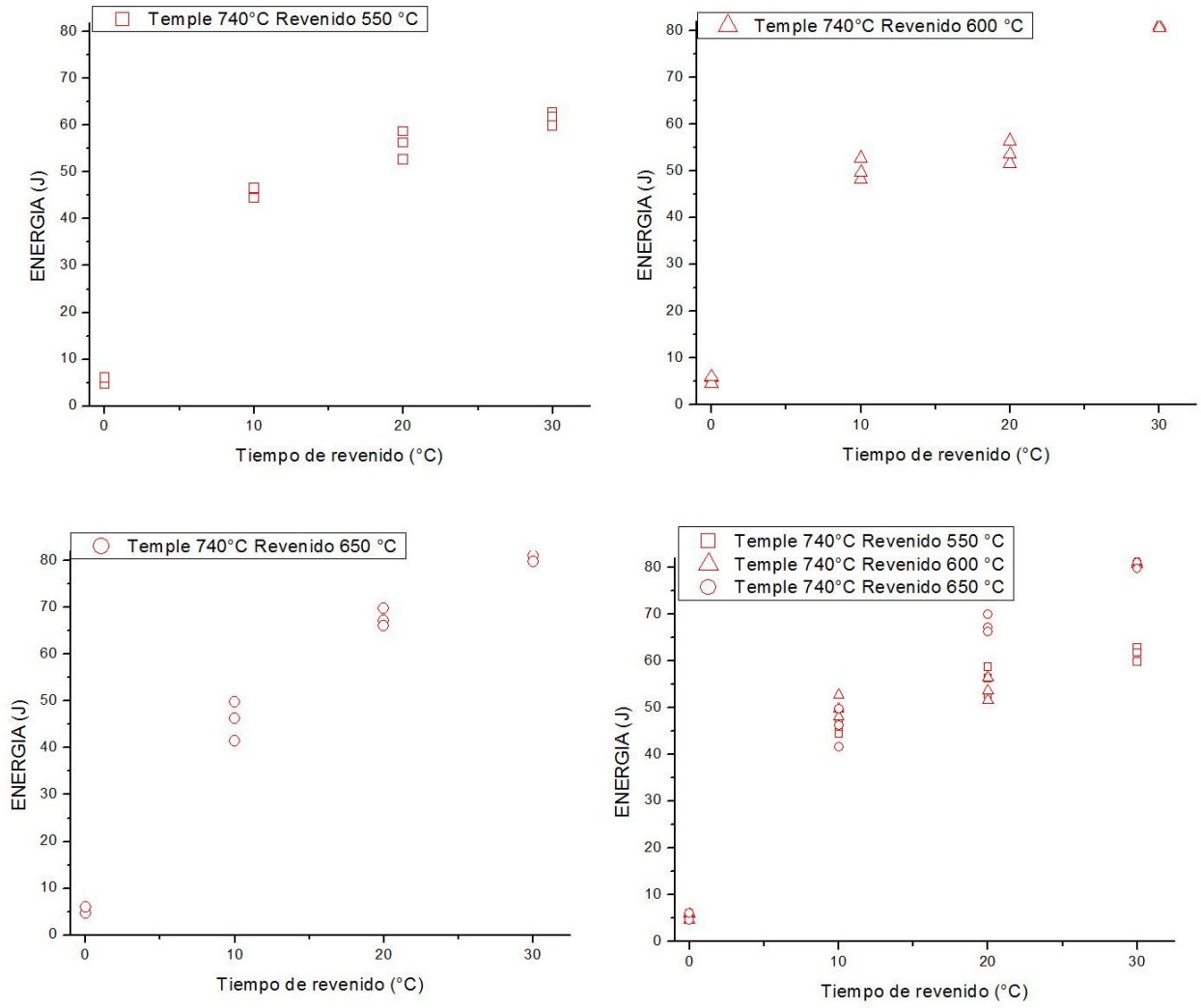
Temperatura de revenido [°C]	Tiempo [min]	Energía promedio absorbida en impacto [J]
	10	45,38
550	20	55,89
	30	61,49
	10	50,23
600	20	53,91
	30	80,91
	10	45,9
650	20	67,72
	30	80,68

Fuente: Autores

Se evidencia que el material se vuelve dúctil a medida que se incrementa el tiempo del revenido, ya que aumenta la cantidad de energía que puede absorber en el impacto para toda la serie de revenidos.

A continuación se presentan las graficas de los revenidos realizados a las probetas templadas desde 740°C, donde se observa de forma mas clara los comportamientos descritos.

Figura 21 Graficas de energía absorbida para las probetas templadas desde 740°C y revenidas a diferentes temperaturas VS tiempo de revenido



Fuente: Autores

Tabla 11 Energía Absorbida promedio para las probetas templadas desde 770°C y revenidas según la temperatura indicada

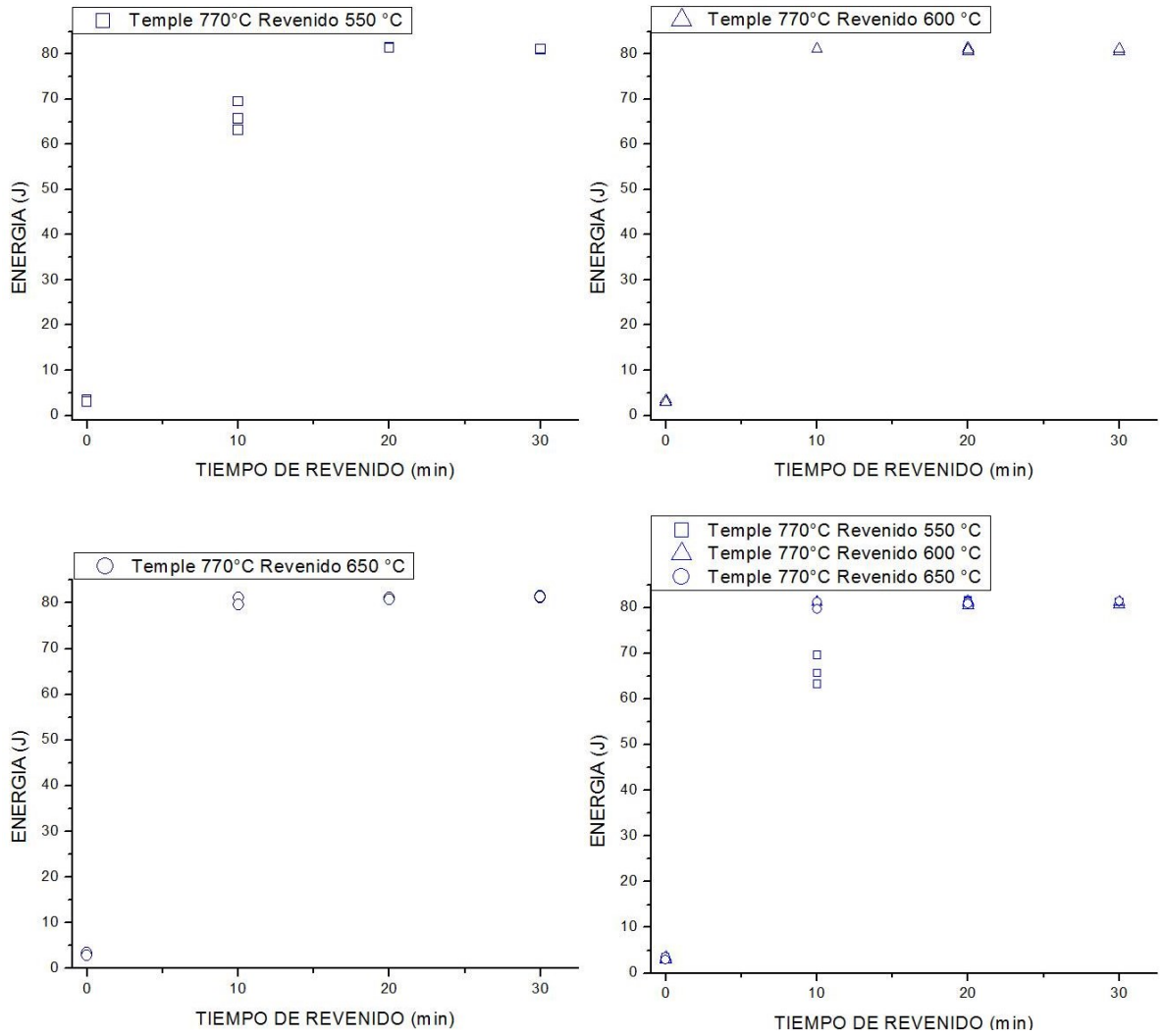
Temperatura de revenido [°C]	Tiempo [min]	Energía promedio absorbida en impacto [J]
550	10	66,17
	20	81,44
	30	81,13
600	10	81,17
	20	80,95
	30	81
650	10	80,18
	20	81
	30	81,28

