

**DETERMINACION DE PARAMETROS OPTIMOS DEL PROCESO DE TEMPLE
Y REVENIDO DEL ACERO SAE 6150 COMO ALTERNATIVA PARA LA
MANUFACTURA DE RESORTES DE BALLESTA**

LIDA CIELO PANTOJA ROSERO

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2006**

**DETERMINACION DE PARAMETROS OPTIMOS DEL PROCESO DE TEMPLE
DEL ACERO SAE 6150 COMO ALTERNATIVA PARA LA MANUFACTURA DE
RESORTES**

LIDA CIELO PANTOJA ROSERO

**Trabajo de grado para optar al titulo de
Ingeniera Mecánica**

**Directora
NELLY CECILIA ALBA DE SANCHEZ
Doctora en Ciencias Físicas**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2006**

Nota de Aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniera Mecánica.

Ing. EFRAIN SANCHEZ _____

Jurado

Ing. HECTOR SANCHEZ _____

Jurado

Santiago de Cali, 26 de mayo de 2006

A mi familia que me apoyo todo el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

La Dra. Alba Nelly de Sánchez, Directora del Grupo de Ciencia e Ingeniería de los materiales de la Universidad Autónoma de Occidente y Directora del presente trabajo de grado.

Al Ingeniero Héctor Jaramillo, Director de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Occidente.

Al Ingeniero Juan Pablo Cañizales, Joven Investigador del Grupo de Ciencia e Ingeniería de los materiales de la Universidad Autónoma de Occidente.

Al Ingeniero Armando Bacca, Joven Investigador del Grupo de Ciencia e Ingeniería de los materiales de la Universidad Autónoma de Occidente.

Al Ingeniero Oscar Missas, Asesor en Ingeniería Metalúrgica.

Al personal del laboratorio de la Universidad Autónoma de Occidente.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCION	12
1. GENERALIDADES	13
1.1 ENTORNO	13
1.1.1 El Sector de Resortes	13
1.1.2 Comercio Nacional	13
1.1.3 Competencia	14
1.1.4 Productos	14
1.1.5 Estrategias de Mercadeo	14
1.1.6 Proveedores.	15
1.1.7 Consumidores.	15
1.1.8 Nivel Tecnológico.	15
2. DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL	16
2.1 IDENTIFICACION DE OPORTUNIDADES DE MEJORAMIENTO	16
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	17
3.1 CONTEXTO TEORICO	17
3.1.1 Investigaciones recientes	17
3.1.2 Ensayos mecánicos de los aceros	19
3.1.3 Influencia de diversos factores en el temple de los aceros	20
3.1.4 Influencia de diversos factores en el temple de los aceros	20
3.1.4.1 Influencia de la composición	20
3.1.4.2 Influencia del tamaño de grano	21

	Pág.	
3.1.4.3	Influencia del tamaño de las piezas	21
3.1.4.4	Influencia del medio de enfriamiento	21
3.2	DETALLES EXPERIMENTALES	22
3.2.1	Metodología	22
3.2.2	Ensayo Jominy	23
3.2.3	Análisis Metalográfico	26
3.2.3.1	Análisis de los aceros en estado de suministro	26
3.2.3.2	Análisis de los aceros con tratamiento térmico de bonificado	28
3.2.4	Ensayo de tensión	34
3.2.4.1	Ensayo de tensión al acero en estado de suministro	34
3.2.4.2	Ensayo de tensión al acero con tratamiento térmico	36
3.2.5	Ensayo Charpy	38
4.	COMPARATIVO ENTRE EL ACERO SAE 6150 Y SAE 5160	40
4.1	VENTAJAS	41
4.2	DESVENTAJAS	40
4.3	COSTOS	41
5.	CONCLUSIONES	42
6.	RECOMENDACIONES	43
	BIBLIOGRAGFIA	44

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Resultado del ensayo Jominy sobre los aceros SAE 5160 y SAE 6150.	23
Tabla 2. Resultados metalográficos y de dureza de los aceros en estudio.	28
Tabla 3. Parámetros del proceso	28
Tabla 4. Temperaturas de las probetas de acero SAE 5160 durante el proceso de temple.	29
Tabla 5. Resultados de pruebas del acero SAE 5160 con tratamiento térmico de bonificado.	29
Tabla 6. Resultados de ensayos de temple y revenido a 430 °C para el acero SAE 6150	31
Tabla 7. Resultados de ensayos de temple y revenido a 460 °C para el acero SAE 6150	32
Tabla 8. Resultados de ensayos de temple y revenido a 490 °C para el acero SAE 6150	32
Tabla 9. Parámetros establecidos del procesamiento del acero SAE 6150	33
Tabla 10. Condiciones de las probetas de acero SAE 6150 durante el proceso de temple	33
Tabla 11. Resultados de Análisis Metalográfico y Dureza	34
Tabla 12. Resultados ensayos de tracción de los aceros en estado de suministro	35
Tabla 13. Resultados ensayos de tracción de los aceros en con tratamiento térmico de bonificado	36
Tabla 14. Resultados ensayo de impacto sobre los aceros en estado de suministro.	38
Tabla 15. Resultados ensayo de impacto sobre los aceros con tratamiento térmico de bonificado.	38
Tabla 16. Relación Costo-Beneficio para el primer año	41

