

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA
SECCION DE POSGRADO**



**MEJORA DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL
ACERO SAE 1040 MEDIANTE PROCESOS DE
TRATAMIENTO TERMICO.**

**TESIS
PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS, MENCION:
CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**PRESENTADO POR:
ALBERTO LANDAURO ABANTO
PROMOCION 1989-11**

**LIMA-PERÚ
2011**

RESUMEN

El objetivo de la presente Tesis es el de mejorar las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 mediante los tratamientos térmicos de Temple y revenido, el temple se realizó a la temperatura de 850° C enfriando posteriormente la probeta en agua y para el revenido se usaron diferentes temperatura y tiempos, el rango de las temperaturas fueron entre los 200° C y los 500° C y del tiempo entre las 0.5 y 2.5 horas. Se obtuvieron diferentes resultados en la máxima resistencia a la tracción, Dureza Rockwell C, y el ensayo de impacto, se usó como base el Diseño Hexagonal con 9 pruebas iniciales y posteriormente se ampliaron hasta 36 pruebas obteniéndose 36 resultados, los cuales mediante el uso del software MATLAB se grafico las superficies de respuesta. En las superficies de respuesta se puede apreciar los valores óptimos desde el punto de vista tecnológico y que podrían usarse para la fabricación de piezas de uso industrial.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to improve the mechanical properties SAE 1040 steel through heat treatment of tempering and temple, the temple was carried out at a temperature of 850°C then cooling the specimen in water and tempering were used for different range of temperaturas between 200°C and 500°C and the time between 1.5 and 2.5 hours. Different results were obtained in the maximum tensile strength, hardness Rockwell C, and the impact test, was used as a basis the hexagonal design with 9 tests initial and subsequent widened to 36 tests and 36 results which were obtained using the MATLAB software is graphical response surfaces. In response surface can be seen the optimal values from the technological point and that could be used for the manufacture of parts for industrial use.

INDICE

RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
OBJETIVO	4
HIPÓTESIS	6
MÉTODO EXPERIMENTAL	7
TIPO DE INVESTIGACIÓN	8
CAPITULO I	9
TEMPLADO DE LAS PROBETAS	9
1.1 TRATAMIENTO TERMICO DE TEMPLE	9
1.2 DIAGRAMA TTT	11
1.3 DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN DE ENFRIAMIENTO CONTINUO	12
1.4 MARTENSITA	13
1.5 REVENIDO.	16
CAPITULO II	18
RESISTENCIA A LA TRACCION	18
2.1 ENSAYO DE TENSION	18
2.2 PROBETA PARA EL ENSAYO DE TENSION	19
2.3 CURVA DE TENSION-DEFORMACION INGENIERIL	21
2.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MÁXIMA TRACCIÓN	22
2.5 DISEÑO HEXAGONAL AMPLIADO	22
2.6 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ENSAYO DE TENSION.	24
CAPITULO III	26
ENSAYO DE DUREZA	26
3.1 ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C	26
3.2 NORMA ASTM E18.	27
3.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C	28
3.4 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C.	30
CAPITULO IV	31
ENSAYO DE CHOQUE O DE IMPACTO	31
4.1 ENSAYO DE IMPACTO CHARPY	31
4.2 METODO DEL ENSAYO CHARPY.	32
4.3 TEMPERATURA DE TRANSICION.	34
4.4 EFECTO DEL CARBONO.	35
4.5 EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO EN LA TENACIDAD .	36
4.6 RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO CHARPY	37
4.7 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ENSAYO DE IMPACTO CHARPY.	39
CONCLUSIONES	41
RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFIA	47
ANEXOS	49

LISTA DE SIMBOLOS

HRC	Dureza Rockwell C
SAE 1040	Society Automotive Engineers, acero con 0.4%C.
TTT	Diagrama, Tiempo temperatura transformación
TEC	Diagrama de transformación de enfriamiento continuo.
TCC	Tetragonal de cuerpo centrado.
CCC	Cubico de cuerpo centrado.
M_s	Temperatura de inicio de transformación de la martensita.
M_f	Temperatura final de transformación de la martensita.
ε	Carburo metaestable (Fe ₂ C).
Fe₃C	Cementita.
σ	Tensión
ε	Deformación
ASTM	American Society for Testing Materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1	Diagrama de temple y revenido	2
Figura N° 2	Tabla de tiempo y temperaturas de las probetas templadas y revenidas	3
Figura N° 1.1	Predicción de la temperatura óptima de temple	10
Figura N° 1.2	Diagrama TTT del acero SAE 1040	11
Figura N° 1.3	Diagrama de Transformación por enfriamiento Continuo del acero SAE 1040.	13
Figura N° 1.4	Estructura Tetragonal de la martensita	14
Figura N° 1.5	Planos de cizallamiento produciendo la formación de la martensita.	14
Figura N° 1.6	Intervalo de temperaturas de formación de la martensita.	15
Figura N° 1.7	Microestructura del Acero SAE 1040 sin temple, ferrita y perlita, a 200X.	16
Figura N° 1.8	Microestructura del acero SAE 1040 templado en agua a partir de 850°C, martensita, a 500X.	16
Figura N° 1.9	Microestructura del acero SAE 1040 Templado y revenido a 425°C durante 2 horas, bainita superior, a 500X.	17
Figura N° 2.1	Dimensiones de la probeta	19
Figura N° 2.2	Curva Ingenieril de Tensión-Deformación.	21
Figura N° 2.3	Diseño Hexagonal ampliado a 36 ensayos.	22
Figura N° 2.4	Superficie de respuesta tridimensional de la máxima resistencia a la tracción en función del tiempo y temperatura de revenido del acero SAE 1040.	24
Figura N° 2.5	Maquina de ensayo de tracción.	25
Figura N° 3.1	Proceso del ensayo de dureza Rockwell C, en la Figura: $P_0 = 10 \text{ Kg}$, $P_1 = 140 \text{ Kg}$, $P_f = 150 \text{ Kg}$.	27
Figura N° 3.2	Probeta rectificada para ensayo de Dureza	28
Figura N° 3.3	Maquina de ensayo de dureza Rockwell C.	28
Figura N° 3.4	Superficie de respuesta tridimensional de Dureza Rockwell C en función del tiempo y Temperatura de revenido del acero SAE 1040.	30
Figura N° 4.1	Péndulo usado para el ensayo Charpy.	33
Figura N° 4.2	Posición de la probeta en el ensayo Charpy	34
Figura N° 4.3	Probeta usada en el ensayo Charpy, usado para materiales ferrosos.	34
Figura N° 4.4	Zona de transición.	35
Figura N° 4.5	Efecto del Carbono en la tenacidad del acero.	36
Figura N° 4.6	Probeta usada en las pruebas de impacto	37
Figura N° 4.7	Superficie de respuesta tridimensional del ensayo de Impacto	39
Figura N° 4.8	Maquina de ensayo de impacto Charpy con el martillo de 18.7 Kg. en posición inicial.	40

Figura N° 4.9	Maquina de ensayo de impacto de 30 Kg-m (294 J).	40
Figura Anexo N° 2.1	DIAGRAMA TTT. (Velocidad optima de temple)	
Figura Anexo N° 2.2	Temperatura de temple del acero al carbono.	
Figura Anexo N° 2.3	Transformación de Austenita a martensita	
Figura Anexo N° 3.1	Proceso de Horno Eléctrico	
Figura Anexo N° 3.2	Horno cuchara.	
Figura Anexo N° 3.3	Colada Continua	
Figura Anexo N° 3.4	Palanquillas	
Figura Anexo N° 3.5	Barras de acero	
Figura Anexo N° 3.6	FLOW SHEET DEL PROCESO DE LAMINACIÓN DE BARRAS DE ACERO	

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1.1	La dureza Rockwell C (HRC) en función de la temperatura de temple.	10
Tabla N° 2.1	Dimensiones de las probetas según la norma ASTM E 8.	20
Tabla N° 2.2	Resultados del ensayo de máxima resistencia a la tracción de probetas templadas y revenidas del acero SAE 1040, en función de la temperatura y tiempos.	23
Tabla N° 3.1	Resultados del ensayo de máxima resistencia a la tracción de probetas templadas y revenidas del acero SAE 1040, en función de la temperatura y tiempos.	29
Tabla N° 4.1	Resultados del ensayo de impacto de probetas templadas y revenidas en función de la temperatura y tiempos.	38

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene por finalidad mejorar las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 (0.37 a 0.44%C, 0.6 a 0.9%Si, 0.6 a 0.8%Mn, 0.04%S, 0.05%P), después del tratamiento térmico de templado y revenido, llegar a tener valores entre 115 a 120 Kg/mm² de la resistencia a la tracción, y entre 30 a 40 J, de resistencia al impacto, obteniéndose así una alta resistencia y tenacidad.

Este material tratado térmicamente podría ser usado en la fabricación de diferentes piezas que necesita la industria en reemplazo de diferentes tipos de acero de mayor valor económico.

Para realizar los tratamientos térmicos de templado y revenido en los respectivos ensayos, se usó una barra de acero trefilado SAE 1040 y se manufacturaron inicialmente 9 probetas y se completó hasta 36 probetas para los ensayos de dureza, tracción y de impacto; primero se procedió a templar todas las probetas y después se realizó el revenido entre 200°C y 500°C, ver Figuras N° 1 y 2. El agua se usó como medio de enfriamiento durante el temple, y en el revenido el enfriamiento de las probetas se realizó al aire obteniéndose buenos resultados.

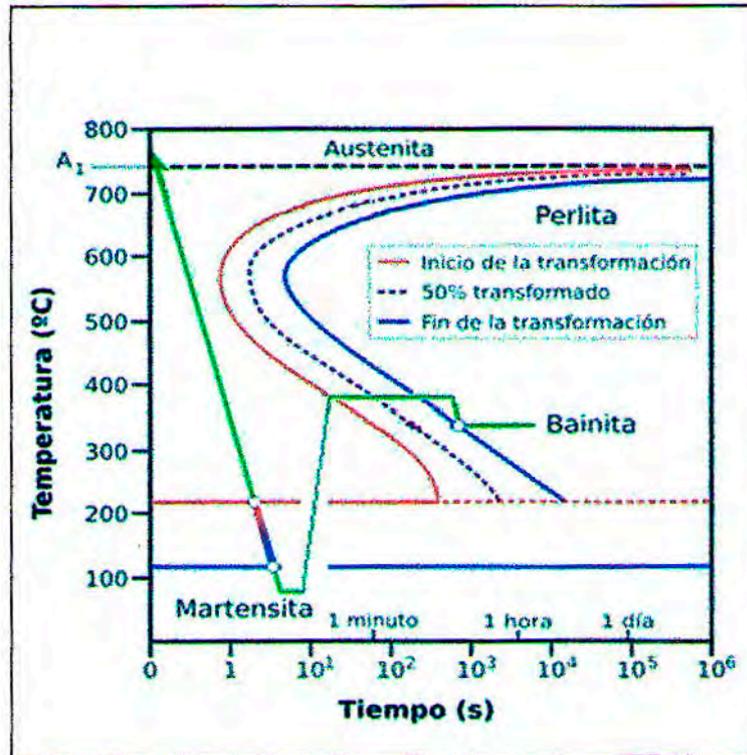


Figura N° 1 Diagrama de temple y revenido.(Diagrama tomado y adaptado a la tesis del handbook : Steel -Introducción to head treatment).

Para realizar los tratamientos térmicos (temple y revenido) y los respectivos ensayos se usó una barra de acero SAE 1040 laminado y trefilado, se manufacturaron 36 probetas para los ensayos de tracción y de impacto, primero se procedió a templar todas las probetas y después se realizó el revenido a diferentes temperaturas y tiempos teniendo como base el diseño hexagonal (Figura N° 2), obteniéndose diferentes resultados de la resistencia a la tracción, dureza y de impacto.

Se empezó con 9 pruebas usando el diseño hexagonal y luego se ampliaron hasta las 36 pruebas en total, el eje X se usó para la variable temperatura en °C (ver Figura 1) y en el eje Y para el tiempo en horas.