Fuente: Autores

Para esta serie de tratamientos se evidencia que el material es muy dúctil y por consiguiente las probetas no logran romperse por completo, puesto que el péndulo Charpy Satec SI-1A no logra generar la energía suficiente al impacto para fracturar las muestras.

A continuación se presentan las graficas de los revenidos realizados a las probetas templadas desde 770°C, donde se observa de forma mas clara los comportamientos descritos.

Figura 22 Graficas de energía absorbida para las probetas templadas desde 770°C y revenidas a diferentes temperaturas VS tiempo de revenido

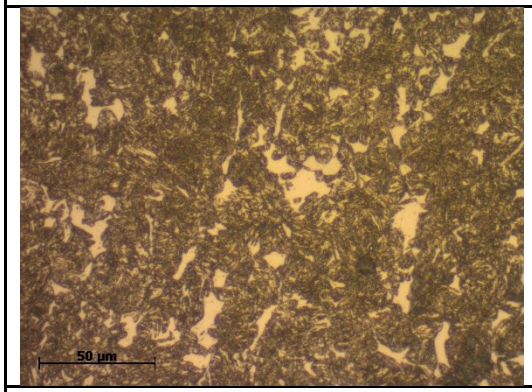
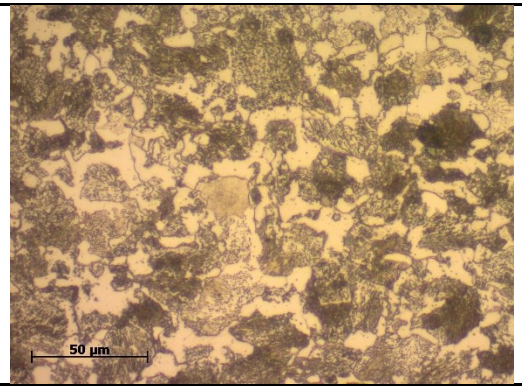
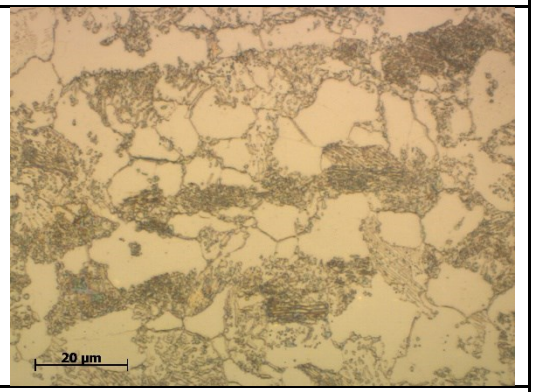
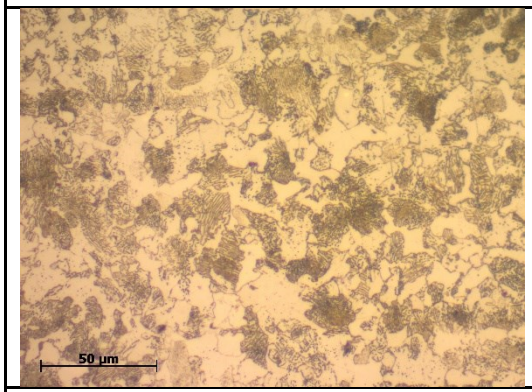
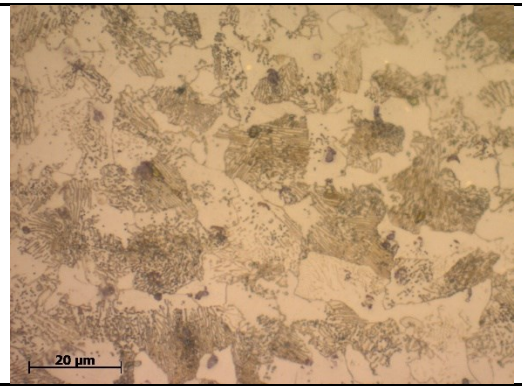
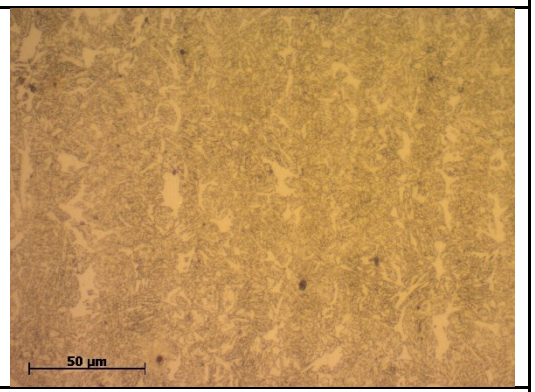