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Resultados ensayo Jominy del acero SAE 5160.	25
Figura 2. Resultados ensayo Jominy del acero SAE	25
Figura 3. Estructura metalográfica acero SAE 5160 en estado de suministro, (nital al 2% a 20X).	26
Figura 4. Estructura metalográfica acero SAE 6150 en estado de suministro atacadas (nital al 2% a 20X).	27
Figura 5. Estructura metalográfica de la superficie del acero SAE 5160 con tratamiento de bonificado, (nital al 2% a 50X).	30
Figura 6. Microestructura del acero SAE 5160 con tratamiento térmico de bonificado a 12.5 mm del borde, (nital al 2%, a 20X).	30
Figura 7. Estructura metalográfica en el núcleo del acero SAE 6150 a 15 mm del borde (nital al 2% a 50X).	33
Figura 8. Estructura metalográfica en la superficie del acero SAE 6150 (nital al 2% a 20X).	34
Figura 9. Resultados ensayo de tracción del acero 5160 en estado de suministro	35
Figura 10. Resultados ensayo de tracción del acero 6150 en estado de suministro	36
Figura 11. Resultados ensayo de tracción al acero SAE 5160 con tratamiento térmico de bonificado	37
Figura 12. Resultados ensayo de tracción al acero SAE 6150 con tratamiento térmico de bonificado.	37

RESUMEN

El estudio que se llevó a cabo en el presente proyecto de investigación, enmarca la determinación de los parámetros óptimos de temple y revenido para el acero SAE 6150 como opción para la manufactura de resortes. Adicionalmente se compararon las propiedades mecánicas con el acero SAE 5160 utilizado actualmente en el proceso de fabricación. La investigación se realizó con el Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente, al encontrar durante los análisis metalográficos del acero SAE 5160, para calibres o diámetros mayores a 20 mm un estado perlítico en el núcleo. La presencia de ésta fase, perjudica la calidad de los resortes y con el objeto de obviar este problema los aceros se estudiaron en estado de suministro y después de realizar el tratamiento térmico de temple y revenido determinándose que el acero SAE 6150 presenta propiedades mecánicas similares, pero con mayor templabilidad. La facultad del acero propuesto está en el elemento vanadio, que con un mínimo de 0.15% en su composición química, permite el tratamiento térmico de bonificado hasta el núcleo para espesores mayores a 20 y menores 40 mm.

Para ambos aceros se llevaron a cabo los ensayos de Jominy, tracción y Charpy. Para el acero SAE 6150 temple y revenido en distintas condiciones, determinando así los parámetros óptimos de tratamiento térmico. El acero SAE 5160 se trató térmicamente en las condiciones establecidas en el proceso actualmente. Las probetas establecidas en las pruebas, se analizaron metalográficamente.

El ensayo Jominy, evidencia mayor profundidad en el temple para el acero SAE 6150 a través de la característica dureza, logrando los valores deseados hasta espesores o diámetros de 40 mm, mientras que para el acero SAE 5160 se logra el temple hasta espesores o diámetros de 22 mm. El ensayo de tracción y ensayo

Charpy demuestran similitud para ambos aceros en el modulo de elasticidad, los esfuerzos de fluencia, esfuerzo ultimo y resiliencia.

En la determinación de los parámetros óptimos de temple y revenido del acero SAE 6150 se concluye que es necesario incrementar en 20°C la temperatura de temple del acero SAE 6150 respecto a la del acero SAE 5160. Las demás variables tienen equivalencia para ambos materiales.

Para verificar los resultados de templabilidad de la curva Jominy, se trataron probetas con espesores mayores a 20 mm en acero SAE 5160 y SAE 6150 encontrando que la fase predominante en ambos aceros es martensita revenida. Sin embargo el acero SAE 5160 presentó en el núcleo la fase perlita, bainita y austenita retenida y una dureza no homogénea al registrar en el núcleo valores de 41 Rockwell C, estando por debajo de las especificaciones de 42- 49 Rockwell C; mientras tanto el acero SAE 6150 presentó una estructura y dureza homogénea de 44 Rockwell C a través de toda la sección transversal, confirmando la hipótesis de ser un acero con mejores propiedades para los espesores mayores a 20 mm después del temple y revenido.

INTRODUCCION

Existe un alto nivel de competencia en el sector de la manufactura de resortes, situación que conduce a la búsqueda del mejoramiento continuo y la reducción de costos para satisfacer las necesidades del cliente, logrando ser competitivos en el sector automotriz. Las empresas tratan de identificar las oportunidades de mejora detectadas durante el proceso productivo y en el producto final, esto permite mantener mejor calidad para lograr mayor acogida.

Actualmente el sector de los resortes, presenta un cambio en el mercado gracias a los nuevos diseños que paulatinamente están reemplazando los clásicos resortes, que se fabrican con aceros de diámetros entre 5.4 mm y 20 mm en su mayoría. En este rango de dimensiones, es posible obtener las propiedades mecánicas y estructurales con el acero SAE 5160. Sin embargo con algunas situaciones que cambian las condiciones del producto, como su calibre que involucra el grado de templabilidad del acero es necesario desarrollar alternativas que ofrezcan la calidad deseada y es aquí donde se decide aplicar el método conocido como "Materiales de ingeniería de partes similares"³ para seleccionar el acero SAE 6150 que teóricamente tiene propiedades mecánicas similares al acero SAE 5160 y de esta forma realizar un estudio práctico que confirme la hipótesis propuesta.

³ KERN ROY, F. Steel Selection: A Guide for Improving Performance and Profits. New York: John Wiley & Sons, 1979. p. 445

1. GENERALIDADES

1.1 ENTORNO

1.1.1 El Sector de Resortes. Según el DANE⁴, los productos del sector de autopartes son alrededor del 1.27% por ciento del total de establecimientos del sector industrial y aportan el 0.37 % de la producción nacional.