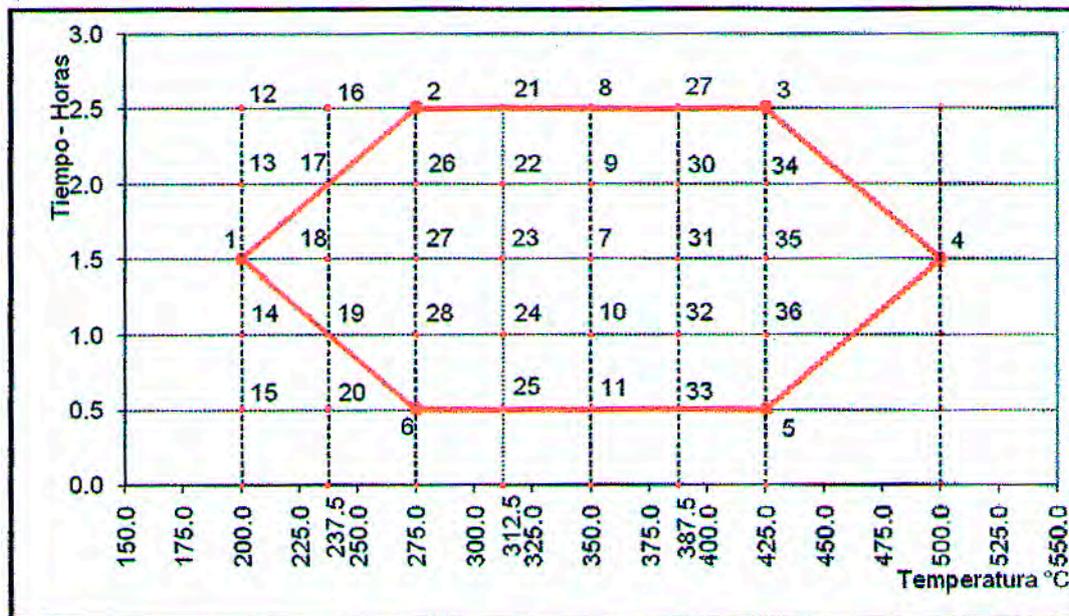


Figura N° 2 . Tabla de tiempo y temperaturas de las probetas Templadas y Revenidas

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existe en el mercado nacional aceros aleados con alto valor económico debido a que las materias primas como los ferroaleantes que se usan para fabricar estos aceros han tenido una gran alza de precios en el mercado mundial y el Perú no fabrica ferroaleantes; frente a este problema hemos creído conveniente mejorar las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 mediante el templado y revenido a diferentes temperaturas y tiempos (Figura N° 2). La temperatura de templado lo obtendremos mediante siete ensayos a diferentes temperaturas y escogeremos en la que se obtenga la mayor dureza Rockwell C. El acero templado y revenido podrá reemplazar a diferentes tipos de aceros aleados cuya resistencia sea del orden de los 70 a 100 Kg/mm², como por ejemplo los aceros usados para la fabricación de de pernos de alta resistencia, pernos de anclaje usados en la minería etc.

FORMULACION DEL PROBLEMA

Actualmente no se cuenta con la información sobre la mejora de las propiedades mecánicas de los aceros al carbono mediante el templeado y revenido, es por este motivo que hemos formulado esta investigación midiendo la resistencia a la tracción, dureza Rockwell e y resistencia al impacto Charpy a las probetas del acero SAE 1040, las cuales fueron templeadas a 850°C y enfriados en agua y posteriormente revenido a diferentes temperaturas y tiempos.

OBJETO DEL ESTUDIO

El objeto a estudiar es el acero SAE 1040, que tiene una resistencia máxima a la tracción de 63 Kg/mm².

OBJETIVO

Mejorar las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 mediante tratamiento térmico del templeado del acero a 850°C y enfriado en agua y posteriormente revenido entre las temperaturas de 200°C a 500°C y tiempo de revenido de 0.5 a 2.5 horas.

ALCANCES

El presente estudio comprende lo siguiente:

- Determinación de la temperatura óptima de templeado calentando el acero a diferentes temperaturas (7 probetas), templeando en agua y midiendo la dureza Rockwell C; escogiendo la temperatura de mayor dureza.
- Medida de la resistencia a la tracción en Kg/mm², de las 36 probetas templeadas y revenidas y graficar la superficie de respuesta en tres dimensiones usando un programa aplicado al software MATLAB.

- Medida de la dureza Rockwell C. de las 36 probetas templadas y revenidas y graficar la superficie de respuesta en tres dimensiones usando un programa aplicado al software MATLAB.
- Medida de la resistencia al impacto usando el método Charpy de las 36 probetas templadas y revenidas y graficar la superficie de respuesta en tres dimensiones usando un programa aplicado al software MATLAB.

JUSTIFICACION

Los países desarrollados que tienen laboratorios en los institutos y Universidades con diferentes tipos de equipos, están haciendo estudios de reemplazo de materiales con menor costo y mejores propiedades; en el Perú no existen tablas sobre las propiedades mecánicas con tratamiento térmico de aceros al carbono y aceros de baja aleación, es por este motivo que hemos decidido estudiar al acero SAE 1040, el cual se puede fabricar en las acerías del Perú porque ya se fabrican aceros parecidos y se puede usar para la manufactura de pernos de alta resistencia, pernos de anclaje de rocas en minería, barretas de desquinche, etc

LIMITACIONES

Limitación temporal

El presente de investigación es importante porque nos ayuda a conocer las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 y sus aplicaciones en la fabricación de piezas en la industria metal mecánica, minera, agrícola, construcción y otros que requiera de materiales con mediano y alta resistencia a la tracción, pero los equipos de la UNI deben de ser modernizados y calibrados y además se debe de comprar nuevos equipos para medir otras propiedades como el ensayo a la fatiga, microscopio electrónico de barrido, resistencia a la tracción, etc.

Limitación espacial

El proceso de investigación se realizará en el laboratorio N°9 de la Escuela de Metalurgia, con los equipos de tracción, dureza Rockwell C y el péndulo de impacto charpy, también se realizaron pruebas en paralelo en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería civil.

Limitación conceptual

En relación al enfoque científico tecnológico, se tiene una base teórica y experimental obteniendo resultados y comparando con las propiedades de aceros aleados que tienen mejores propiedades pero además tienen altos costos.

HIPOTESIS

El acero SAE 1040 se encuentra en el mercado en estado normalizado, con una resistencia a la tracción de 63 Kg/mm², una dureza entre 22 a 24 HRC, es posible llegar a tener valores entre 115 a 120 Kg/mm² de la resistencia a la tracción, y entre 30 a 40 J de resistencia al impacto y durezas entre 38 a 40 HRC después del tratamiento térmico de templado y revenido-.

METODO DE INVESTIGACION

Este estudio tiene una base teórica, lo cual es corroborado con los experimentos desarrollados en las probetas templadas y revenidas a diferentes temperaturas y tiempos; midiendo a cada una la resistencia a la tracción, dureza y resistencia al impacto.

Método analítico

Es importante conocer la estructura del acero en estado normalizado y después del templado y revenido se demuestra que existe un cambio estructural y por consiguiente diferentes propiedades mecánicas.

Método experimental

Se fabricaron las probetas para el ensayo de tracción, dureza y ensayo de impacto Charpy, posteriormente fueron sometidas al tratamiento térmico de temple y revenido; a las 36 probetas se le midió su respectiva resistencia a la tracción, dureza Rockwell C y resistencia al impacto Charpy, graficando en tres dimensiones los resultados.

El procedimiento es el siguiente:

- Se fabricaron 36 probetas de ensayo de tracción, 36 probetas para el ensayo de dureza Rockwell C, y las 36 probetas para el ensayo Charpy que cumplen con las normas ASTM, se procedió a temprar a 850°C (temperatura obtenida por método experimental que es aproximadamente cercana a la que se obtiene con los diagramas teóricos) en agua, todas las probetas.
- Se procedió al proceso de tratamiento térmico de revenido teniendo en cuenta las temperaturas y tiempos dados en la Figura N° 2.
- Después del revenido, se procedió al ensayo de tracción a las probetas para este fin, usando la norma ASTM E8, midiendo en Kg/mm².
- A las probetas para el ensayo de dureza, después del revenido, se procedió a medir su dureza Rockwell C de acuerdo a la norma ASTM E18.
- También se medirá la tenacidad del acero SAE 1040 mediante el ensayo de impacto Charpy a las probetas revenidas en Joule, usando la norma ASTM E23.
- Finalmente se procedió a graficar en tres dimensiones mediante un programa aplicado al software MATLAB.

TIPO DE INVESTIGACION

El presente estudio puede ubicarse como un tipo de investigación académica y tecnológica aplicada a la ingeniería, por qué tiene una base teórica y además es del tipo de investigación experimental debido a que maneja dos variables como la temperatura y el tiempo para mejorar las propiedades mecánicas del acero SAE 1040. Este tipo de investigación se caracteriza por ser una investigación aplicada y está estrechamente vinculada con la investigación básica, porque toda investigación aplicada requiere de un marco teórico, y los resultados obtenidos pueden aplicarse en el campo de la ingeniería.

NIVEL DE INVESTIGACION

El nivel de investigación de este estudio es exploratoria debido a que no existen investigaciones previas y existen muy pocos conocimientos prácticos. Es importante profundizar con este tipo de investigación por qué al tener nuevos resultados podremos conocer nuevas aplicaciones en el campo de la ingeniería; la investigación exploratoria terminará cuando a partir de los datos recolectados se adquirirá el suficiente conocimiento como para saber que variables son relevantes y cuáles no.

NOVEDAD CIENTIFICA

Habiendo revisado diversas tesis y proyectos de investigación no se han estudiado las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 teniendo en cuenta dos variables tiempo y temperatura en el tratamiento térmico de revenido y graficando con las tres dimensiones.

CAPITULO I

TEMPLADO DE LAS PROBETAS

1.1 TRATAMIENTO TERMICO DE TEMPLE

Todas las probetas fueron sometidas al temple, esta prueba consiste en calentar las piezas a diferentes temperaturas de austenización, para obtener la temperatura óptima del templado y después se enfría las probetas en agua, para lograr la estructura martensita, obteniéndose así una alta dureza.

La estructura martensita es una fase metaestable formada por una solución sólida intersticial sobresaturada de carbono en hierro formando una celda tetragonal centrado en el cuerpo.

La dureza y resistencia a la tracción del acero con estructuras martensíticas están directamente relacionadas con su contenido de carbono pero su ductilidad y tenacidad disminuye, es por ello que los aceros templados son revenidos posteriormente.

Se templaron 7 probetas a las temperaturas de: 750°C, 800°C, 850°C, 900°C, 1000°C, 1050°C, obteniéndose los resultados de la Tabla N° 1.1

Tabla N° 1.1 La dureza Rockwell C (HRC) en función de la temperatura de temple.

Temperatura °C	Dureza HRC
750	48
800	53
850	55.5
900	54
950	53
1000	50
1050	45

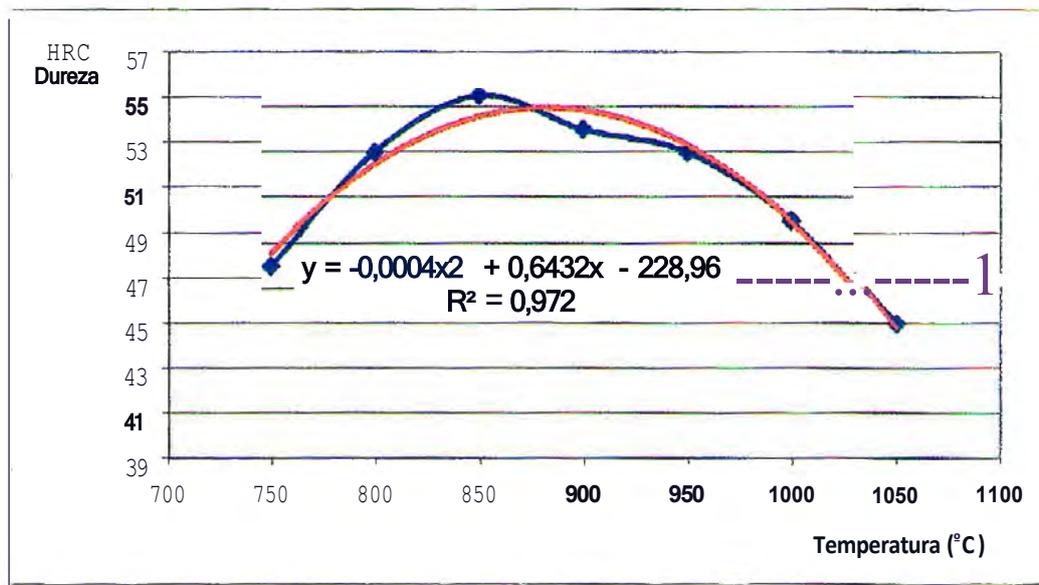


Figura N° 1.1 Predicción de la temperatura óptima de temple

Con estos datos se estimó el siguiente modelo de regresión con un coeficiente R^2 del 99%, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Y = -0.0004X^2 + 0.6432X - 228.96$$

Se puede ver en la Figura N° 1.1, que la temperatura óptima es aproximadamente de 850 °C.

1.2 DIAGRAMA TTT

Los Diagramas TTT ó diagramas de transformación isotérmica, se usan para investigar los cambios estructurales en la descomposición de la austenita en función del tiempo, se puede ver en la Figura N° 1.2 que entre los 500°C y los 723°C se produce la estructura perlita, en este intervalo la perlita cambia de estructura gruesa a fina, cerca de los 500°C la perlita es fina y tiene buenas propiedades mecánicas, y cuando se acerca a los 723°C la perlita es gruesa y sus propiedades mecánicas son de menor valor.