Fuente: Autores

6.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

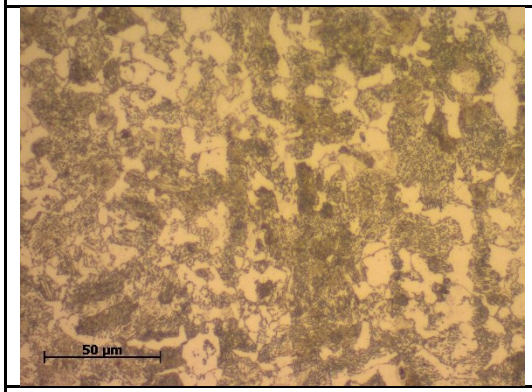
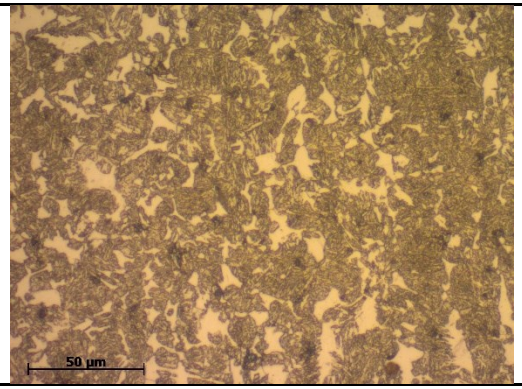
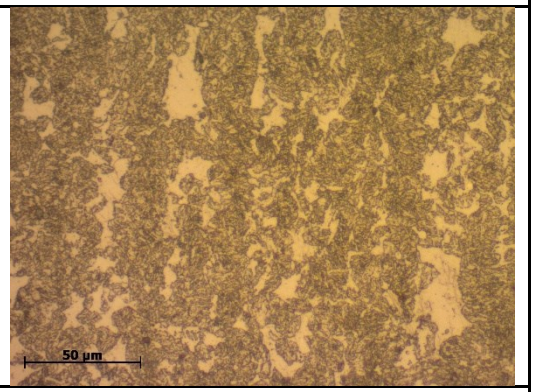
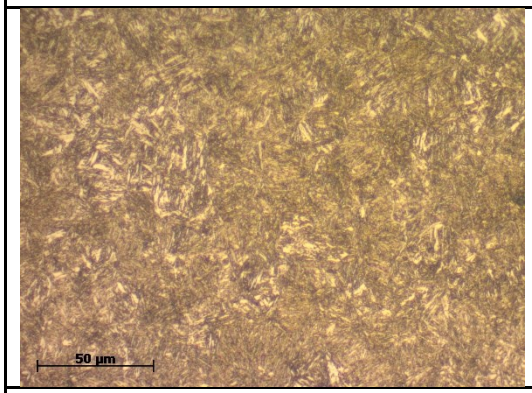
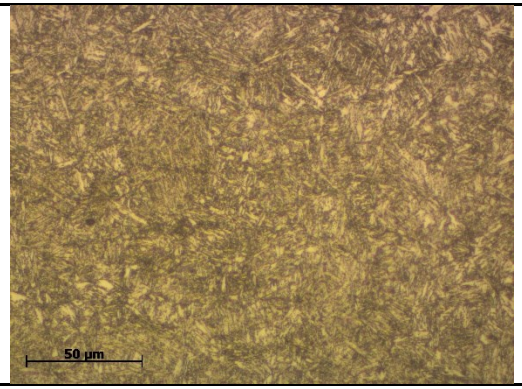
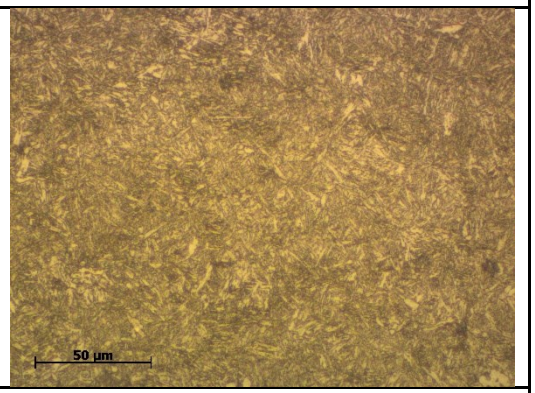
Después de tener atacadas las probetas se procedió a realizar las pruebas de microscopia óptica en un microscopio Axio observer D1M, las imágenes fueron capturadas con una cámara digital Axiocam 5M y procesadas con el software AxioVision 4,8. Se obtiene diferentes fases para cada tratamiento, en la mayoría se presenta una fase dual compuesta por las fases martensita y ferrita. A continuación, se presentan las micrografías de cada serie de tratamiento realizado

Tabla 12 Micrografías ópticas según tratamientos indicadas (series de imágenes 1)

Temple desde 740°C y Revenido de 10 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
500x	500x	1000x
Temple desde 740°C y Revenido de 20 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
500x	1000x	500x

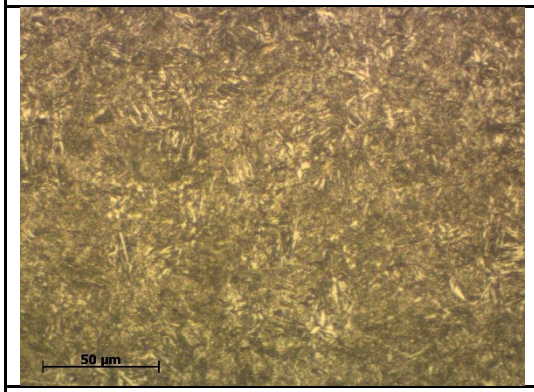
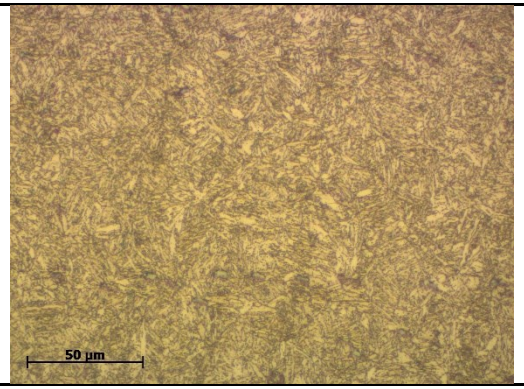
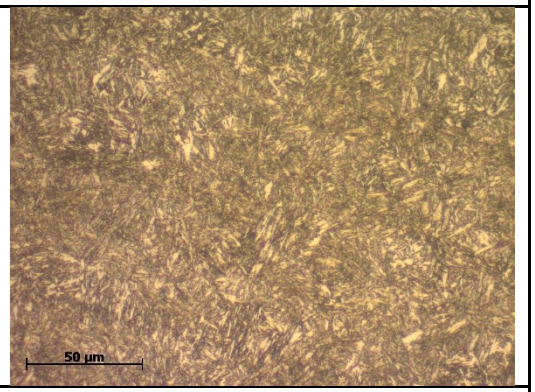
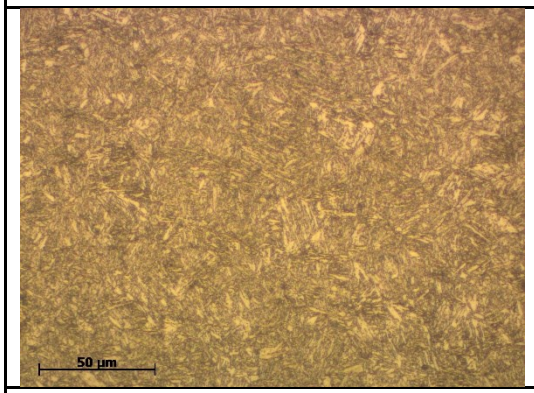
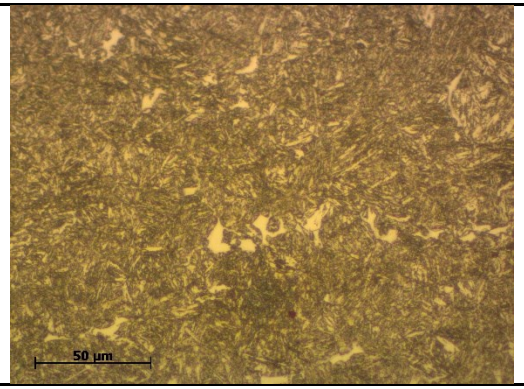
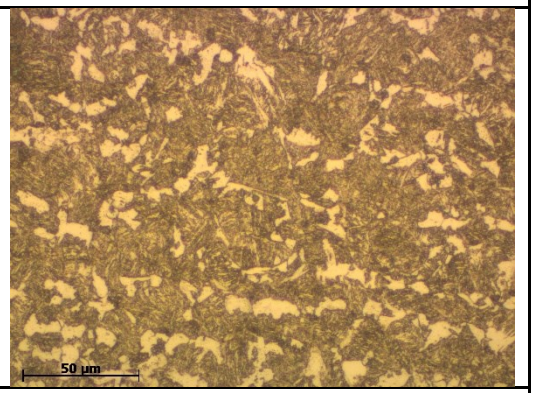
Fuente: Autores