Ningún producto ha sido ajeno a la entrada de las multinacionales que ante la apertura económica, vieron en Colombia la oportunidad que se les ha dado en muchos países latinoamericanos que se abren al mundo. Aunque aun faltan tratados, como el de libre comercio, la industria sigue desarrollando nuevas estrategias para mantenerse competitivamente en el mercado.⁵

1.1.2 Comercio Nacional: Según el DANE, en el primer semestre de 2005, la economía colombiana continuó fortaleciéndose, como lo confirma el crecimiento del Producto Interno Bruto, la reducción de la inflación, las bajas tasas de interés reales y el crecimiento de las reservas internacionales. El PIB creció en 4,6% con relación al mismo semestre de 2004, principalmente por el aumento de las exportaciones (10,3%), de la formación bruta de capital fijo (20,4%), del consumo final (4,8%), explicado por el aumento del consumo de gobierno (5,7%) y del consumo de los hogares (4,5%), siendo el sector de bienes durables los de mayor crecimiento(19,5%).

⁴ DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Colombia.

⁵ Colombia, resumen de las variables principales de la industria según grupos industriales [en línea]. Santa Fe de Bogotá D.C.: DANE, 2005. [Consultado en agosto, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/industria/eam.htm>

La producción industrial registró un crecimiento de 1,9%; encontrándose 3,1 puntos porcentuales por debajo del registro en igual período de 2004. Los sectores destacados fueron: la fabricación de equipos de transporte (27,3%), maquinaria y suministro eléctrico (9,7%), vidrios y productos de vidrios (8,1%), entre otros. Sin embargo, este dinamismo fue contrareestado con las disminuciones en el curtido y preparados de cueros (11,6%), hilados y textiles (8%), tejidos de punto (6%) y productos químicos (2,1%).⁶

Aunque se han visto alternativas muy positivas en el sector de resortes hay que tener en cuenta que el margen comercial del área depende del volumen de operaciones además que es uno de los sectores con mayor riesgo, por que la inversión para el desarrollo de nuevos productos o el mejoramiento de los actuales es muy alta en comparación con los demás sectores.

1.1.3 Competencia. A nivel nacional e internacional existen innumerables factorías dedicadas a la elaboración de resortes de todo tipo. Sin embargo el libre comercio puede permitir el ingreso de fabricantes extranjeros que hace mas dura la competencia.

1.1.4 Productos. En el mercado se encuentran una variedad de productos. Existen los helicoidales, los resortes belleville, resortes de ballesta, resortes de torsión, resortes de voluta. En el mercado se encuentran mas de 3000 referencias, con una expectativa de crecimiento.

1.1.5 Estrategias de Mercadeo. La estrategia de mercadeo que se aplica constantemente es la calidad del producto, el servicio y la publicidad, para un

⁶ Colombia, resumen de las variables principales de la industria según grupos industriales. [en línea]. Santa Fe de Bogotá D.C.: DANE, 2005. [Consultado 18 de abril, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/industria/eam.htm>.

mercado competitivo donde gana el que mejor calidad ofrece a los precios más competitivos.

1.1.6 Proveedores. Para suplir la principal materia prima acero se cuenta con proveedores nacionales de aceros resaltando como proveedor nacional a Sidelpa S.A. (Nacional).

1.1.7 Consumidores. Los productos van dirigidos al sector de transporte y al sector industrial principalmente. Los principales clientes son los ensambladores de vehículos, maquinaria y otros.

1.1.8 Nivel Tecnológico. Se cuenta con diversa maquinaria, con tecnología nacional y extranjera para la elaboración de resortes.

2. DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL

2.1 IDENTIFICACION DE OPORTUNIDADES DE MEJORAMIENTO

Para identificar las oportunidades de mejoramiento, se determinó que el requerimiento básico del material para la fabricación de resortes, es un grado de acero con la suficiente templabilidad, que registre una estructura martensítica a través de toda su sección.

Las necesidades llevaron a la investigación de un acero que cubriera las debilidades detectadas en la materia prima tradicional. En la búsqueda exhaustiva del material que cumpliera con las características mecánicas de los resortes e indagando sobre los diferentes elementos de aleación y su comportamiento en la composición química del acero, se determina que el SAE 6150 es el acero indicado ya que teóricamente cumple con propiedades mecánicas similares a las del acero SAE 5160, solo que con un elemento adicional como el vanadio le permite obtener una mayor profundidad en el temple.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

Como solución al problema planteado, se llevó a cabo la investigación conjunta con el grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente, con el apoyo del Centro de Excelencia en Nuevos Materiales con el objeto de demostrar la viabilidad técnica de utilizar el acero SAE 6150 como alternativa para fabricar los resortes de calibres mayores a 20 mm y menores a 40 mm, determinando los parámetros óptimos para el proceso de temple y revenido.

3.1 CONTEXTO TEÓRICO

3.1.1 Investigaciones recientes. En el estudio de *George E. Totten; Gustavo Sánchez Sarmiento y Marcelo Castro*⁷, se investiga la transferencia de calor y las tensiones térmicas; del acero SAE 5160 tratado térmicamente en Solución polimérica en agua de PAG (Poli Alquilen Glicol) UCON HT al 25 % y aceite ARCO 521, donde los coeficientes de transferencia térmica entre la superficie de la pieza y los medios de temple son calculados con el software INC INC-PHATRAN. Las variables de entrada son a partir de las mediciones de temperaturas en las diferentes probetas durante el tratamiento térmico a través de termocuplas insertadas en el interior de las piezas tratadas. Las tensiones térmicas durante el proceso de temple se calcularon con el software ABAQUS. Los cambios térmicos se obtuvieron con simulación. Estos datos fueron tomados como entrada para simular las tensiones. Para aquellas probetas en las que las tensiones durante el tratamiento térmico superaron la tensión de fluencia, se observó la presencia de tensiones térmicas residuales.