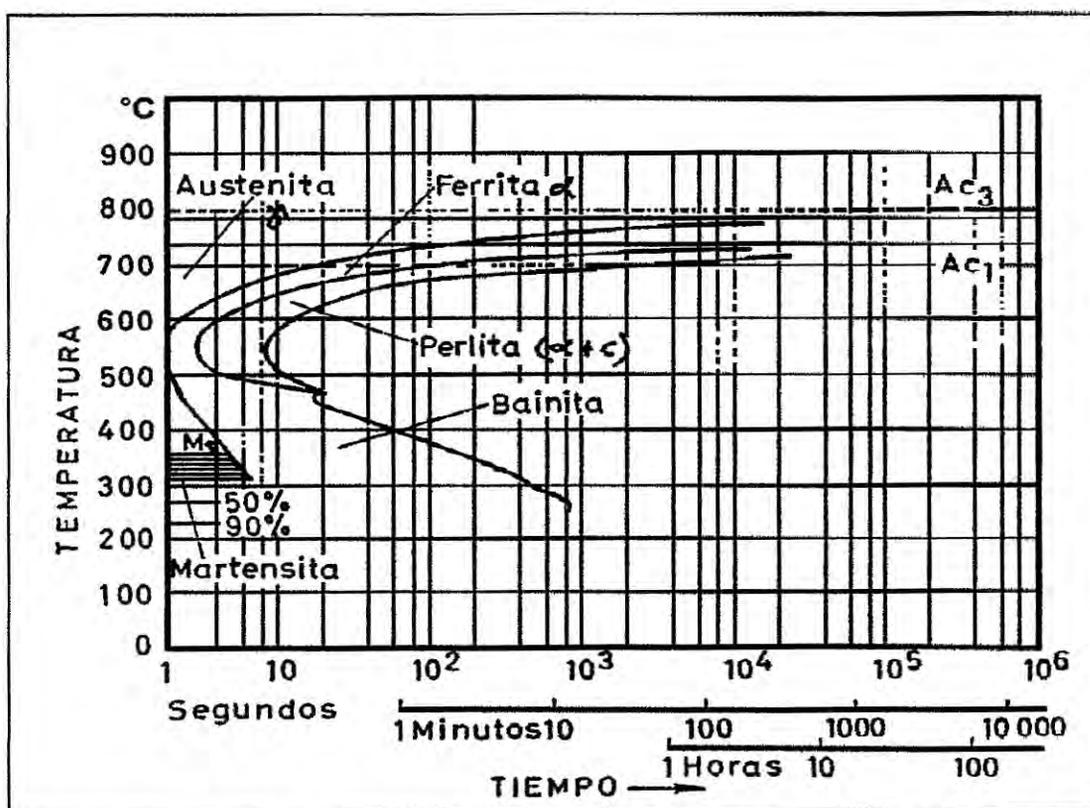


Figura N° 1.2 Diagrama TTT del acero SAE 1040. (Libro The Physical Metallurgy of Steels- W.C. Leslie)

Entre la temperatura la temperatura de 480 y 250°C se produce la estructura denominada bainita, entre los 480 y 350°C se forma la bainita superior y entre los 350 y 250°C la bainita inferior. La morfología de la bainita superior consiste en zonas de carburo gruesos entre láminas de ferrita, el agrupamiento de estas láminas

de ferrita tiene la forma de plumas y es la característica que identifica a la bainita superior en las microestructuras ópticas. La morfología de la bainita inferior es muy parecido a la estructura martensita. con los carburos finos dentro de las ferritas aciculares o con apariencia de placas.

Para realizar el temple del acero SAE 1040 se usa el diagrama TIT, el cual nos indica la velocidad de enfriamiento crítica para obtener la estructura martensita, en la Figura N° 1.2 podemos apreciar que la nariz del diagrama está pegada al eje de las ordenadas por consiguiente la velocidad de enfriamiento tiene que ser muy alta y económica es por ello que hemos decidido templar con agua. La formación de martensita es atérmica y, tan pronto alcance la temperatura M_s , la transformación se inicia, hasta completarla a la temperatura denominada M, (Figura 1.6).

1.3 DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN DE ENFRIAMIENTO CONTINUO

Los Diagramas de Transformación de enfriamiento continuo nos determinan las estructuras producidas en un acero a diferentes velocidades de enfriamiento, estos diagramas también son denominados TEC.

En la Figura N° 1.3 se puede ver el Diagrama TEC para el acero SAE 1040 con diferentes velocidades de enfriamiento, para nuestro estudio hemos usado el agua como medio de enfriamiento.

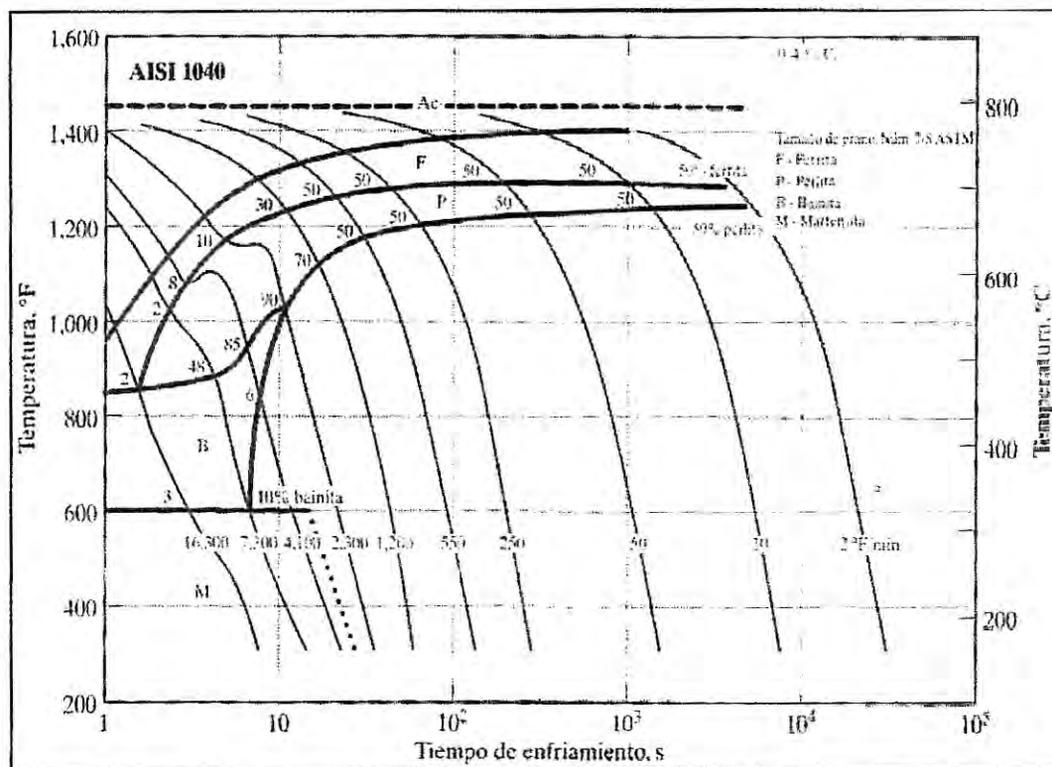
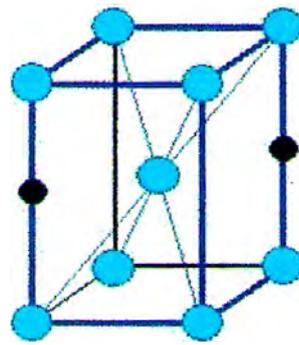


Figura N° 1.3 Diagrama de Transformación por enfriamiento Continuo del acero SAE 1040. (Atlas of Isothermal Transformation and cooling Transformation Diagrams ASM 2004).

1.4 MARTENSITA

La martensita es la estructura más dura que se puede producir a partir de la austenita, siendo una solución sobresaturada de carbono en hierro formando una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (TCC). Inicialmente al calentarse el acero hasta la fase austenítica esta se encuentra como una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (CCC), y al enfriarse rápidamente se produce una transformación sin difusión produciéndose una reorganización de los átomos de hierro formándose la estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo, tal como se puede ver en la Figura 1.4, el contenido de carbono es directamente proporcional a la tetragonalidad de la red de la martensita.



- Carbono
- Hierro

Figura N° 1.4 Estructura Tetragonal de la martensita

Según E. Schell la formación de la Martensita se produce como una transformación por cizal/amiento γ no depende de la difusión, coincidiendo con Bain, con esta teoría.

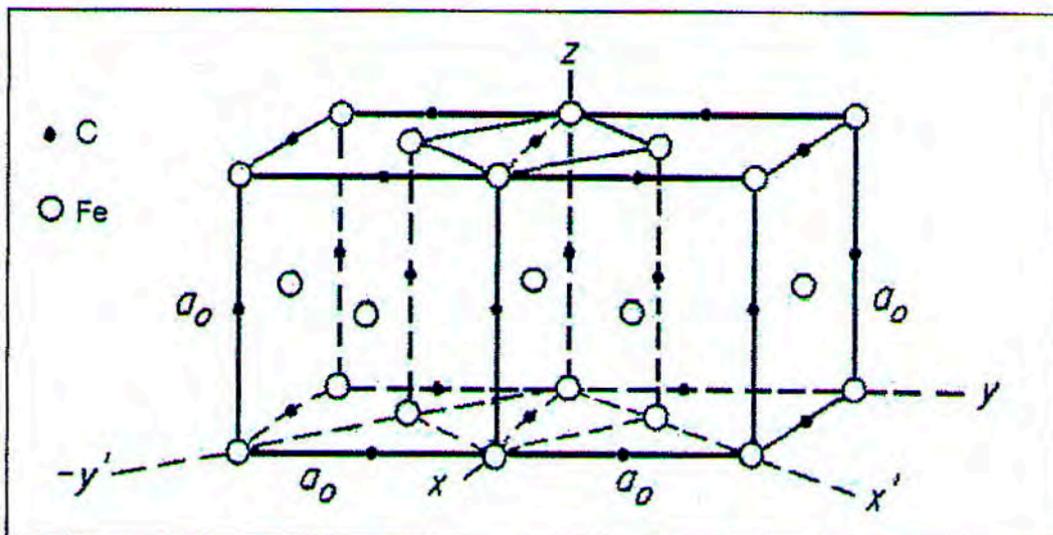


Figura N° 1.5 Planos de cizallamiento produciendo la formación de la martensita. (Libro The Physical Metallurgy of steels-W.C. Leslie)

Se ha demostrado que la dureza de la martensita es directamente proporcional al contenido de carbono.

La martensita tiene una alta dureza, el acero que contiene esta estructura es frágil, es por este motivo que para mejorar las

propiedades mecánicas del acero se somete al tratamiento térmico denominado revenido.

La formación de la martensita se inicia a la temperatura M_s , dependiendo del contenido de carbono en el acero, y finaliza a la temperatura M_f , tal como se muestra en la Figura N°1.6. La composición química de la probeta es: 0.4%C, 0.69%Si, 0.62%Mn, 0.042%8 y 0.045%P.