Tabla 13 Micrografías ópticas según tratamientos indicados (serie de imágenes 2)

Temple desde 740°C y Revenido de 30 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
500x	500x	500x
Temple desde 770°C y Revenido de 10 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
500x	500x	500x

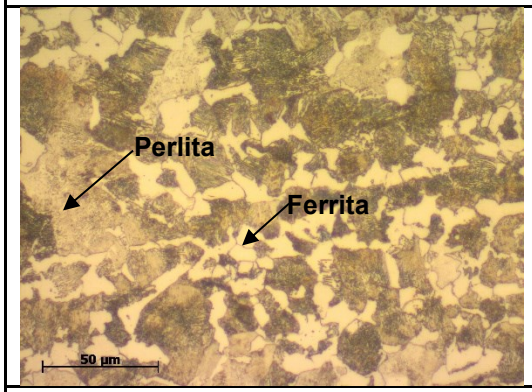
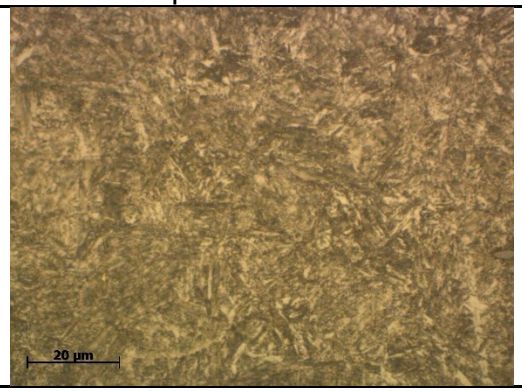
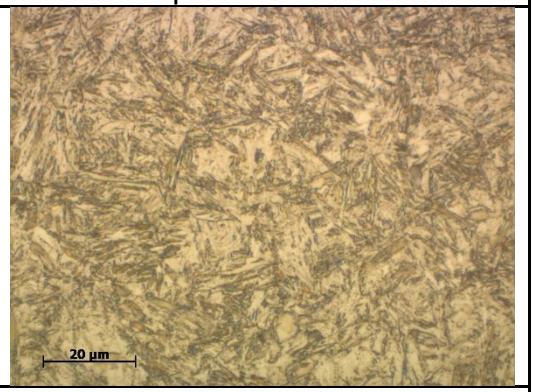
Fuente: Autores

Tabla 14 Micrografías ópticas según tratamientos indicados (serie de imágenes 3)

Temple desde 770°C y Revenido de 20 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
500x	500x	500x
Temple desde 770°C y Revenido de 30 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
500x	500x	500x

Fuente: Autores

Tabla 15 Micrografías ópticas según tratamientos indicados (serie de imágenes 4)

Tratamiento Térmico		
Material Base	Temple desde 740 °C	Temple desde 770 °C
		
500x	100x	1000x

Fuente: Autores

La micrografía del material base muestra la composición típica de un acero AISI SAE 1045, las cuales son fase perlítica y fase ferrítica, los temples desde 740 °C y 770 °C muestran fase martensítica y los revenidos realizados a los temples evidencian un aumento de la fase ferrítica a medida que se incrementa temperatura de revenido.

6.4 MICRODUREZAS

Las muestras se analizaron en el microdurómetro Shimadzu HMV-2 que cumple con la norma ASTM E384[8], se tomaron cinco indentaciones por microestructura cada probeta contiene dos fases diferenciadas, una clara y otra oscura todos los ensayos se realizaron tomando una carga de 490,3 mN (HV 0,05) y esta carga se aplicó en treinta segundos lo resultados de las microdurezas promedio se observan en la siguiente tabla

Tabla 16 Microdurezas promedio por serie de tratamiento

Tratamiento Térmico	Fase	Microdureza Vickers [HV]
Material Base	Fase oscura: Perlita	286,12
	Fase Clara: Ferrita	112,35
Temple desde 740°C	Martensita	956,56
Temple desde 740°C revenido de 10 min a 550°C	Fase oscura: Martensita	915,4
	Fase Clara: Ferrita	156,98
Temple desde 740°C revenido de 20 min a 550°C	Fase oscura: Perlita	220,15
	Fase Clara: Ferrita	120,65
Temple desde 740°C revenido de 30 min a 550°C	Fase oscura: Perlita	202,23
	Fase Clara: Ferrita	125,87
Temple desde 740°C revenido de 10 min a 600°C	Fase oscura: Perlita	250,5
	Fase Clara: Ferrita	156,45
Temple desde 740°C revenido de 20 min a 600°C	Fase oscura: Perlita	198,69
	Fase Clara: Ferrita	165,78
Temple desde 740°C revenido de 30 min a 600°C	Fase oscura: Martensita	805,56
	Fase Clara: Ferrita	195,78
Temple desde 740°C revenido de 10 min a 650°C	Fase oscura: Perlita	198,98
	Fase Clara: Ferrita	98,23
Temple desde 740°C revenido de 20 min a 650°C	Fase oscura: Martensita	807,17
	Fase Clara: Ferrita	186,19
Temple desde 740°C revenido de 30 min a 650°C	Fase oscura: Martensita	789,89
	Fase Clara: Ferrita	198,86

[8] ASTM International. (2002). Standard Thest Method for Microindentation Hardness of Materials. Astm (Vol. I).

Temple desde 770°C	Martensita	1025,65
Temple desde 770°C revenido de 10 min a 550°C	Fase oscura: Martensita	915,6
	Fase Clara: Ferrita	116,36
Temple desde 770°C revenido de 20 min a 550°C	Fase oscura: Martensita	855,14
	Fase Clara: Ferrita	146,21
Temple desde 770°C revenido de 30 min a 550°C	Fase oscura: Martensita	815,83
	Fase Clara: Ferrita	156,3
Temple desde 770°C revenido de 10 min a 600°C	Fase oscura: Martensita	996,56
	Fase Clara: Ferrita	117,23
Temple desde 770°C revenido de 20 min a 600°C	Fase oscura: Martensita	886,21
	Fase Clara: Ferrita	205,21
Temple desde 770°C revenido de 30 min a 600°C	Fase oscura: Martensita	797,25
	Fase Clara: Ferrita	216,81
Temple desde 770°C revenido de 10 min a 650°C	Fase oscura: Martensita	816,7
	Fase Clara: Ferrita	156,81
Temple desde 770°C revenido de 20 min a 650°C	Fase oscura: Martensita	806,23
	Fase Clara: Ferrita	196,71
Temple desde 770°C revenido de 30 min a 650°C	Fase oscura: Martensita	794,25
	Fase Clara: Ferrita	215,36

Fuente: Autores

En la tabla 16 se observa un comportamiento claro en el cual al incrementar el tiempo de revenido o la temperatura del mismo la fase oscura (Perlita o Martensita) se ablanda, y la fase clara incrementa su dureza esto producto del proceso de difusión de carbono que ocurre en el material en el cual, la fase con mayor cantidad de carbono cede este elemento a la fase con menor concentración lo que genera un endurecimiento.