⁷ Transferencia de calor y tensiones térmicas en el tratamiento térmico de probetas de acero para resortes. [en línea]. Santafé de Bogotá D.C.: Corporación para el acero, 2001. [Consultado 10 de noviembre, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.scs.gmu.edu/~mcastro/Abaqus.pdf>

El artículo publicado por Gonzáles, H.A. y Mesa D. H.⁸; ofrece una visión para comprender la importancia de los métodos utilizados en la selección de los materiales. Para ello, se ilustran algunos de los métodos utilizados en la selección de materiales y se resaltan las ventajas y desventajas de la propuesta convencional, gráfica o con ayuda de software (bases de datos). Estos métodos son analizados y aplicados en la selección de los materiales usados en la construcción de hojas de ballesta. Pero su principal interés es el método gráfico, propuesto por el investigador Ashby⁹.

Los tratamientos térmicos, aplicables a los dos aceros estudiados en el presente documento han sido ampliamente investigados¹⁰, ya que tienen por objeto mejorar las propiedades mecánicas de los aceros y modificar la estructura microscópica de los aceros convirtiéndolos en piezas ampliamente utilizadas en los diferentes sectores industriales.

Es muy común en los resortes realizar estudios sobre el granallado como opción para aumentar la vida útil. G.H. Rubiolo, M. Ortiz y J. Vera Alvarado¹¹, investigan el comportamiento a fatiga del acero AISI 5160 con microestructura martensítica. La presencia de tensiones residuales sobre las probetas para fatiga, se realizó mediante una granalladora a turbina utilizando granalla de acero y un tiempo de granallado fijo. La curva de vida S-N (S: límite de fatiga; N: número de ciclos) se obtuvo con la máquina de flexión rotativa. Se registra en el documento un leve incremento del límite de fatiga por efecto del granallado mientras que la vida finita a semiamplitud máxima de la tensión cíclica constante disminuye

⁸ La importancia en la selección de materiales *Scientia et Técnica* Año X. No 24; [en línea]. Pereira: UTP, 2005. [consultado 19 de septiembre, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/162249175-180.pdf>.

⁹ ASHBY M, F. *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford: Pergamon Press editors, 1992. p. 309

¹⁰ Aceros [en línea]. Santa Fe de Bogotá D.C.: Corporación del acero, 2001. [Consultado 15 noviembre, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.westarco.com/rode/Aceros.pdf>.

¹¹ Granallado de pretensionado III : Comportamiento en fatiga de alto número de ciclos [en línea]. Buenos Aires Argentina: Asociación Argentina de Materiales, 2005. [consultado 15 de septiembre, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/1009.PDF>

considerablemente. Las tensiones residuales, medidas en profundidad, evolucionan fuertemente con el ciclado reduciendo su capacidad de frenar la propagación de microfisuras.

3.1.2 Ensayos mecánicos de los aceros. El ensayo Jominy consiste en templar una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro y 100 mm de longitud, por medio de un chorro de agua que enfría solamente la base inferior. La temperatura del agua será de 20°C a 25°C. El enfriamiento con el chorro de agua se hará durante 10 minutos y luego se termina de enfriar la probeta en agua o al aire. Posteriormente se mide la dureza en la línea central de la superficie plana en puntos situados a intervalos de 1,6 mm ($1/16$ de pulgada) y se grafican los valores obtenidos construyendo la curva de templabilidad.¹²

El ensayo Rockwel, se basa en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados por un cuerpo más duro determinado en términos de profundidad. Primero se aplica una carga de 10 Kg. y luego, además de aquella, actúa otra carga mayor de 90Kg. a 140 Kg., según se emplee como cuerpo penetrador un diamante o una bola.¹³

El ensayo de tracción, es uno de los ensayos más utilizados para conocer la resistencia, límite de elasticidad, alargamiento y estricción, que son características muy importantes para juzgar la calidad de los metales y aleaciones. El ensayo se realiza mecanizando la probeta de acuerdo a las especificaciones técnicas, se divide longitudinalmente en partes iguales marcando las divisiones. Después se sujeta de las mordazas de la máquina, se cuida que las cabezas queden bien sujetas y se comienza el ensayo. A medida que aumenta la carga, la probeta se va

¹² APRAIZ BARRERO, José. Tratamientos Térmicos de los aceros 9 ed. Madrid: Dossat, 1997. p. 212.

¹³ Ibid., p. 495

estirando cada vez más hasta llegar a la fractura. El resultado del ensayo es la curva esfuerzo-deformación.¹⁴

El ensayo de impacto con péndulo Charpy: consiste en colocar el péndulo levantado y fijo siempre en un determinado punto, luego se suelta el péndulo que choca con la probeta y después de romperla sigue su camino alcanzando una cierta altura que depende de la resistencia que el material ha opuesto a su rotura. Si el péndulo alcanza poca altura el material es muy tenaz y la resiliencia grande. Si el péndulo sube mucho el material es frágil y tiene poca resiliencia.¹⁵

3.1.3 Materiales para resortes. Hay un número limitado de materiales y aleaciones adecuadas para la elaboración de resortes. El material ideal para un resorte tendría una resistencia máxima elevada, un elevado punto de fluencia y un módulo de elasticidad adecuado, a fin de proporcionar el máximo almacenamiento de energía. En el caso de resortes dinámicamente cargados, las propiedades de resistencia a la fatiga del material son de primordial importancia. A fin de obtener la resistencia requerida los materiales son sometidos a tratamientos de endurecimiento (los mas comunes son temple y revenido)¹⁶.