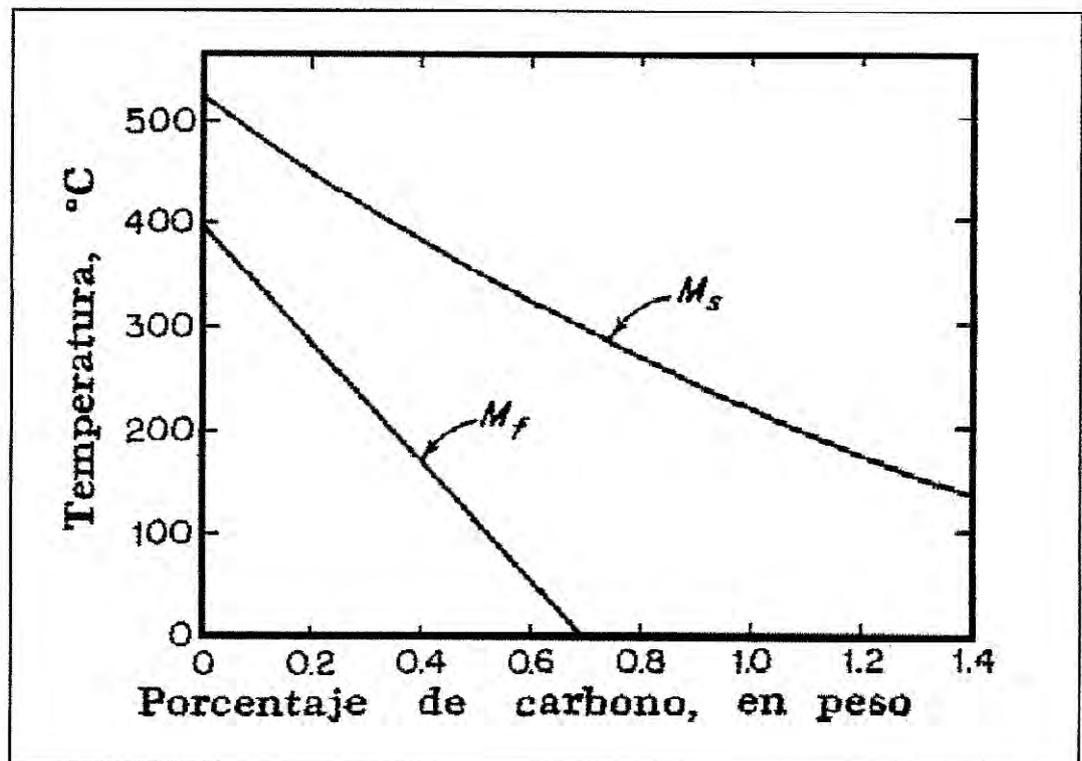


Figura N° 1.6 Intervalo de temperaturas de formación de la martensita.
(Hardenability of steels ASM- C.A,Siebert)

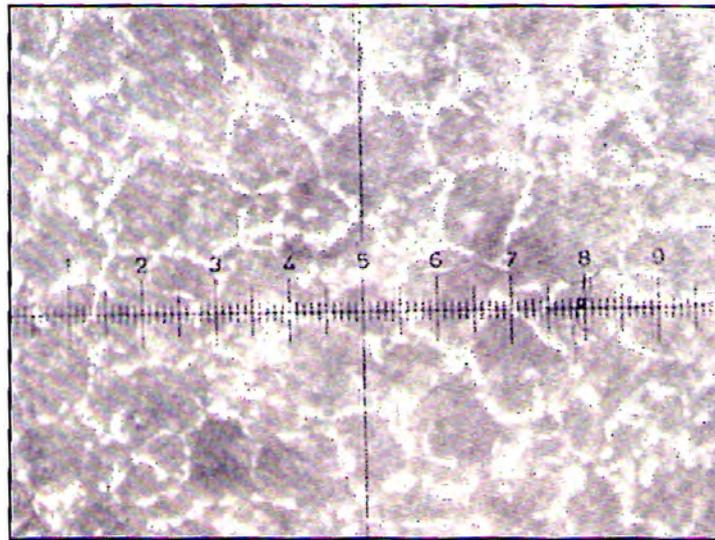


Figura N° 1.7 Microestructura del Acero SAE 1040 sin temple, ferrita y perlita, a 200X.

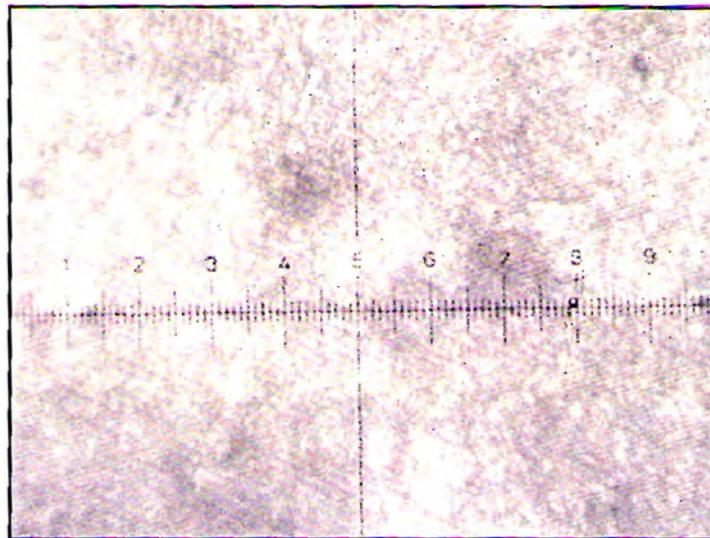


Figura N° 1.8 Microestructura del acero SAE 1040 templado en agua a partir de 850° C, martensita, a 500X.

1.5 REVENIDO.

La estructura Inicial es la martensita con austenita retenida, cuando se calienta el acero hasta los 200° C la martensita disminuye su tetragonalidad, transformándose a martensita cúbica aproximadamente, a los 300° C empieza a precipitar un carburo metaestable ϵ (Fe_2C aproximadamente, hexagonal), entre los 300 y 450° C se produce la transformación de ϵ a Fe_3C . Por encima de los

450° C empieza a aparecer la estructura ferrita con la cementita (Fe₃C, ortorrómbica).

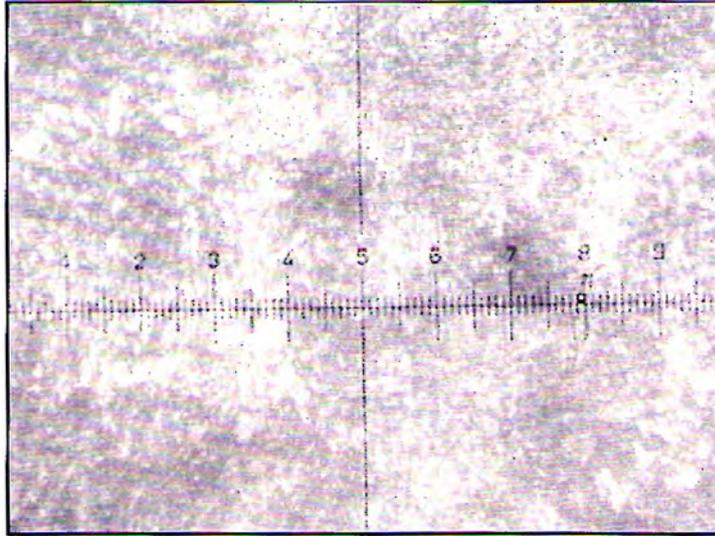


Figura N° 1.9 Microestructura del acero SAE 1040 Templado y revenido a 425° C durante 2 horas, bainita superior, a SOOX.

CAPITULO II

RESISTENCIA A LA TRACCION

2.1 ENSAYO DE TENSION

Después del temple y revenido, a las probetas se les midió la resistencia a la tracción, siendo el principal objetivo conocer el coeficiente entre la fuerza máxima aplicada sobre la probeta y la sección de la misma y así poder calcular la máxima resistencia a la tracción. Para iniciar el ensayo se sujeta la probeta en ambos extremos con las mordazas del equipo de ensayo a la tracción, un extremo de la probeta esta sujeto al cabezal móvil y la otra al cabezal fijo, luego se pone en funcionamiento la máquina de ensayo, el cabezal móvil alarga a la probeta, deformándola y el equipo simultáneamente nos va indicando la fuerza aplicada.

La probeta utilizada se muestra en la Figura 2.1, la cual consiste en una región central de sección circular uniforme de 4.1 mm. de diámetro (O), y es la zona donde se mide la deformación, en los extremos la probeta tiene un diámetro (H) de 9.0 mm, en esta zona de la probeta es sujeta por las mordazas.

Para el uso en el campo de la ingeniería, la curva de tensión-deformación se representa en función de las tensiones y sus respectivas deformaciones.

La tensión se define, como:

$$\text{Tensión } (\sigma) = \frac{\text{Fuerza (Kg)}}{\text{Area (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

La deformación:

$$\text{Deformación } (\epsilon) = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (11)$$

Las unidades de la tensión se expresará en Kg /mm² y la deformación no tiene unidades.

2.2 PROBETA PARA EL ENSAYO DE TRACCION.

Las dimensiones de la probeta de ensayo de tracción se muestran en la Figura N° 2.1, y en la Tabla 2.1.

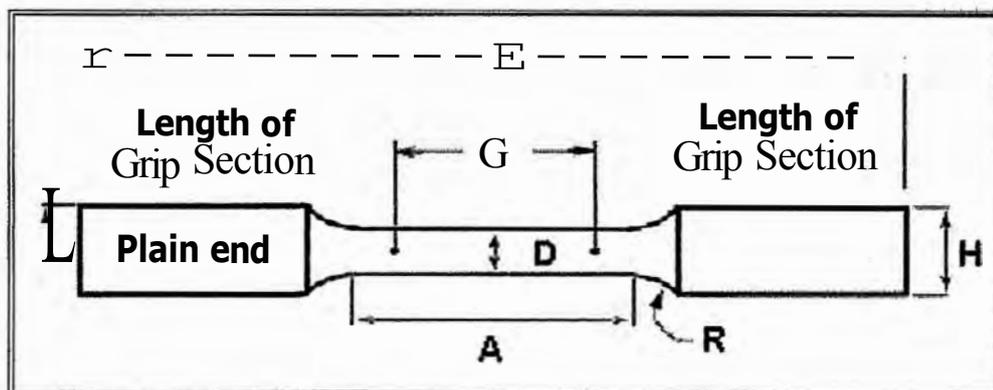


Figura N° 2.1 Dimensiones de la probeta

Las dimensiones de la probeta según la norma ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) son:

Diámetro calibrado (D) ó diámetro de la probeta, zona donde se mide la deformación.

D = 0.16 ± 0.003 pulgadas = 4.1 mm.

G = Longitud calibrada

G = 0.64 ± 0.005 pulgadas = 16.2 mm.

A = Longitud total en la zona calibrada, ó reducida.

A = $3/4$ pulgada = 19.1 mm.

R = Radio del filete.

R = $5/32$ pulgada = 3.9 mm.

E = Longitud total de la probeta.

E = 60 mm.

H = 9.0 mm, de diámetro en la zona de agarre de las mordazas.

En la Tabla N° 2.1 se puede ver las dimensiones de las probetas de sección redonda, hemos escogido la probeta de 0,16 pulgadas de diámetro debido a que se adecuaba a la máquina de ensayo de tracción.

Tabla N°2.1 Dimensiones de las probetas según la norma ASTM E 8.

Examples of tension test pieces per ASTM E 8.
Round test-piece

	Standard specimen, in., at nominal diameter:		Small-size specimens proportional to standard, in., at nominal diameter:		
	0.500	0.350	0.250	0.160	0.113
G, gage length	2.000 0.005	= 1.400 0.005	± 1.000 0.005	= 0.640 0.005	= 0.450 0.005
D, diameter ^(a)	0.500 0.010	= 0.350 0.007	± 0.250 0.005	= 0.160 0.003	= 0.113 0.002
R, radius of fillet, min	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{32}$
A, length of reduced section, min ^(b)	2 $\frac{1}{4}$	1 $\frac{3}{4}$	1 $\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{5}{8}$

2.3 CURVA DE TENSION-DEFORMACION INGENIERIL

La curva de tensión-deformación se obtiene a partir de datos proporcionados por la máquina de ensayo de tracción. La curva se inicia con una recta que parte desde el origen hasta el punto L_p , conocido como límite de proporcionalidad, luego la curva sigue hasta el límite elástico L_e , hasta este punto, el acero se comporta como un elástico, hasta la zona lineal (L_p) se cumple la ley de Hooke; muy cerca está el punto de fluencia (L_f), a partir de este punto la deformación se hace permanente, la tensión aumenta hacia la máxima resistencia, tal como se puede ver en la Figura N° 2.2, en las probetas aparecen unas marcas superficiales visibles denominadas bandas de Lüder, en el punto de la máxima resistencia a la tracción la curva se hace ligeramente horizontal y luego empieza a descender produciéndose el estrechamiento local de la sección de la probeta, de esta manera la carga actúa sobre una decreciente área de sección transversal y así termina con la rotura de la probeta.

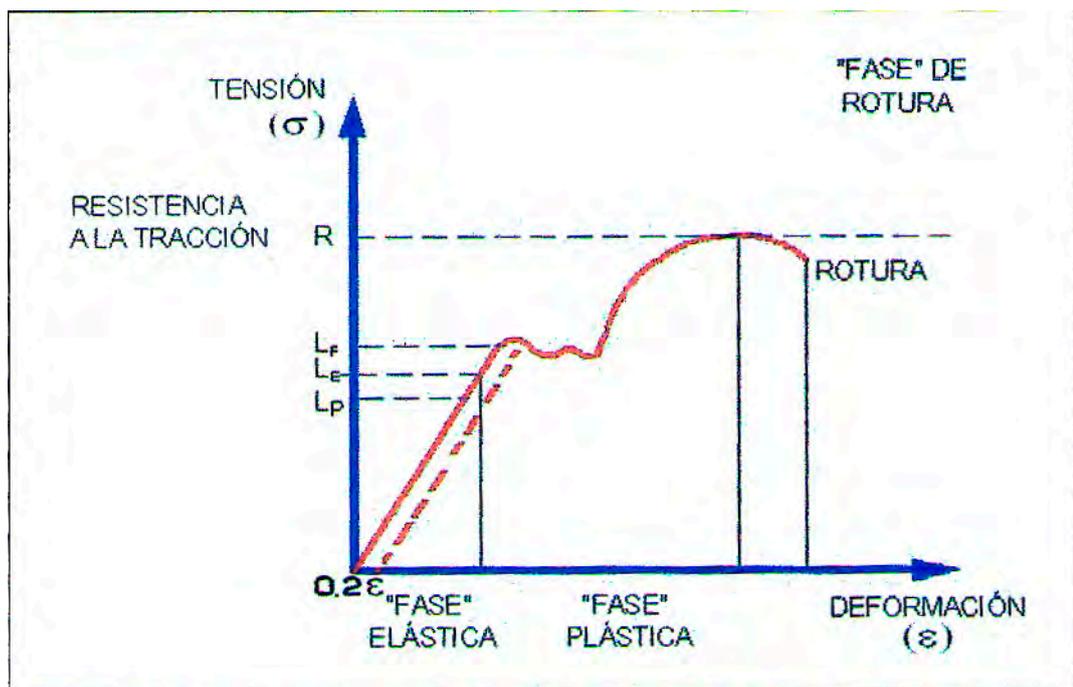


Figura N° 2.2 Curva Ingenieril de Tensión-Deformación.