6.5 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM)

Con base en las micrografías y los resultados obtenidos en la prueba de impacto se seleccionó un grupo de probetas para ser observado en el microscopio electrónico de barrido Tescam Vega 3 SB

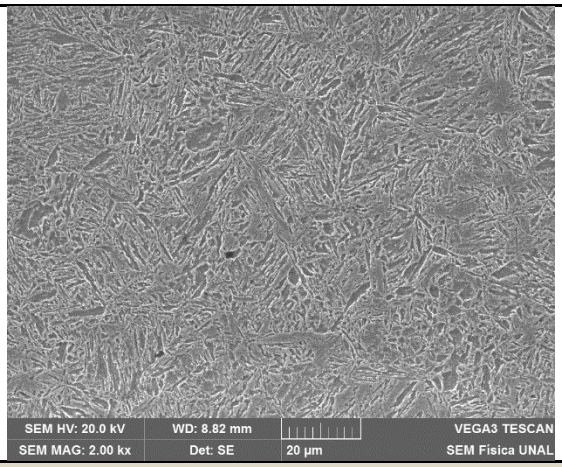
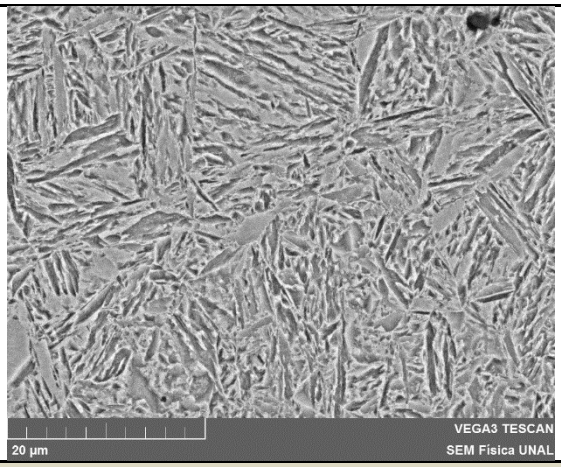
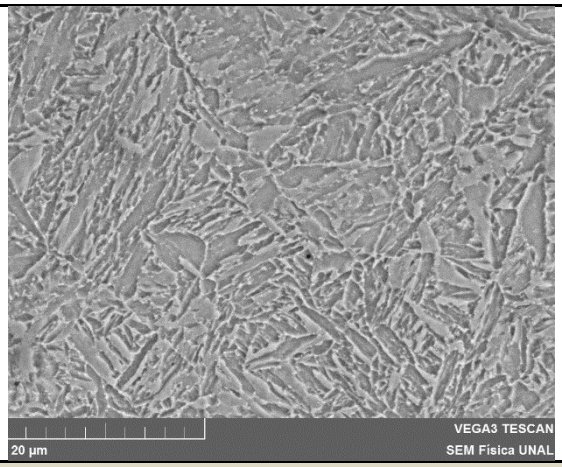
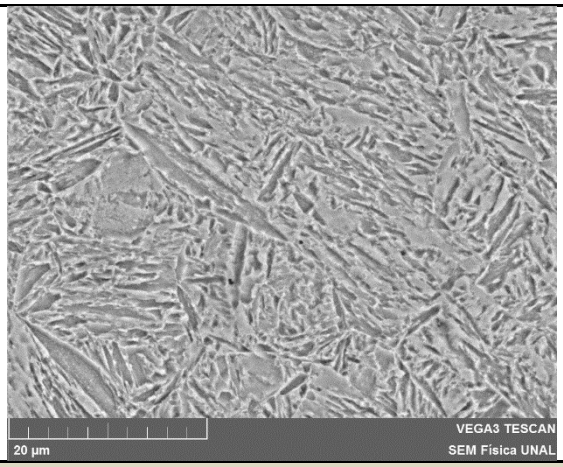
Figura 23 Microscopio electrónico de barrido Tescam Vega 3 SB

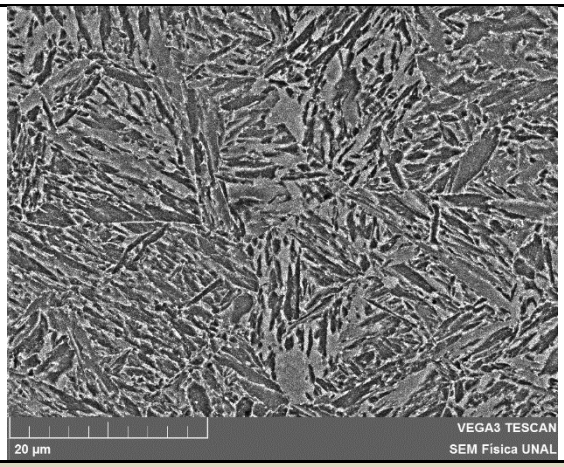


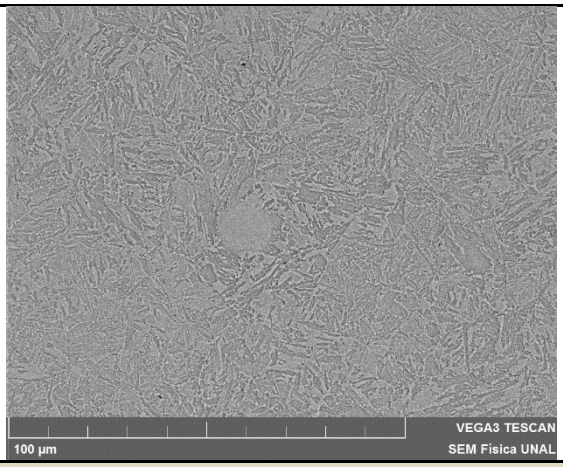
Fuente: Autores

Los resultados obtenidos del ensayo se muestran a continuación:

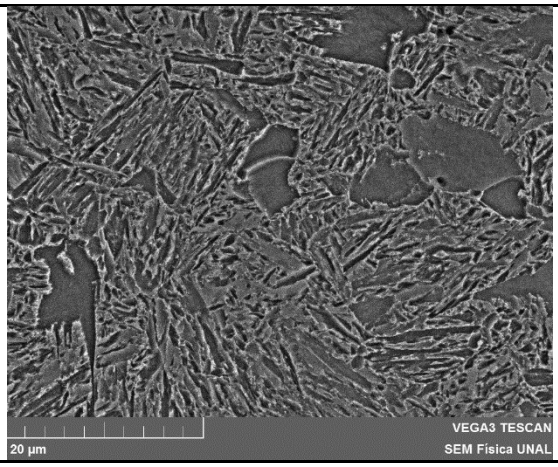
Tabla 17 Micrografías obtenidas por SEM

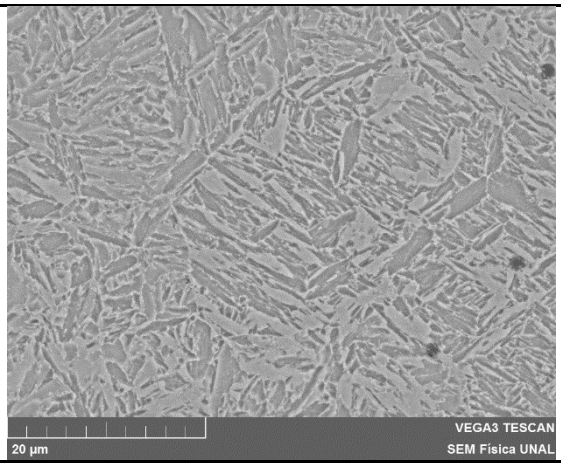
Serie de Tratamiento Térmico	
Temple desde 770°C Revenido 550°C 10 min	Temple desde 770°C Revenido 650°C 10 min
	