3.1.4 Influencia de diversos factores en el temple de los aceros

3.1.4.1 Influencia de la composición. La curva de la “S” o curva TTT (temperatura, tiempo, transformación), que ilustra las transformaciones isotérmicas de la austenita; refleja claramente la influencia que tiene la composición y el porcentaje de elementos de aleación sobre la velocidad crítica de temple. Por ejemplo al aumentar el porcentaje de manganeso y cromo las curvas se desplazan

¹⁴ Ibid., p. 513-515

¹⁵ Ibid., p. 539.

¹⁶ NORTON, ROBERT, L. Diseño de máquinas. México: Prentice Hall, 1999. p. 816

hacia la derecha, por lo tanto las velocidades de temple disminuyen al aumentar los elementos de aleación¹⁷.

3.1.4.2 Influencia del tamaño de grano. El tamaño de grano modifica la situación y forma de la curva de la “S”, modificándose, por lo tanto, como es natural, la velocidad crítica de temple. En aceros de la misma composición, las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades críticas de temple de los aceros de grano fino.¹⁸

3.1.4.3 Influencia del tamaño de las piezas. El volumen y el espesor de las piezas tiene gran importancia por que si se estudia el enfriamiento en agua de un cilindro que ha sido calentado a alta temperatura, fácilmente se comprende que la capa exterior de acero que está en contacto con el líquido, es la que se enfría primero y más rápidamente. La capa siguiente no se enfría con tanta rapidez, por que el calor no se transmite directamente al líquido sino que a través de la capa superficial de acero y ésta tiene una conductividad bastante limitada¹⁹.

3.1.4.4 Influencia del medio de enfriamiento. El medio es igualmente importante por que si se enfría en agua salada muy agitada, se obtienen altas velocidades, en cambio al enfriar en el horno se obtienen velocidades muy lentas. Con aceites se obtienen velocidades intermedias, las cuales se pueden cambiar variando la temperatura del medio y la agitación²⁰.

¹⁷ APRAIZ BARRERO, José. Tratamientos Térmicos de los aceros 9 ed. Madrid: Dossat, 1997. p. 169

¹⁸ Ibid., p. 170.

¹⁹ Ibid., p. 170.

²⁰ Ibid., p. 173-174.

3.2 DETALLES EXPERIMENTALES

3.2.1 Metodología. La obtención de materiales se realizó por importación de Canadá de 4 muestras de acero SAE 6150 de 30 cm de diámetro o espesor, ya que este acero no se fabrica a nivel nacional.

En la elaboración de las probetas para los diferentes ensayos se tuvieron en cuenta la NTC 2 (Ensayo de tracción para materiales metálicos, método de ensayo a temperatura ambiente); NTC 19 (ensayo de dureza, Ensayo de Rockwell – Escalas A-B-C-D-E-F-G-H-K), NTC 20-1 (Ensayo de impacto Charpy entalla en V); SAE J406 (Methods of Determining Hardenability of Steels, May 1998).

Se realizó el ensayo Jominy utilizando dos probetas de cada uno de los aceros en estudio, en total 4 probetas; se obtuvieron las curvas de dureza versus distancia a partir del borde de la probeta, se analizó el comportamiento de cada una de las curvas y se realizó un análisis comparativo de los resultados versus la curva teórica.

Se realizaron ensayos de temple y revenido a dieciocho (18) probetas de acero SAE 6150, para determinar los parámetros óptimos de temple y revenido.

Se prepararon cuatro (4) probetas de cada acero en estado de suministro para analizar su microestructura antes del tratamiento térmico de bonificado y posteriormente, se examinó la microestructura de cada probeta y se compararon las fases presentes en cada una de ellas.

Para determinar la resiliencia de los aceros se realizó la prueba de impacto Charpy a tres (3) probetas en estado de suministro y a tres (3) en estado bonificado de cada uno de los aceros, utilizando probetas normalizadas en total doce (12) probetas, los ensayos se realizaron a temperatura ambiente.

Utilizando la maquina UTS se realizaron ensayos de tensión a tres (3) probetas de cada uno de los dos aceros en estado de suministro y con el tratamiento térmico de bonificado para determinar la resistencia mecánica, y el modulo de elasticidad. En total doce (12) probetas analizadas.

3.2.2 Ensayo Jominy. El objeto del ensayo es construir la curva Jominy experimental, que debe estar situada en la denominada banda de templabilidad del acero establecida por la SAE (Society of Automotive Engineers) y la AISI (American Iron & Steel Institute).

En el laboratorio de la Universidad Autónoma de Occidente se realizó el ensayo Jominy a dos probetas de cada acero (en total 4) para verificar su templabilidad obteniendo los resultados presentados en la Tabla 1 y las figuras 1 y 2.

Tabla 1. Resultado del ensayo Jominy sobre los aceros SAE 5160 y SAE 6150.