2.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MÁXIMA TRACCIÓN

Después del calentar las probetas a 850°C y templarlas en agua, se sometió las probetas al tratamiento térmico denominado revenido a diferentes temperaturas enfriando finalmente al aire; se usaron diferentes tiempos tal como se muestra en la Tabla N° 2.2; teniendo en cuenta que se empezó con 9 pruebas tal como lo pide el Diseño Hexagonal, y posteriormente se ampliaron hasta los 36 ensayos, el tamaño de grano es ASTM N° 7, composición química analizada es: 0.4%C, 0.69%Si, 0.62%Mn, 0.042%8 y 0.045%P y la velocidad de deformación según la norma ASTM E8 es de $5 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$ para el acero.

2.5 DISEÑO HEXAGONAL AMPLIADO

Los ensayos se iniciaron con 9 probetas, posteriormente se fueron ampliando el número de ensayos hasta completar las 36 probetas, para obtener una mejor superficie de respuesta. Los 36 ensayos en función del tiempo y temperatura del revenido se muestran en la Figura N° 2.3.

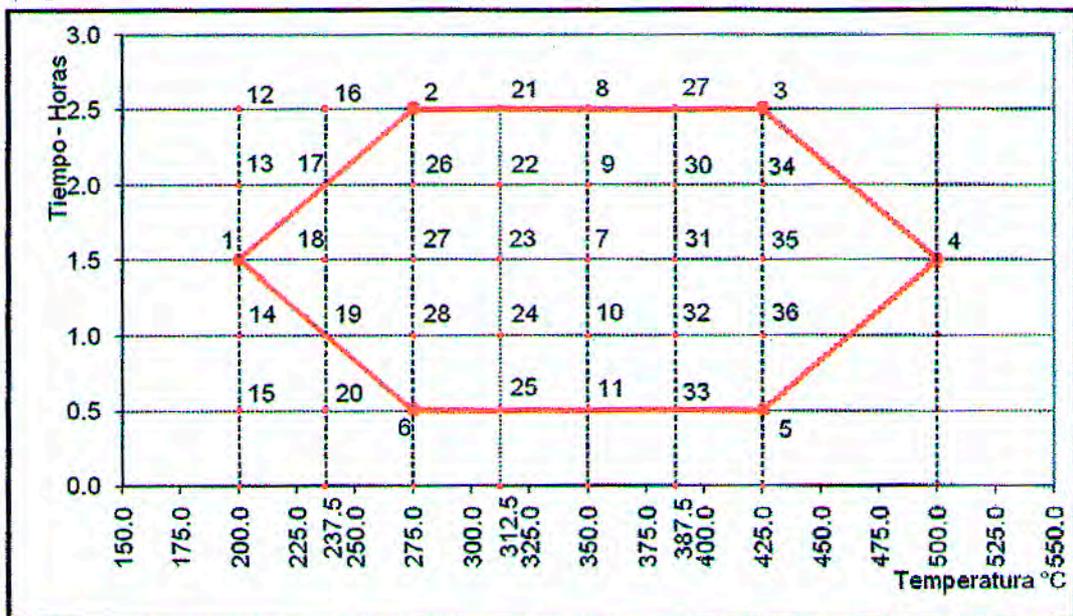


Figura N° 2.3 Diseño Hexagonal ampliado a 36 ensayos.

Tabla N° 2.2 Resultados del ensayo de máxima resistencia a la tracción de probetas templadas y revenidas del acero SAE 1040, en función de la temperatura y tiempos.

n°	TOC	Tiempo hr.	Ensayo de máxima resistencia a la tracción Kg/mm ²
1	200	1.5	125.2
2	275	2.5	122.0
3	425	2.5	102.2
4	500	1.5	90.8
5	425	0.5	107.3
6	275	0.5	126.5
7	350	1.5	115.4
8	350	2.5	110.0
9	350	2.0	112.6
10	350	1.0	117.4
11	350	0.5	118.8
12	200	2.5	123.5
13	200	2.0	124.5
14	200	1.0	126.8
15	200	0.5	127.2
16	237.5	2.5	122.6
17	237.5	2.0	124.2
18	237.5	1.5	125.1
19	237.5	1.0	125.8
20	237.5	0.5	125.3
21	312.5	2.5	114.3
22	312.5	2.0	115.4
23	312.5	1.5	124.5
24	312.5	1.0	122.7
25	312.5	0.5	125.4
26	275	2.0	123.5
27	275	1.5	124.8
28	275	1.0	125.6
29	387.5	2.5	106.5
30	387.5	2.0	106.2
31	387.5	1.5	108.5
32	387.5	1.0	109.7
33	387.5	0.5	111.4
34	425	1.5	103.5
35	425	1.0	104.2
36	425	0.5	107.8

2.6 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ENSAYO DE TENSION.

Los datos obtenidos en la Tabla N° 2.2 han sido graficados usando el software **MATLAB**, en tres dimensiones, teniendo como variables el tiempo y la temperatura, se puede apreciar que a mayor temperatura del revenido la resistencia del acero disminuye, además a mayor tiempo de revenido menores valores de resistencia a la tracción.

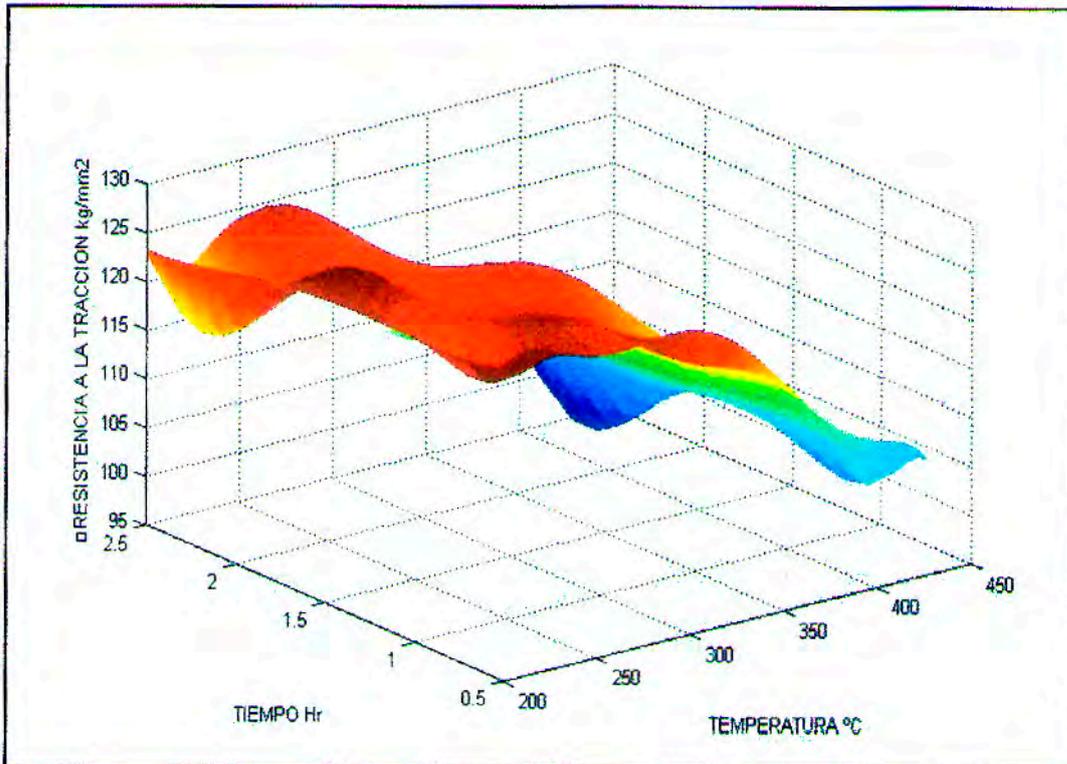


Figura N° 2.4 Superficie de respuesta tridimensional de la máxima resistencia a la tracción en función del tiempo y temperatura de revenido del acero SAE 1040.

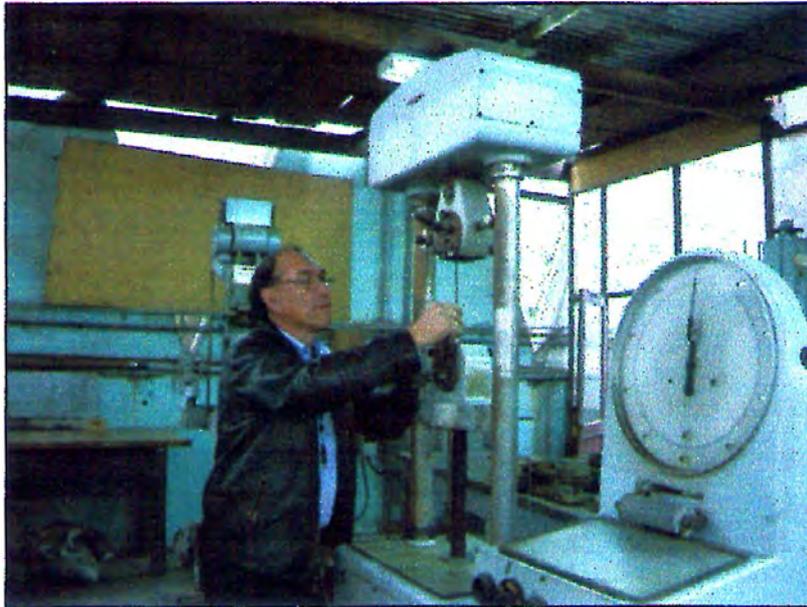


Figura N° 2.5 Maquina de ensayo de tracción.

CAPITULO III

ENSAYO DE DUREZA

3.1 ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C

En las aplicaciones de la ingeniería se define la dureza de los metales como la resistencia a la penetración por compresión de un indentador con una determinada carga, produciendo una deformación plástica y deja una marca. El indentador está fabricado con un material de mayor dureza, y en el caso de este estudio se usará el ensayo de dureza Rockwell C el cual usa el diamante como indentador. La dureza es el resultado de la compresión del indentador de diamante sobre la probeta de acero SAE 1040 con una carga inicial ó precarga de 10 Kg (Po). se coloca la aguja en cero, luego se agrega una carga de 140 Kg (P1). dando una suma total de $P = 150\text{Kg}$;se retira la carga P1 de 140 Kg, dejando la carga de 10Kg, cuando se estabiliza la aguja se procede a leer la medida de la dureza. Se usa la escala Rockwell C debido a que los materiales que vamos a medir su dureza es el acero SAE 1040 templado y revenido y no se puede usar las otras escalas por que se usan para materiales de menor dureza.

Para la calibración de la maquina se coloca primero el calibre patrón sobre el soporte rígido del durómetro, a continuación se harán ensayos consecutivos hasta alcanzar como mínimo tres lecturas, verificando que la carga inicial sea de 10 Kg., después se hace coincidir la aguja con el cero del dial indicador de la dureza Rockwell C, se aplica los 140 Kg. completando una carga de 150 Kg. y manteniendo unos 15 segundos hasta que la aguja se estabilice, se retira la carga de 140 Kg, procediendo a leer el valor de la dureza.

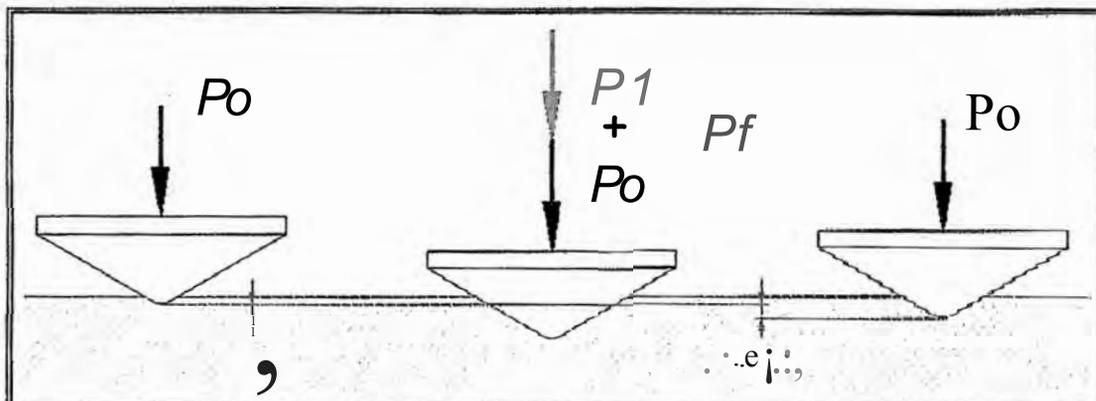


Figura N° 31 Proceso del ensayo de dureza Rockwell C, en la Figura:
 $P_0 = 10 \text{ Kg}$, $P_1 = 140 \text{ Kg}$, $P_t = 150 \text{ Kg}$.