Serie de Tratamiento Térmico	
Temple desde 770°C Revenido 550°C 20 min	Temple desde 770°C Revenido 650°C 20 min
	
Serie de Tratamiento Térmico	
Temple desde 770°C Revenido 600°C 10 min	Temple desde 770°C Revenido 650°C 30 min





Serie de Tratamiento Térmico	
Temple desde 770°C Revenido 550°C 30 min	Temple desde 770°C Revenido 600°C 30 min

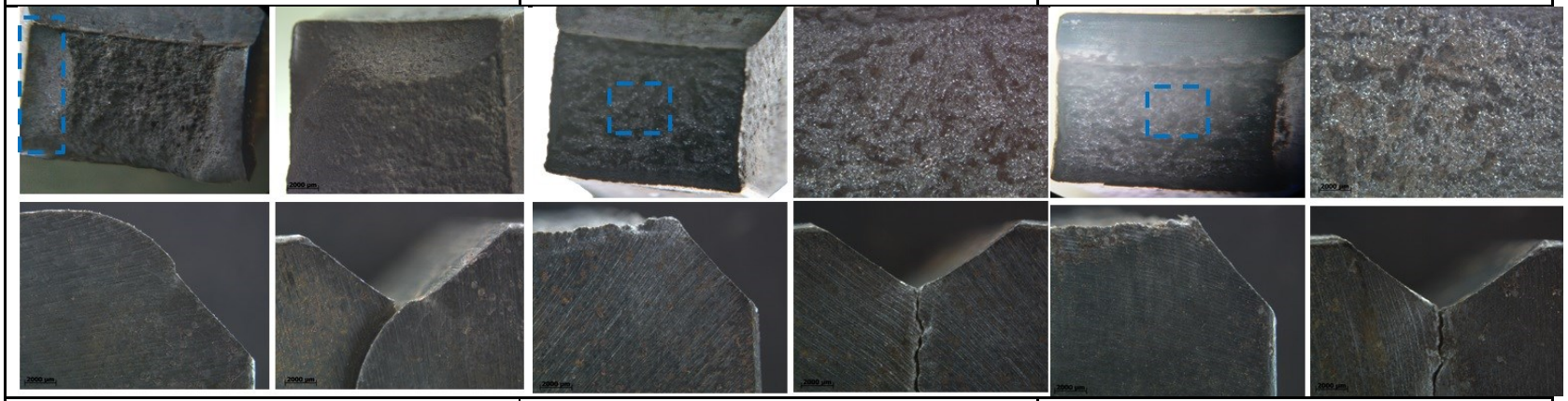
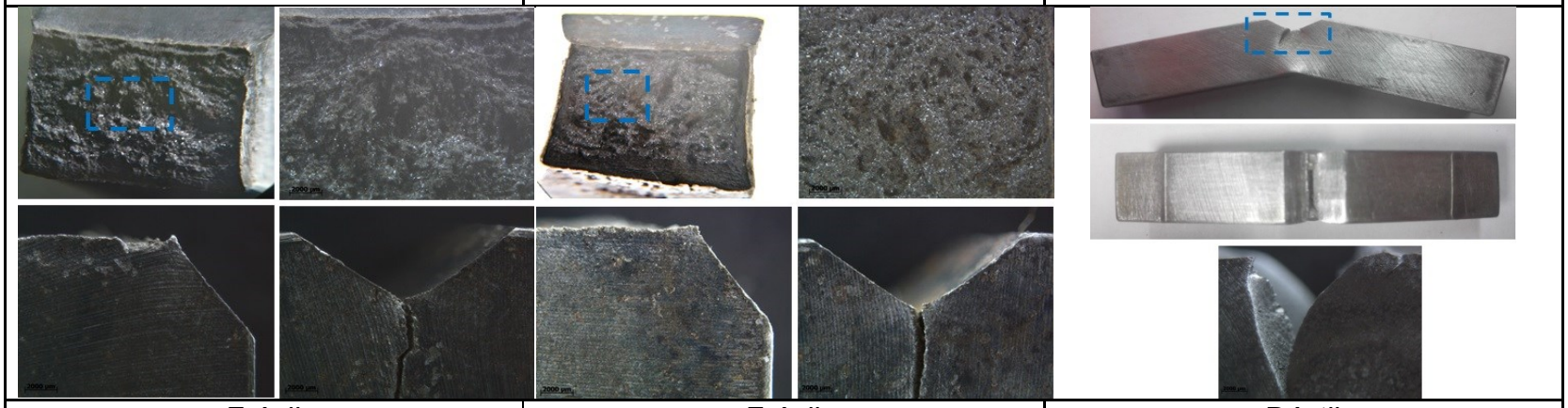