ACERO SAE 5160						ACERO SAE 6150				
Distancia (mm)	HRC Max	HRC Min	Probeta 1	Probeta 2	Valores Teóricos	HRC Max	HRC Min	Probeta 1	Probeta 2	Valores Teóricos
			HRC	HRC	HRC			HRC	HRC	HRC
1,59	66,00	60,00	62,00	62,00	64,60	65,00	59,00	63,00	64,00	62,50
3,18	65,41	60,00	61,00	62,00	64,60	65,00	58,41	62,00	63,00	62,50
4,76	65,00	60,00	60,00	59,00	64,60	65,00	58,00	62,00	61,00	62,50
6,35	64,91	59,63	60,00	60,00	64,60	64,83	57,83	61,00	60,00	62,50
7,94	64,53	58,00	61,00	60,00	64,60	64,00	57,03	61,00	60,00	62,52
9,53	64,12	55,54	61,00	60,00	61,85	64,00	56,24	60,00	61,00	62,12
11,11	64,00	51,99	60,00	57,00	58,11	63,00	55,89	61,00	60,00	61,00
12,70	63,00	44,94	57,00	55,00	54,12	63,33	53,98	60,00	60,00	60,00
14,29	62,00	42,46	57,00	53,00	50,50	62,93	52,78	60,00	59,00	59,00
15,88	61,00	39,98	56,00	50,00	47,72	62,53	51,59	59,00	58,00	58,00
17,46	60,00	37,50	55,00	50,00	44,94	62,13	50,40	58,00	57,00	57,00
19,05	58,88	36,22	55,00	48,00	43,48	61,74	48,16	57,00	56,00	56,00
20,64	57,71	35,57	54,00	48,00	42,68	61,34	45,38	55,00	55,00	55,50
22,23	56,48	34,94	53,00	48,00	41,94	60,94	42,89	55,00	54,00	55,00
23,81	54,94	34,55	51,00	49,00	41,55	60,55	42,09	53,00	52,00	54,20
25,40	53,39	34,15	48,00	49,00	41,15	60,15	41,30	51,00	50,00	54,00
26,99	51,74	33,75	46,00	46,00	40,46	59,51	40,26	50,00	51,00	53,00
28,58	50,02	33,36	44,00	42,00	39,58	58,71	39,07	49,00	48,00	52,00
30,16	48,37	32,94	42,00	40,00	38,79	57,96	37,96	47,00	47,00	51,00

ACERO SAE 5160						ACERO SAE 6150				
Distancia (mm)	HRC Max	HRC Min	Probeta 1	Probeta 2	Valores Teóricos	HRC Max	HRC Min	Probeta 1	Probeta 2	Valores Teóricos
			HRC	HRC	HRC			HRC	HRC	HRC
31,75	47,31	32,38	41,00	37,00	38,71	57,56	37,56	44,00	45,00	50,00
33,34	46,24	31,82	39,00	36,00	38,63	57,17	37,17	42,00	44,00	49,50
34,93	45,63	31,35	38,00	34,00	38,37	56,31	36,54	40,00	43,00	49,10
36,51	45,34	30,95	37,00	33,00	37,97	55,12	35,74	38,00	40,00	48,50
38,10	45,03	30,54	36,00	33,00	37,57	53,93	35,00	37,00	38,00	47,00
39,69	44,61	29,91	36,00	32,00	37,14	52,73	35,00	37,00	38,00	45,50
41,28	44,19	29,29	36,00	32,00	36,70	51,54	35,00	35,00	33,00	45,00
42,86	43,78	28,78	37,00	32,00	36,39	50,78	34,78	35,00	34,00	44,00
44,45	43,39	28,39	37,00	32,00	36,19	50,39	34,39	33,00	32,00	43,00
46,04	43,00	28,00	39,00	33,00	36,00	49,98	33,98	31,00	33,00	40,00
47,63	42,80	27,83	40,00	33,00	36,00	49,19	33,19	30,00	32,00	38,00
49,21	42,60	27,66	42,00	33,00	36,00	48,39	32,39	29,00	31,00	37,00
50,80	42,50	27,58	41,00	33,00	36,00	42,50	27,58	27,00	30,00	35,00
52,39	42,00	27,00	39,00	33,00	36,00	42,00	27,00	27,00	30,00	34,00

Se encuentra que, para ambos aceros, según las curvas de templabilidad definidas por la SAE y la AISI, los ensayos, se encuentran dentro de los límites establecidos para los dos aceros, en los resultados experimentales y la simulación de la curva teórica, en el software para curva Jominy de Sidelpa²¹ (basado en la composición química y el tamaño de grano para la construcción de las curvas).

En cuanto a la dureza Rockwell C después del tratamiento térmico de temple y antes de revenido, la empresa establece que los valores deben estar entre 57 y 62 Rockwell C. La dureza que se encuentra dentro del rango se obtiene en el acero SAE 5160 hasta los 12,70 mm de profundidad en la probeta numero uno y hasta los 11,11 mm de profundidad en la probeta numero dos, confirmando que el temple optimo se obtiene para calibres menores a los 22 ó 25 mm.

Para la probeta 1 del acero SAE 6150, la profundidad de temple fue 19.05 mm y para la probeta 2 fue de 17.46 mm, se puede entonces obtener un temple optimo en calibres hasta de 34,92 ó 38,10 mm.

²¹ Software desarrollado por la compañía Siderurgica del Pacifico S.A. año 1998.

Figura 1. Resultados ensayo Jominy del acero SAE 5160.