3.2 NORMA ASTM E18.

Según la norma ASTM E18, Test Method for Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials, donde una unidad de la escala Rockwell C equivale a 0.002 mm de profundidad en la probeta. La dureza Rockwell **C** (HRC) se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{HRC} = 100 - e$$

Donde:

$$e = \frac{h - h_0}{0.02}$$

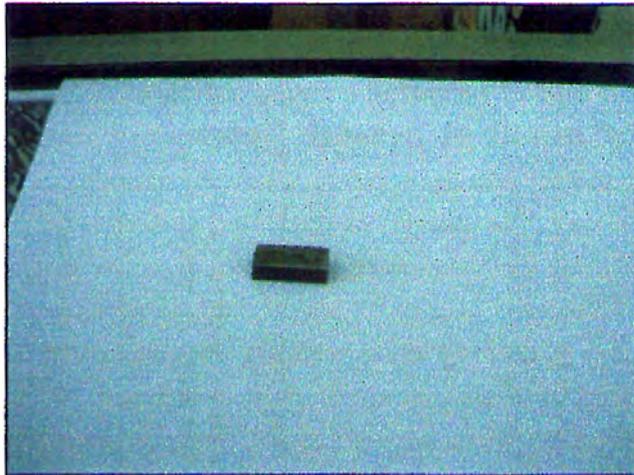


Figura N° 3.2 Probeta rectificada para ensayo de Dureza



Figura N° 3.3 Maquina de ensayo de dureza Rockwell C.

3.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C

Después del temple se realizó el revenido a diferentes temperaturas y tiempo, se midió la dureza Rockwell C de las probetas de acero SAE1040, los resultados se muestran en la Tabla N° 3.1, sabiendo que una probeta templada en agua tiene una dureza de 56 HRC.

Tabla N°3.1 Resultados del ensayo de máxima resistencia a la tracción de probetas templadas y revenidas del acero SAE 1040₁ en función de la temperatura y tiempos.

N°	TOC	Tiempo hr.	Ensayo de dureza Rockwell c (HRC)
1	200	1.5	52.2
2	275	2.5	42.3
3	425	2.5	36.0
4	500	1.5	25.4
5	425	0.5	41.2
6	275	0.5	50.0
7	350	1.5	40.2
8	350	2.5	39.1
9	350	2.0	39.2
10	350	1.0	42.2
11	350	0.5	43.0
12	200	2.5	48.2
13	200	2.0	50.3
14	200	1.0	54.2
15	200	0.5	55.0
16	237.5	2.5	44.0
17	237.5	2.0	48.1
18	237.5	1.5	50.2
19	237.5	1.0	52.1
20	237.5	0.5	53.0
21	312.5	2.5	41.0
22	312.5	2.0	43.1
23	312.5	1.5	44.2
24	312.5	1.0	45.2
25	312.5	0.5	46.2
26	275	2.0	46.0
27	275	1.5	47.0
28	275	1.0	48.1
29	387.5	2.5	38.1
30	387.5	2.0	38.4
31	387.5	1.5	39.2
32	387.5	1.0	40.3
33	387.5	0.5	42.4
34	425	1.5	37.0
35	425	1.0	38.2
36	425	0.5	40.3

3.4 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C.

Los datos obtenidos en la Tabla N° 3.1 han sido graficados en tres dimensiones, teniendo como variables el tiempo y la temperatura, se puede apreciar que a mayor temperatura del revenido la dureza del acero disminuye.

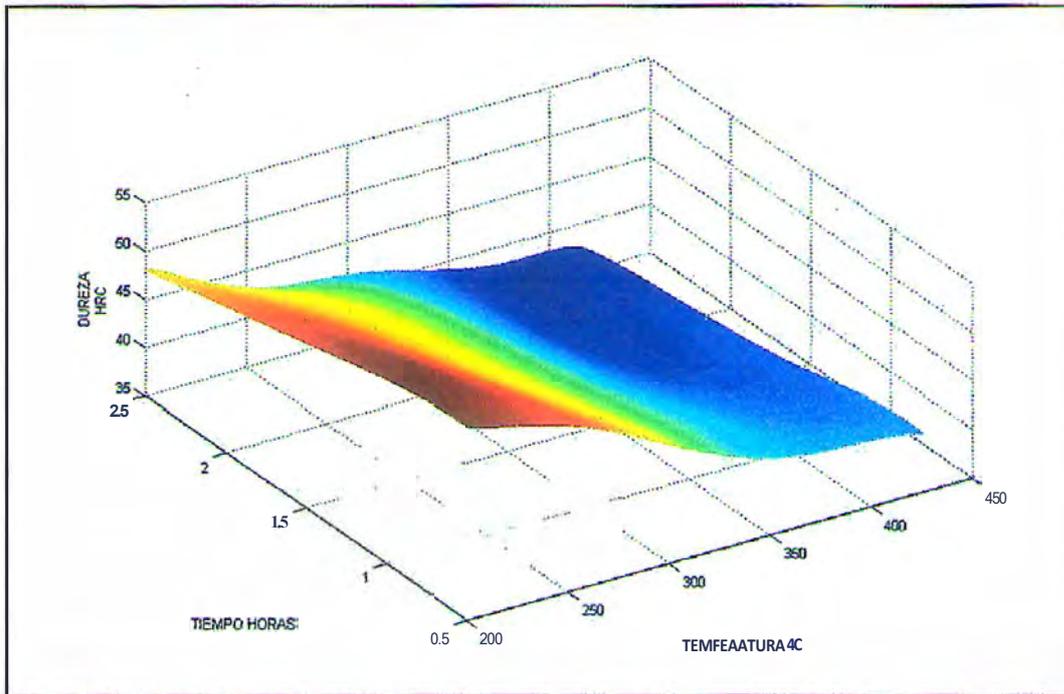


Figura N°3.4 Superficie de respuesta tridimensional de Dureza Rockwell C en función del tiempo y Temperatura de revenido del acero SAE 1040.

CAPITULO IV

ENSAYO DE CHOQUE O DE IMPACTO

4.1 ENSAYO DE IMPACTO CHARPY

Se sabe que los ensayos estáticos de tracción permiten conocer la capacidad de resistencia y deformación de un material cuando se le somete a un esfuerzo lento y progresivo, estas propiedades pueden variar cuando el material soporta tensiones dinámicas sucesivas y se puede originar su fractura, es por este motivo que es conveniente analizar el comportamiento de dicho material con ensayos de impacto; debido a que las propiedades mecánicas de los materiales sometidos a sollicitaciones dinámicos de choque son modificadas sensiblemente.

El ensayo de tracción estático nos da muy buenos valores de la ductilidad de un material, pero no nos precisa su grado de tenacidad ó fragilidad en diversas condiciones de trabajo.

Los ensayos de choque nos mide la capacidad de un material de absorber cargas instantáneas debido a que las probetas (Charpy} son sometidas a un solo impacto produciéndose su fractura. Este concepto es importante cuando se va a diseñar piezas de equipos ó estructuras sometidas a diferentes factores y nos puede indicar si fallará por su fragilidad. En los estudios realizados se ha podido comprobar que las fallas por fragilidad son: las bajas temperaturas a las que son expuestas los materiales, los cambios bruscos en la velocidad de deformación por la variación brusca de la carga aplicada y por la acumulación de tensiones generadas por el efecto de forma de las piezas debido a que en las zonas con entallas o

cambios bruscos geométricos generan picos de alta tensión produciendo fisuras.

4.2 METODO DEL ENSAYO CHARPY.

El método propuesto por Charpy, consiste en romper la probeta que se está ensayando bajo el efecto dinámico que se produce sobre la misma por una masa del martillo que impacta sobre la probeta. La rotura se produce por flexionamiento, es por este motivo que algunos autores lo denominan flexión por choque.

En este método el péndulo Charpy nos mide la energía requerida para provocar la rotura de la probeta en la sección transversal entallada, esta energía puede medirse en Joule, Kilogrametro-metro ó libra-pie.

Cuando se mide la Resiliencia se divide la energía por el área de la sección transversal entallada.

$$\text{Resiliencia} = \frac{E \text{ (energía)}}{\text{Area}}$$

Se usara la norma ASTM E 23 (Standard Test Methods for Notched Bar impact Testing of Metallic Materials), la cual nos da las dimensiones de la probeta con entalla en V. La Figura N° 4.1 nos indica la forma en que se debe de realizar las pruebas.

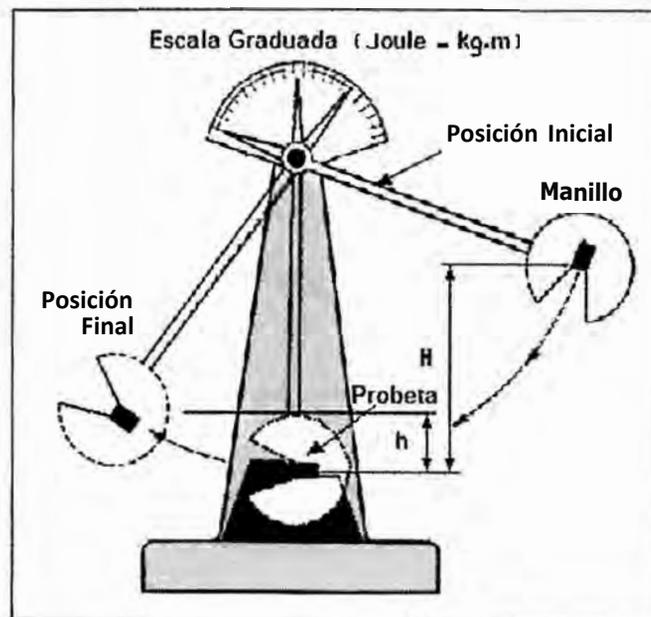


Figura N° 4.1 Péndulo usado para el ensayo Charpy.

El ensayo de choque por el método Charpy se inicia colocando la probeta en los apoyos de tal forma que la entalladura esté en el lado opuesto al que se va a recibir el impacto con el martillo. En la Figura N° 4.2 se puede observar la posición de la probeta, la norma A.S.T.M E-23, indica que la luz entre los apoyos es de 40 mm.

Para iniciar el ensayo se coloca el martillo de masa M en una altura H del péndulo, luego se deja caer el martillo chocando sobre la probeta produciéndose la rotura, obteniéndose una altura h .

Si la energía inicial del martillo (ver Figura N° 4.1) es E_1 y su energía final E_2 , entonces la energía empleada para romper la probeta será la diferencia entre la energía inicial y final del martillo, tal como se puede ver en la ecuación N° 1.

$$E_0 = E_1 - E_2$$

$$E_1 = M.H \text{ y}$$

$$E_2 = M.h$$

$$E_0 = M (H-h), \text{ Joule, ó Kg-m.}$$

(1)

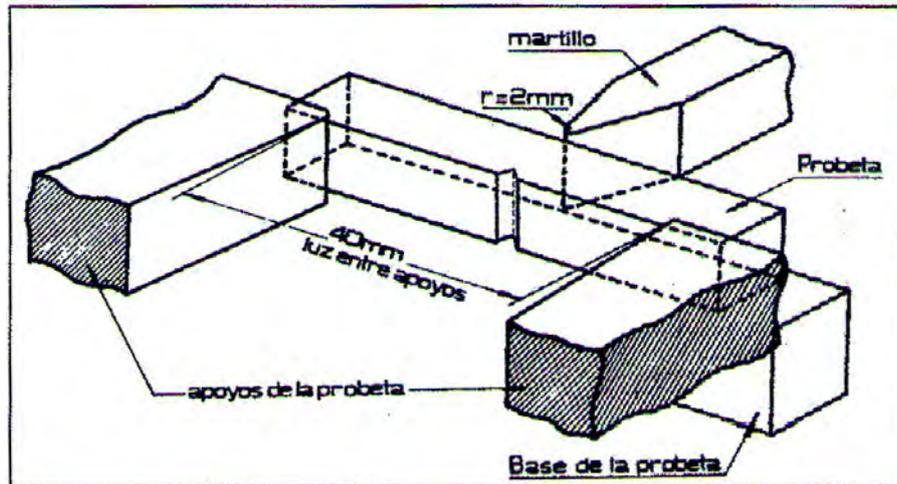


Figura N° 4.2 Posición de la probeta en el ensayo Charpy

La probeta normalizada para el ensayo Charpy se muestra en la Figura N° 4.3, tiene una longitud de 50 mm, su sección es de 10x10 mm, y la entalla es en V a 45°, profundizándose la entalla hasta una altura de 2mm, teniendo un radio de curvatura de 0.25 mm en el fondo de la misma.