Fuente: Autores

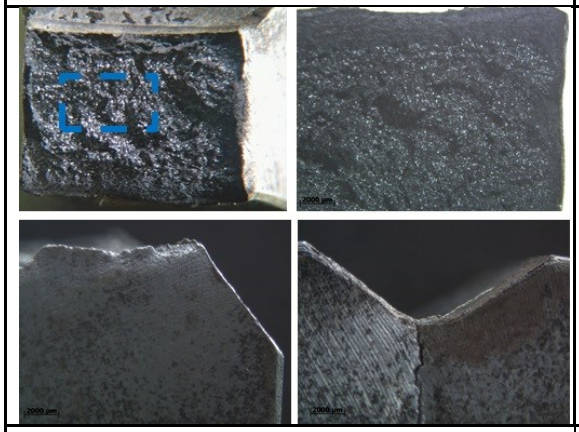
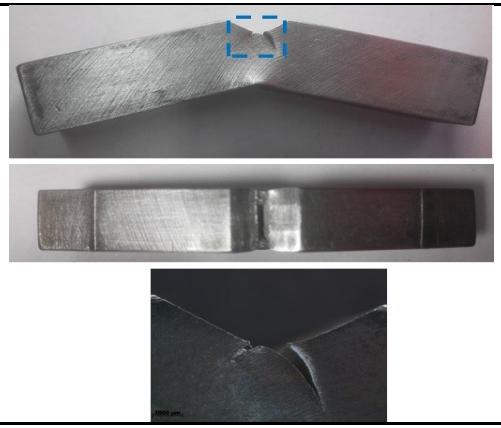
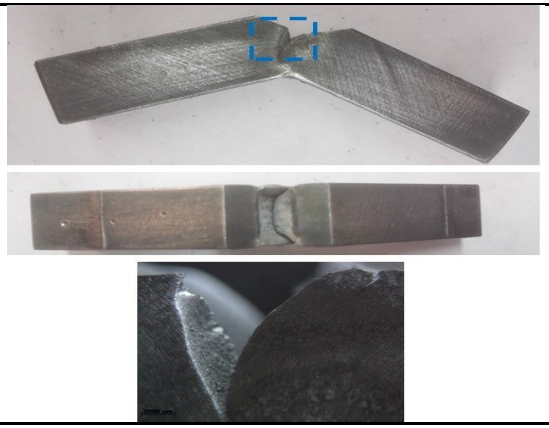
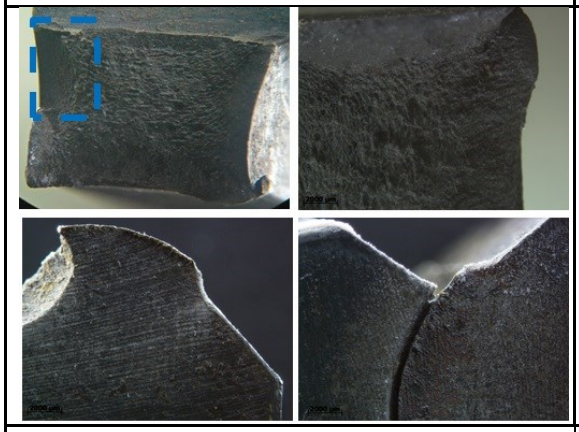
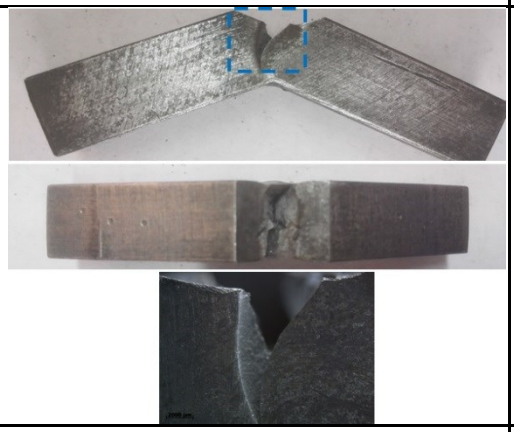
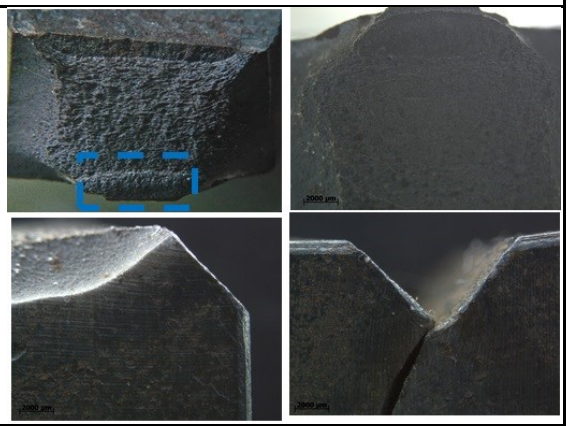
En comparación con las micrografías ópticas podemos observar que se presentan las mismas microestructuras, en las imágenes se exhiben claramente dos zonas: la zona de tonalidad oscura pertenece a la fase de ferrita, mientras que la de tonalidad clara pertenece a martensita .

Tabla 18 Imágenes de las rupturas de las probetas de impacto

Temple desde 740°C y Revenido de 10 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
Frágil - Dúctil	Frágil	Frágil
Temple desde 740°C y Revenido de 20 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
Frágil	Frágil	Dúctil

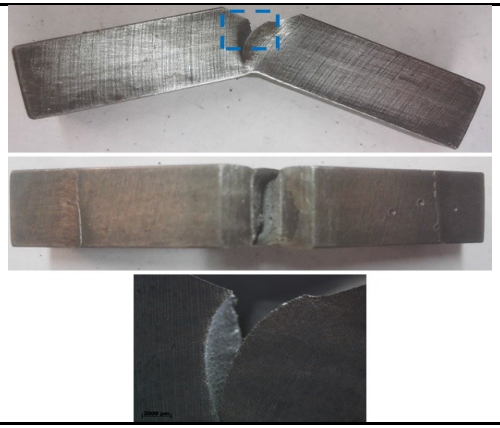
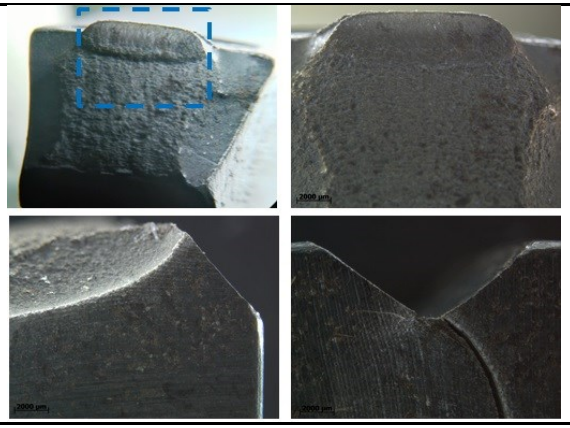
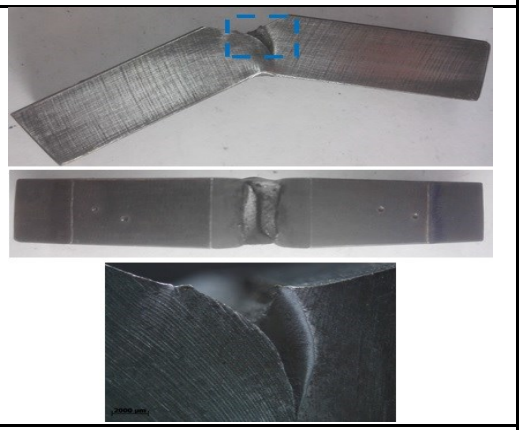
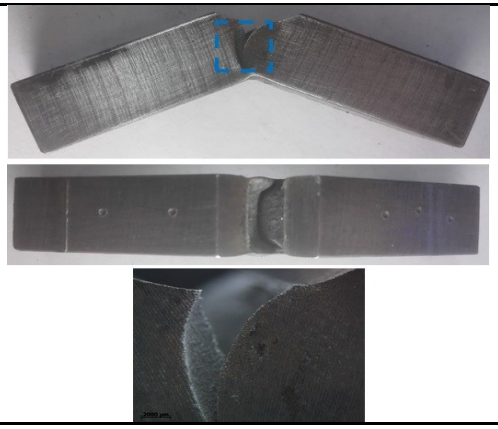
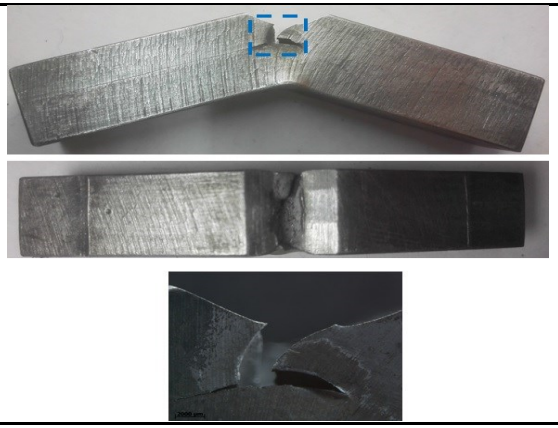
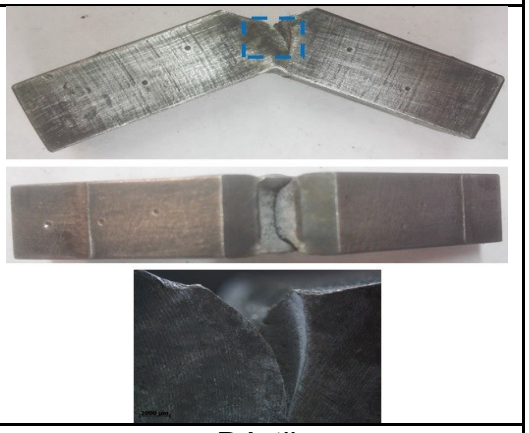
Fuente: Autores