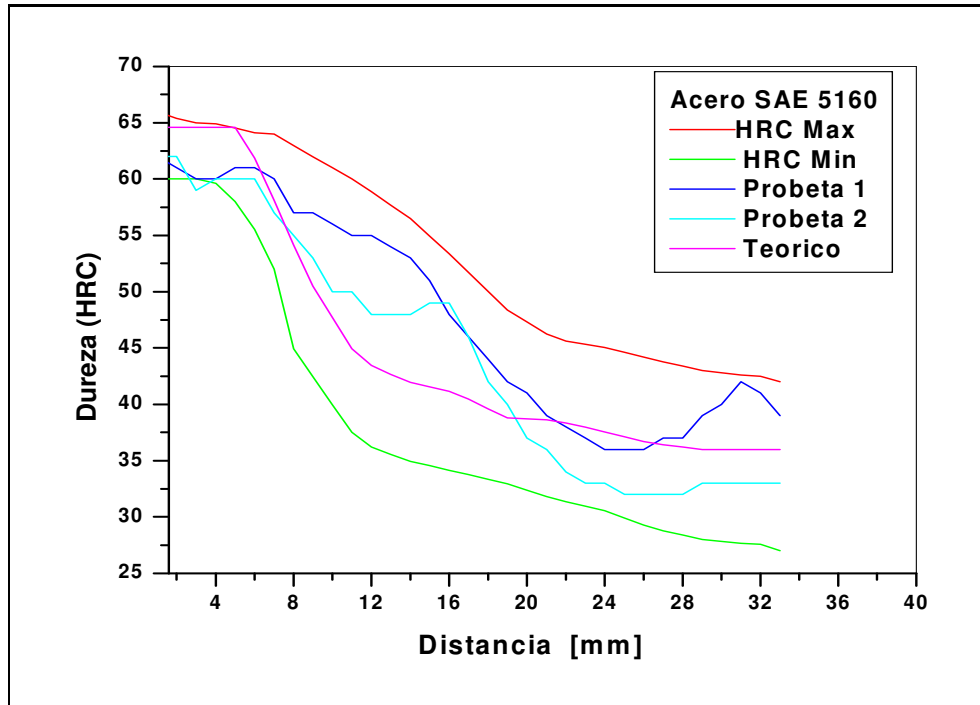
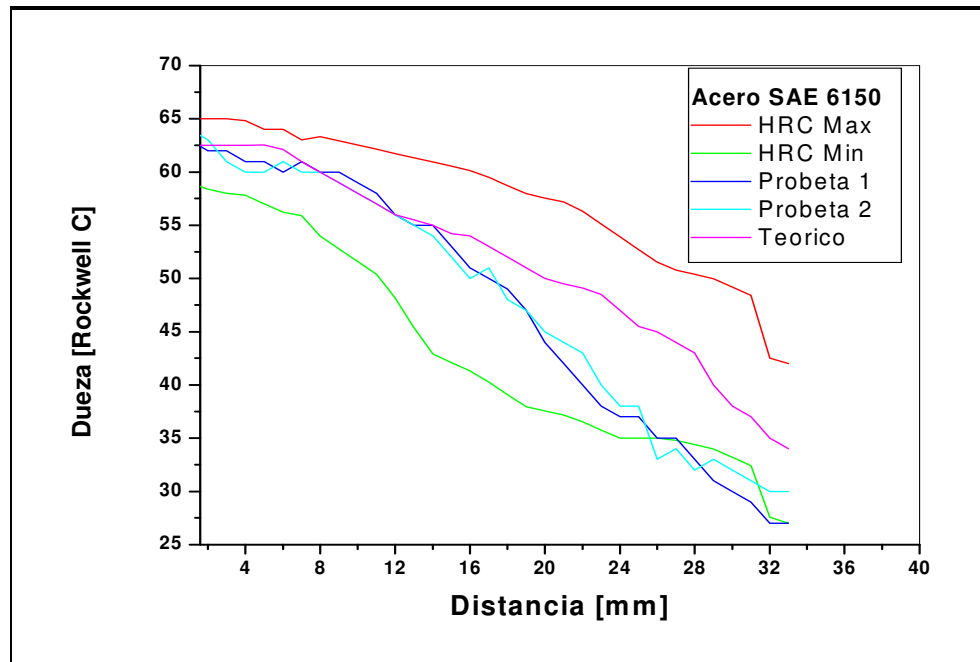


Figura 2. Resultados ensayo Jominy del acero SAE



3.2.3 Análisis Metalográfico

3.2.3.1 Análisis de los aceros en estado de suministro. Se realizó análisis metalográfico de los aceros SAE 6150 y SAE 5160 en estado de suministro, se utilizaron cuatro (4) probetas de cada acero para determinar las fases presentes en cada una de las muestras, encontrándose en las microestructuras las fases ferrita y perlita características de estos aceros, en las figuras No. 3 y 4 se presentan las microestructuras de los aceros analizados en estado de suministro. Se encontró que el tamaño de grano para ambos aceros es aproximadamente 8 ASTM según la norma ASTM-E 45.

Figura 3. Estructura metalográfica acero SAE 5160 en estado de suministro, (nital al 2% a 20X).