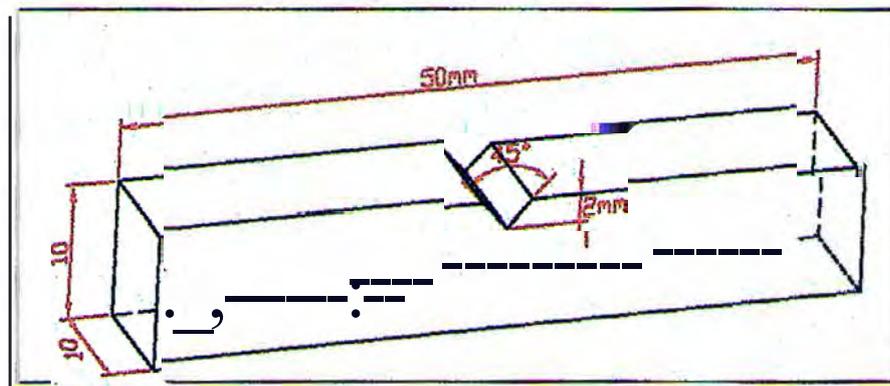


Figura N° 4.3 Probeta usada en el ensayo Charpy, usado para materiales ferrosos.

4.3 TEMPERATURA DE TRANSICION.

Es el rango de temperaturas donde se produce la transición de la zona frágil a la zona dúctil.

En los ensayos de impacto en el método Charpy, se demuestra que a temperaturas mayores los materiales soportan mayor energía de impacto ó sea que tienen mayor tenacidad, hasta estabilizarse y al no

existir una única temperatura de transición la zona de transición podrá adoptarse en forma convencional ya que varía de acuerdo al tipo de acero, tal como puede apreciarse en la Figura N° 4.4. A temperaturas mayores a la temperatura de transición se encuentra la zona dúctil y a temperaturas menores se encuentra la zona frágil.

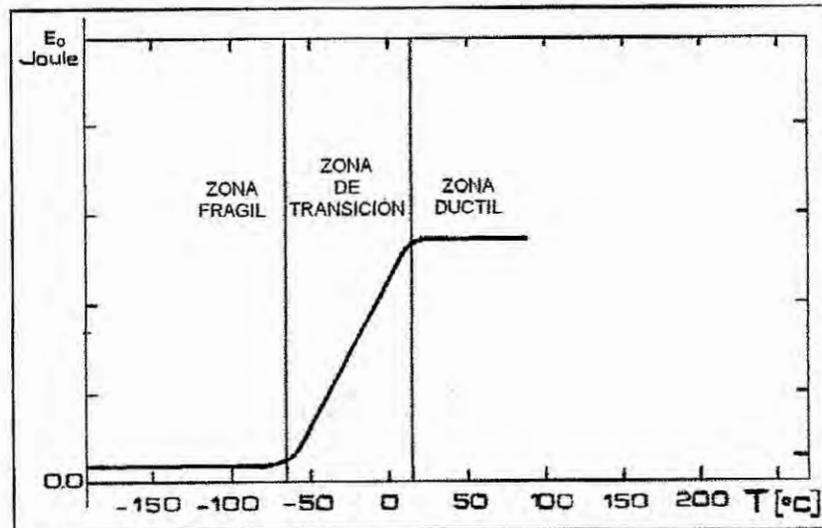


Figura N° 4.4 Zona de transición.

4.4 EFECTO DEL CARBONO.

Al aumentar el contenido de Carbono en el acero se incrementa la cantidad de la estructura perlítica, produciéndose una disminución de la tenacidad del acero tal como se puede ver en la Figura N° 4.5.

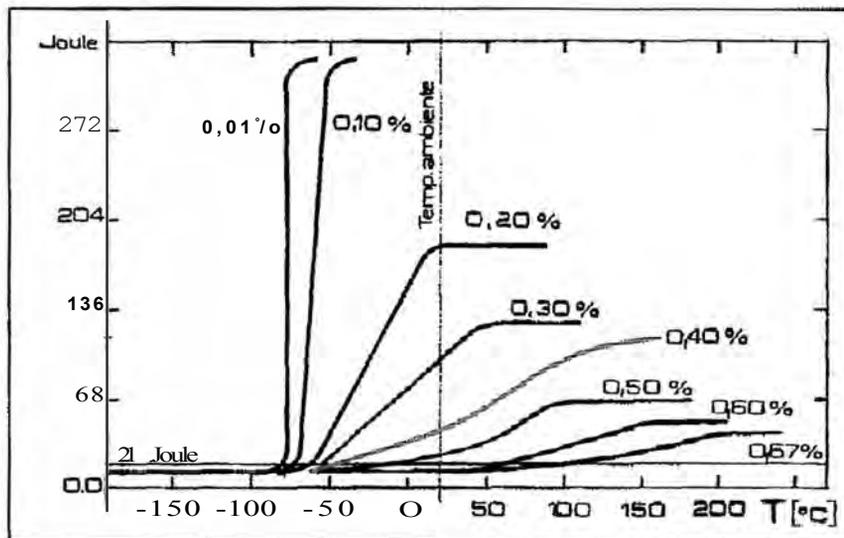


Figura N° 4.5 Efecto del Carbono en la tenacidad del acero normalizado.

4.5 EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO EN LA TENACIDAD DEL ACERO.

Cuando se producen cambios en la estructura del acero debido a diferentes tipos de tratamientos térmicos, como es en el caso de esta tesis, el temple y revenido a diferentes temperaturas y tiempos, se obtienen diferentes propiedades mecánicas.

A pesar que existen diferentes factores que condicionan la fractura de los materiales, es el efecto de la temperatura el más importante, es por este motivo que los ingenieros especialistas en materiales desean conocer la temperatura de transición dúctil - frágil cuando el material va a trabajar a temperaturas muy bajas, pero en esta tesis vamos a estudiar el esfuerzo al impacto de probetas a temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) templadas y revenidas.

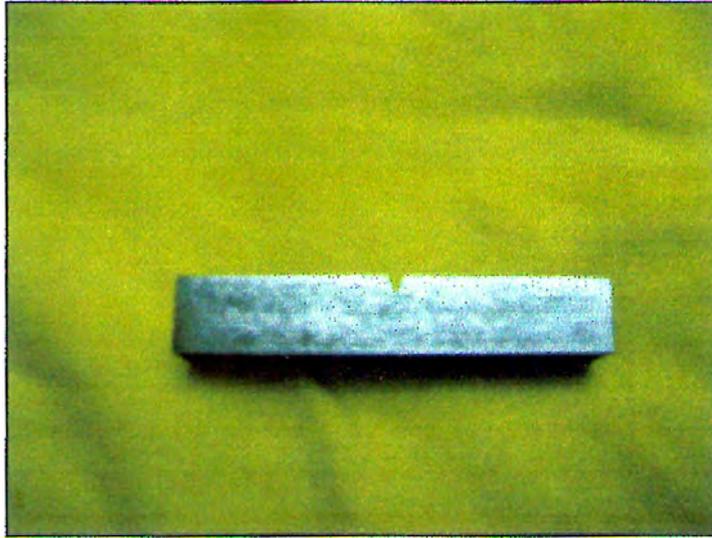


Figura N° 4.6 Probeta usada en las pruebas de impacto

4.6 RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO CHARPY

Después del temple y Revenido a diferentes temperaturas y diferentes tiempos (teniendo en cuenta el diseño hexagonal) de las probetas del acero SAE 1040, se tienen los siguientes resultados en la Tabla N° 4.1, sabiendo que una probeta templada obtiene un valor de 16 Joule.

Tabla N° 4.1 Resultados del ensayo de impacto de probetas templadas y revenidas en función de la temperatura y tiempos.

N°	T° C	Tiempo hr.	Ensayo de impacto Charpy Joule, J
1	200	1.5	21.0
2	275	2.5	23.5
3	425	2.5	48.0
4	500	1.5	62.0
5	425	0.5	36.0
6	275	0.5	21.5
7	350	1.5	31.0
8	350	2.5	33.3
9	350	2.0	32.0
10	350	1.0	30.0
11	350	0.5	28.0
12	200	2.5	22.5
13	200	2.0	22.0
14	200	1.0	20.0
15	200	0.5	19.0
16	237.5	2.5	24.0
17	237.5	2.0	22.5
18	237.5	1.5	23.0
19	237.5	1.0	21.0
20	237.5	0.5	20.0
21	312.5	2.5	25.0
22	312.5	2.0	24.0
23	312.5	1.5	22.0
24	312.5	1.0	23.0
25	312.5	0.5	22.0
26	275	2.0	23.0
27	275	1.5	22.5
28	275	1.0	22.0
29	387.5	2.5	35.2
30	387.5	2.0	34.0
31	387.5	1.5	33.5
32	387.5	1.0	32.2
33	387.5	0.5	30.2
34	425	2.0	46.2
35	425	1.5	42.0
36	425	1.0	40.3

4.7 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ENSAYO DE IMPACTO CHARPY.

Los resultados obtenidos en la Tabla N° 4.1 han sido graficados en tres dimensiones, teniendo como variables el tiempo y la temperatura, se puede apreciar que a mayor temperatura del revenido la resistencia al impacto del acero aumenta, obteniéndose mayor tenacidad con valores de 30 a 40 Joule a la temperatura de revenido entre 350 a 450°C.

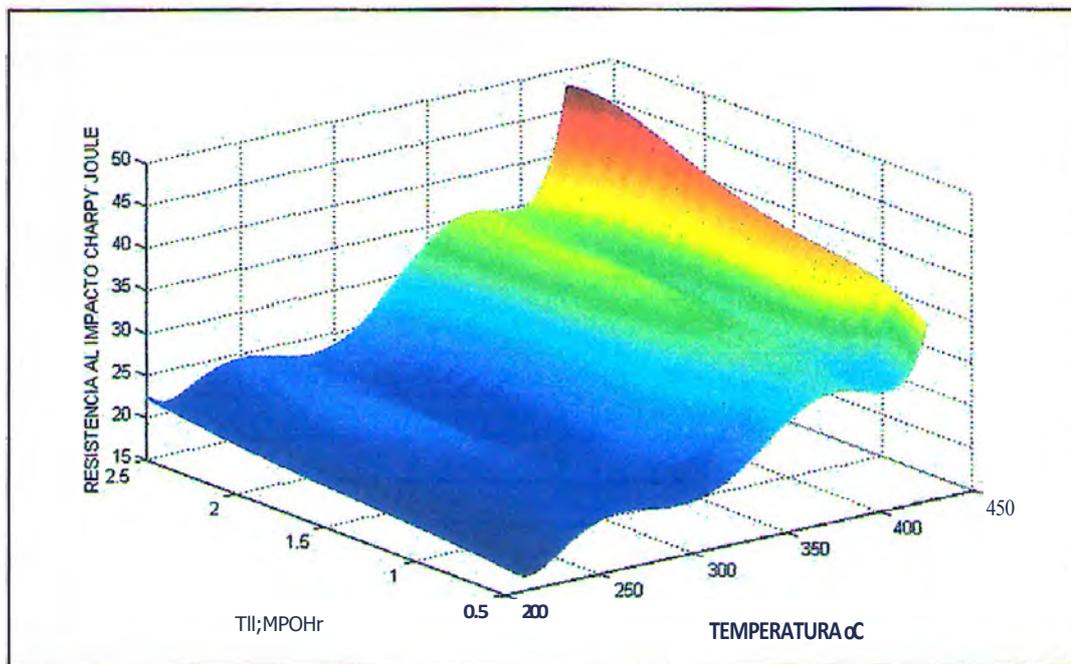


Figura N° 4.7 Superficie de respuesta tridimensional del ensayo de impacto Charpy en función del tiempo y temperatura de revenido del acero SAE 1040.



Figura N° 4.8 Maquina de ensayo de impacto Charpy con el martillo de 18.7 Kg. en posición inicial.



Figura N° 4.9 Maquina de ensayo de impacto de 30 Kg-m (294 J).