Tabla 19 Imágenes de las rupturas de las probetas de impacto

Temple desde 740°C y Revenido de 30 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
Frágil	Dúctil	Dúctil
Temple desde 770°C y Revenido de 10 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
Frágil - Dúctil	Dúctil	Frágil - Dúctil

Fuente: Autores

Tabla 20 Imágenes de las rupturas de las probetas de impacto

Temple desde 770°C y Revenido de 20 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
Dúctil	Frágil - Dúctil	Dúctil
Temple desde 770°C y Revenido de 30 minutos según la temperatura indicada		
550 °C	600 °C	650 °C
		
Dúctil	Dúctil	Dúctil

Fuente: Autores

Se puede apreciar en las imágenes anteriores que los revenidos realizados a la serie de probetas templadas desde 740°C presentaron una ruptura frágil al momento de realizar las pruebas de impacto, caso contrario para el tratamiento de 770°C en el cual se encuentra un comportamiento de tenacidad elevado.

7. CONCLUSIONES

- Partiendo con la dureza del material base (176 HV) se concluye el temple a 770 °C endureció el material en un 329% (580 HV) y el temple a 740 °C lo logro endurecer en un 139% (246 HV), esta variación se debe a la formación de martensita que se generó en cada tratamiento.
- Al analizar las durezas de los revenidos realizados al temple de 740°C podemos observar que la dureza disminuye con todas las temperaturas al realizar el revenido durante 10 minutos encontrando un valor mínimo de 200 HV, a partir de los 20 minutos la dureza se comporta de forma constante tomando un valor promedio de 156,8 HV
- Para los revenidos realizados se encuentra que la energía absorbida al impacto aumenta significativamente al incrementar el tiempo de revenido, esto se observa mejor en los revenidos realizados a las probetas templadas desde 770°C.
- Según los resultados obtenidos por los ensayos de dureza y de impacto la serie de tratamientos que genera la mejor combinación de propiedades se encuentra al templar desde 770°C con un revenido de 10 minutos a 550°C en el cual se obtiene una dureza de 327,6 HV y energía absorbida al impacto de 66,17 J

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda profundizar en el estudio del comportamiento del material al ser templado a temperaturas cercanas a Ac_1 puesto que el equipo que se maneja en la universidad no opera con las condiciones óptimas de trabajo, ocasionando un tratamiento por debajo de esta temperatura.

Para mejorar la caracterización del comportamiento del material en las condiciones establecidas, se recomienda utilizar temperaturas de temples intercríticas en una zona media del intervalo puesto que los temples del presente trabajo se realizaron cerca a las temperaturas intercríticas extremas (superior e inferior).

En las pruebas de impacto para los revenidos realizados a los temples de 770°C, se recomienda utilizar un péndulo con mayor masa para lograr romper las probetas, puesto que el péndulo utilizado no logra generar la suficiente energía para romper las probetas.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. 2da edición Balderas 95, México, D.F.

Method ST. Standard Thest Method for Microindentation Hardness of Materials. Identity. 2002;14:1-24.

Gonzales A, Gonzales C. LABORATORIOS DE ENSAYOS INDUSTRIALES. 14th ed. Buenos Aires,Argentina: Ediciones Litenia; 1999.

Gorni AA. Steel Forming and Heat Treating Handbook. são vicente, Brasil; 2012.

ASTM International. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM Vol 1.

ASTM International. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Vol 1.; 2013.

.

ASTM International. Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of. Vol 1.

ASTM International. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness

Tisza M. Physical Metallurgy for Engineers. London, Tel Aviv: ASM International; 2001

Solá M. Tratamientos Térmicos de Los Metales. Marcombo; 1991.

Callister WD. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Los Materiales. Reverté; 2002.

Morral FR, Jimeno E, Molera P. Metalurgia General. Reverté; 1985.

10. ANEXOS

10.1 ANEXO 1

Primer Tratamiento	Segundo Tratamiento	Tiempo de Revenido [min]	Prueba Charpy [J]	Charpy promedio [J]	Dureza	Dureza Promedio	Dureza Promedio [HV]
Material base			28,50	26,79	88,34	88,16 HRB	176
			26,50		87,74		
			25,36		88,40		
Temple en agua desde 770°C			3,07	3,15	53,50	54,23 HRC	580
			3,42		54,74		
			2,96		54,46		
Temple en agua desde 770°C	Revenido a 650°C	10	81,16	80,18	23,9	23,89 HRC	257,7
			79,69		23,9		
			79,69		23,86		
Temple en agua desde 770°C	Revenido a 650°C	20	81,13	81,00	24,4	24,38 HRC	258,4
			81,13		24,76		
			80,74		23,98		
Temple en agua desde 770°C	Revenido a 650°C	30	81,10	81,28	20,74	21,00 HRC	244,3
			81,44		21,28		
			81,30		20,98		
Temple en agua desde 770°C	Revenido a 600°C	10	81,23	81,17	23,98	23,97 HRC	263,6
			81,14		23,84		
			81,14		24,1		
Temple en agua desde 770°C	Revenid a 600°C	20	81,39	80,95	26,38	25,63 HRC	263,1
			80,50		25,48		
			80,97		25,02		
Temple en agua desd 770°C	Revenido a 600°C	30	80,63	81,00	20,64	20,83 HRC	242,6
			81,18		21,5		
			81,18		20,34		
Temple en agua desde 770°C	Revenido a 550°C	10	69,54	66,17	34,24	33,08 HRC	327,6
			63,26		33,34		
			65,70		31,66		
Temple en agua desde 770°C	Revenido a 550°C	20	81,54	81,44	32,1	31,03 HRC	310
			81,49		30,68		
			81,30		30,3		
	Revenido a 550°C	30	81,13	81,13	27,48	26,82 HRC	278,5
			81,08		27,64		

Temple en agua desde 770°C			81,19		25,34			
Temple en agua desde 740°C			5,90	5,52	20,42	21,59	HRC	246
			4,68		22,10			
			5,99		22,24			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 650°C	10	46,31	45,90	92,74	92,95	HRB	200,6
			49,84		92,98			
			41,56		93,12			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 650°C	20	67,17	67,72	82,32	82,14	HRB	154,8
			69,82		82,32			
			66,16		81,78			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 650°C	30	81,13	80,68	81,24	81,11	HRB	150,8
			81,10		81,16			
			79,80		80,92			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 600°C	10	48,17	50,23	98,24	97,42	HRB	231,8
			49,76		96,92			
			52,77		97,1			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 600°C	20	56,47	53,91	81,9	81,95	HRB	153,3
			51,66		82,28			
			53,61		81,68			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 600°C	30	80,99	80,91	83,94	83,30	HRB	157,5
			81,07		83,4			
			80,67		82,56			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 550°C	10	45,18	45,38	97,44	96,71	HRB	227,2
			44,39		96,88			
			46,59		95,82			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 550°C	20	56,30	55,89	82,5	83,68	HRB	158,2
			58,68		83,86			
			52,69		84,68			
Temple en agua desde 740°C	Revenido a 550°C	30	62,79	61,49	81,84	86,89	HRB	166,5
			59,84		91,9			
			61,84		86,94			