CONCLUSIONES

Al culminar los 36 ensayos de tensión, de dureza Rockwell C y de impacto; y, teniendo como propiedades mecánicas iniciales del acero (normalizado) SAE 1040, (composición química de: 0.4%C, 0.71%Si, 0.62%Mn, 0.04%5 y 0.042%P) con una resistencia máxima a la tracción de 63.2 Kg/mm², tamaño de grano número 7 ASTM (35um), dureza de 22 a 24 HRC; y despues del templado a 850° C (dureza a 55,5 HRC) y del revenido, se llega a las siguientes resultados:

1. Que entre la temperatura de revenido de 200° C y 275° C, la máxima resistencia a la tracción disminuye desde 126.5 Kg/mm² a 123.5 Kg/mm², la dureza disminuye desde 52.2 HRC a 47HRC, pero la resistencia al impacto aumenta de 21 a 23 Joule, mejorando su tenacidad.
2. Con una temperatura de revenido entre 275° C y 350° C la máxima resistencia a la tracción varia entre 123.5 a 110 Kg/mm², la dureza disminuye de 47 a 39.1 HRC, pero la resistencia al impacto aumenta de 23 a 33.3 Joule, aumentando su tenacidad.
3. Con una temperatura de revenido entre 350° C y 425° C la máxima resistencia a la tracción varia entre 110 a 103 Kg/mm², la dureza disminuye de 39.1 a 37.0 HRC, pero la resistencia al impacto aumenta de 33.3 a 46.2 Joule, mejorando notablemente su tenacidad.

4. Aplicación del acero SAE 1040
- Pernos de alta resistencia, por ejemplo:
Norma ASTM 49: 91 Kg/mm² mínimo, 34 HRC, 30 J.
Con el Tratamiento Térmico de Revenido se tiene las siguientes opciones:
 - 350° C - 1.0 hr, 42.2HRC, 117.4 Kg/mm², 30J - menor costo
 - 350° C - 1.5 hr, 40.2HRC, 115.4 Kg/mm², 31J.



Figura N° 5.1 Perno de alta resistencia.

- Barreta para desquinche minero; 4448 HRC, 21-24J.
Con el Tratamiento Térmico de Revenido se tiene las siguientes opciones:
 - 350.5° C, - 0.5 hr. 43 HRC, 21.5J, 123.5 Kg/mm², menor costo
 - 350.5° C, - 2 hr. 43.1 HRC, 24J, 115 Kg/mm²

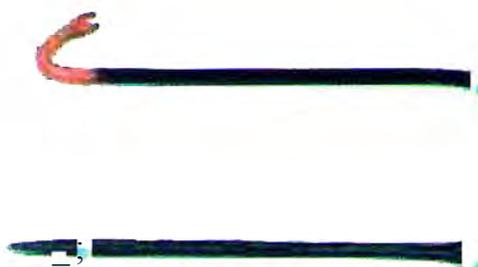


Figura N° 5.2 Barreta para desquinche.

- Pernos de anclaje para mina, utilizado en sostenimiento de rocas.
Con el Tratamiento Térmico de Revenido se tiene las siguientes opciones:

350° C - 1 hr, 117 Kg/mm², 30J, - menor costo

387.5° C - 1 hr, 109 Kg/mm², 32J

- 425° C - 1.5 hr, 103.5 Kg/mm², 42J.

Se usa acero con una resistencia a la tracción

ASTM A 615 - Grado 75, 70.4 Kg/mm² y 30J,

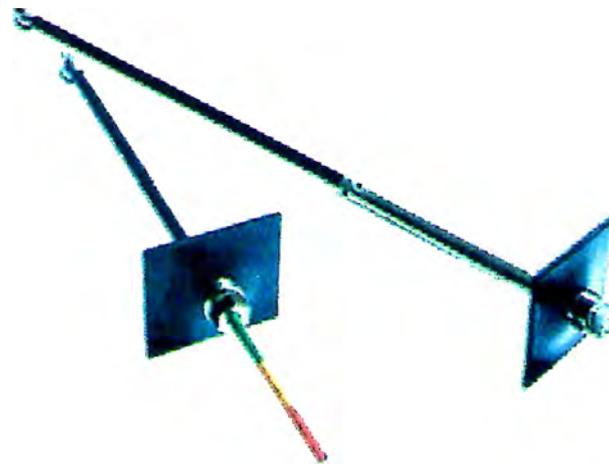


Figura N° 5.3 Pernos de anclaje para mina.

Calculo de costo de revenido

$$Z = \frac{T^{\circ}C}{Vel. Cal(\frac{\circ C}{h})} \times \frac{XctmS/}{Kwh} \times PKw + t(h) \times \frac{XctmS/}{Kwh} \times PKw$$

Donde:

Z = Costo en Nuevos soles

T = Temperatura de revenido en ° C

VelCal = Velocidad calentamiento del horno (° C/Hr)

P = Potencia del horno en Kw

X = Costo de energía eléctrica en ctms/./Kwh

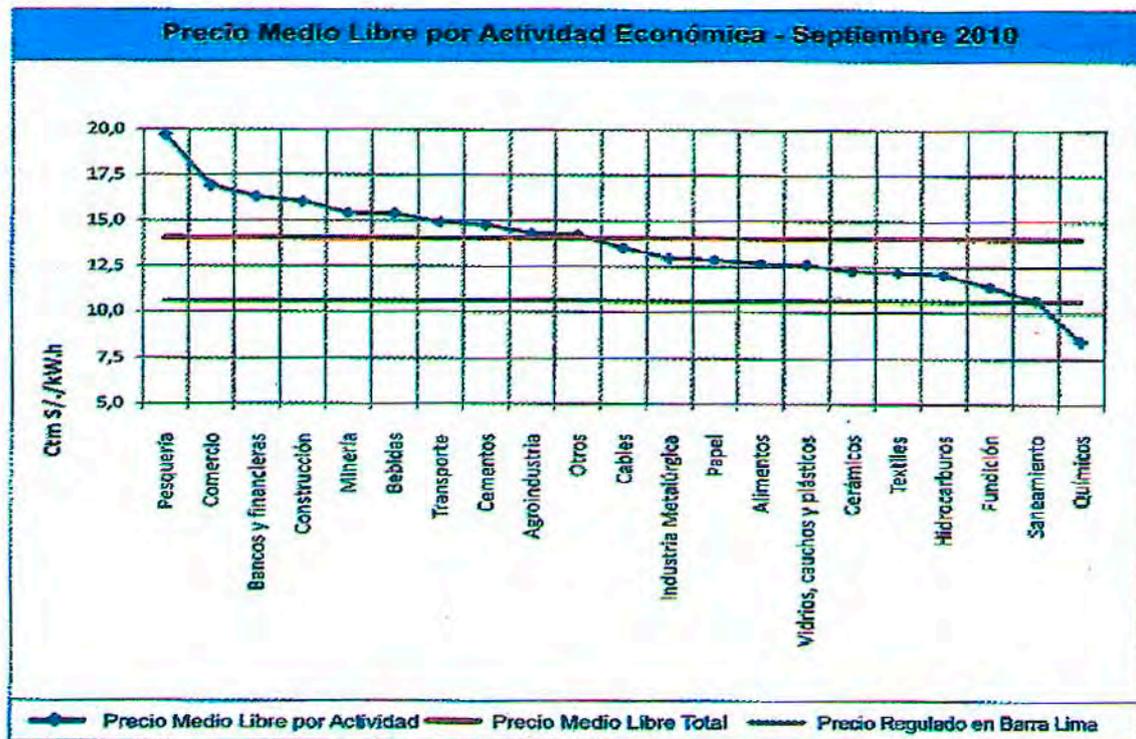


Figura N° 5.4 Costos de energía eléctrica (OSINERGMIN).

Aplicando la formula de costo de revenido se tiene:

Pernos de anclaje ASTM A615- Grado 75: 70.4 Kg/mm² y 30J.

Caso A) : 425°C - 1.5Hr. 103.5 Kg/mm² y 42 J.

Caso B) : 350°C - 1Hr. 117 Kg/mm² y 30 J.

Caso C) : 387.5°C - 1Hr. 109 Kg/mm² y 32.2 J.

$$Z = \frac{T^{\circ}\text{C}}{\text{VelCal} \frac{\text{Hr}}{\text{Hr}}} \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} + t(\text{Hr}) \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW}$$

$$Z_A = \frac{425^{\circ}\text{C}}{180 \frac{\text{Hr}}{\text{Hr}}} \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} + 1.5(\text{Hr}) \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} = 250.0\text{ctmS/} = \text{S/} 2.50$$

$$Z_B = \frac{350^{\circ}\text{C}}{180 \frac{\text{Hr}}{\text{Hr}}} \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} + 1.0(\text{Hr}) \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} = 191.13\text{ctmS/} = \text{S/} 1.91$$

$$Z_C = \frac{387.5^{\circ}\text{C}}{180 \frac{\text{Hr}}{\text{Hr}}} \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} + 1.0(\text{Hr}) \times \frac{13\text{ctmS/}}{\text{KwHr}} \times 5\text{KW} = 204.9\text{ctmS/} = \text{S/} 2.05$$



Figura N° 5.5 Costos en función del proceso de temple y revenido.

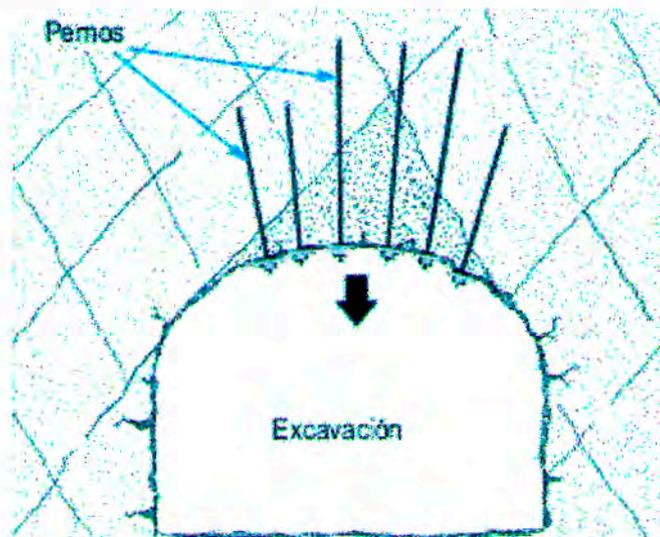


Figura N° 5.5 Uso de los pernos de anclaje – minas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar este tipo de ensayos con diferentes tipos de aceros de menor valor económico y poder llegar a las propiedades mecánicas de aceros aleados que tienen un costo mayor. En el acero SAE 1040 se recomienda desarrollar otros tipos de ensayos después de haber sido templado y revenido, como el ensayo de torsión, el ensayo de fatiga, el ensayo al corte, equipos que deben de ser adquiridos, para conocer el desempeño de este material con estas sollicitaciones.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ZACKAY, V.F. HIGH STRENGTH MATERIALS. Edit. John Wiley & Sons, USA 1992.
- [2] REED-HILL, VAN NOSTRAND. PHYSICAL METALLURGY PRINCIPLES, Edit CECSA .USA .1989.
- [3] DIETER, G. MECHANICAL METALLURGY. Edit Me Graw Hill. USA. 1990.
- [4] SMITH. W.F. STRUCTURE AND PROPERTIES OF ENGINEERING ALLOYS, Edit. Me Graw-Hill. USA. 1998.
- [5] KRAUS. G. PRINCIPLES OF HEAT TREATMENT OF STEEL. ASM HEAT TREATING, Vol. 4 ASM Edit Michael Baucio. 1996.
- [6] ASKELAND, D.R. THE SCIENCE AND ENGINEERING OF MATERIALS, Edit Me Graw Hill. USA, 1998.
- [7] SIEBERT. C.A. HARDENABILITY OF STEEL, ASM Edit. Michael Baucio. USA. 1998.
- [8] WILLIAM F, SMITH. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Edit Me Graw Hill. España. 1998.
- [9] ASM-TRANSFORMATION DIAGRAMS. Engineered Materials Handbook. Edit. ASM International .1987
- [10] BINARY PHASE DIAGRAMS. Engineered Materials Handbook. Edit ASM International .1987
- [11] C.S. BARRET . Structure far Metals, Edit Pergamon 1989.
- [12] HUGH BAKER, Alloy Phase Diagrams; ASM Handbook. Edit American Society for Metals , USA.. 1995.
- (13) MICHAEL F. ASHBY. Materiales para Ingeniería. Edit Reverte. Barcelona 2009.

- [14] **STEELS SELECTION**, R.F. Kern, M.E. Suess. Edit. Me Graw Hill 1992.
- [15] **G. AGGEN**, Properties and Selection: Iron, Steels; ASM Handbook, Edit ASM International USA. 1995.
- [16] **KERN, R.F. y SUESS, M.** Steel Selection, Edit .John Wiley,USA. 1985.
- [17] **ASHBY, M.F.** The Engineering Properties of Materials, Edit Acta Metallurgical 1990.
- (18) **PAT L MANGONON.** Ciencia de los Materiales. Edit Luis Vasquez Mexico 2001.
- [19] **DOWLING, N.E.** Mechanical Behavior of Materials, Edit . Prentice Hall 1993.
- [20] **ANDERSON, R.C.** Inspection of Metals: Destructive Testing, Edit ASM International .USA 1988
- [21] **HOLT, J.M.** Charpy impact Test: Factors and variables. Edit ASTM. 1990.
- (22) **WILLIAM C. LESLIE.** The Physical Metallurgy of Steels. Edit Me Graw Hill. USA .1985