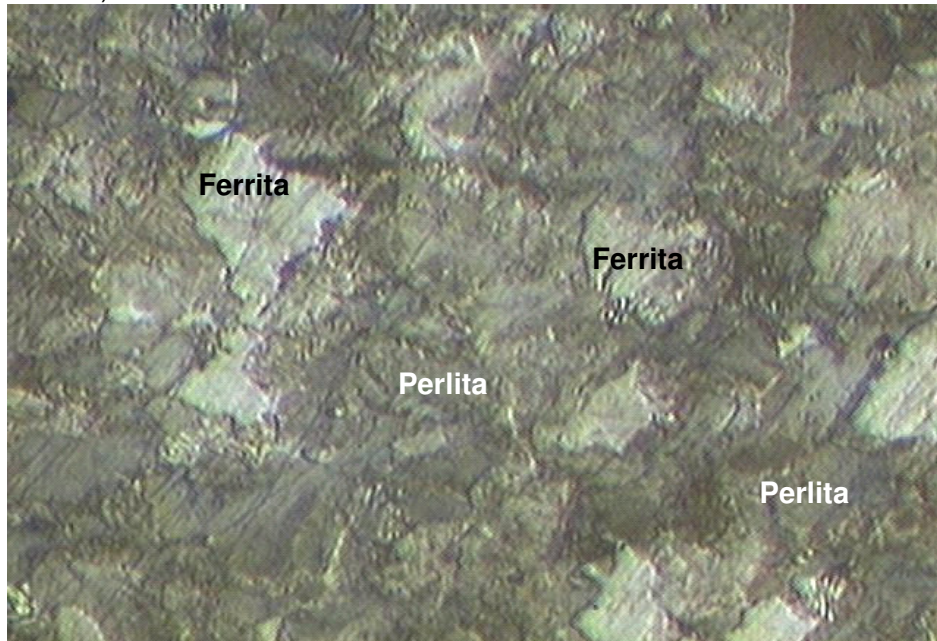
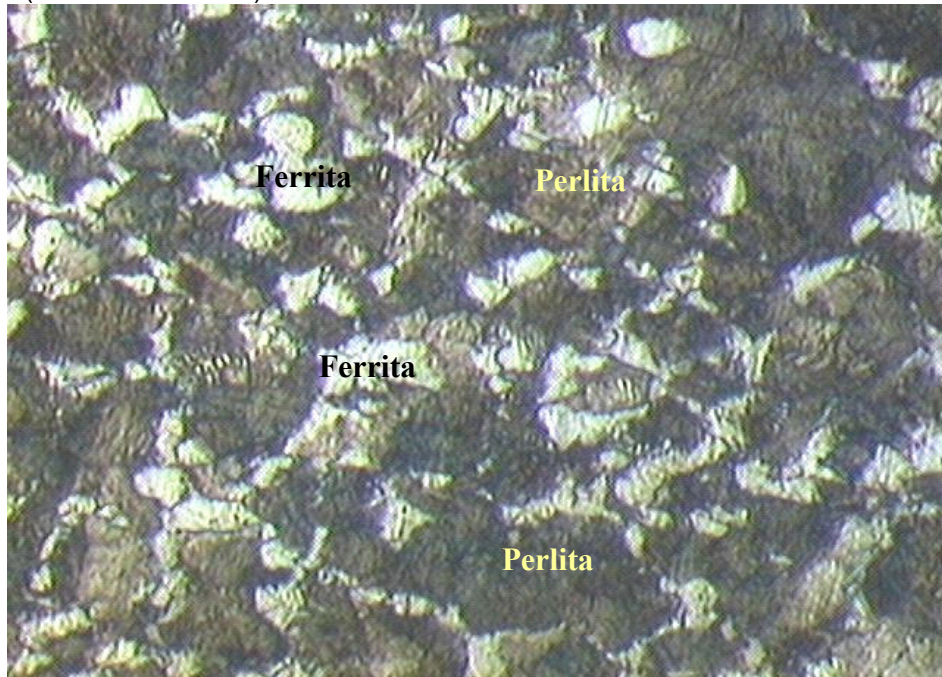


Figura 4. Estructura metalográfica acero SAE 6150 en estado de suministro atacadas (nital al 2% a 20X).



En la superficie de los aceros se midió y se determinó el nivel de la descarburación que presentaba cada acero utilizando el ocular aforado del microscopio Advancel Optical²², se observó que el acero SAE 5160 presenta niveles de descarburación tipo 3 con profundidad máxima de 0,20 mm en la muestra No. 3; mientras que el acero SAE 6150 no presentó niveles de descarburación. Se midió la dureza Rockwell C de cada una de las probetas, encontrándose que la dureza promedio del acero SAE 5160 fue de 31,25 mientras que la dureza promedio del SAE 6150 fue de 33, es decir superando en dos puntos aproximadamente la dureza el primer acero. Los resultados anteriores se resumen en la tabla No 2.

²² Microscopio Advancel Optical modelo 0407520

Tabla 2. Resultados metalográficos y de dureza de los aceros en estudio.

Probeta	SAE 5160				SAE 6150		
	Tamaño de grano ASTM	Dureza HRC	Descarburación		Tamaño de grano ASTM	Dureza HRC	Descarburación (mm)
			Tipo	Prof. (mm)			
1	8	32	2	0,10	8	33	0
2	8	30	2	0,15	8	34	0
3	7-8	31	3	0,20	8	32	0
4	8	32	3	0,18	8	33	0

3.2.3.2 Análisis de los aceros con tratamiento térmico de Bonificado.

Posteriormente se realizó el proceso de Tratamiento Térmico de Temple Revenido (Bonificado) a las cuatro (4) probetas de acero SAE 5160, utilizando el horno estacionario de cámara; el tratamiento se realizó bajo los parámetros establecidos actualmente (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros del proceso

Característica	Valor
Set Point Horno de tratamiento térmico	950 °C
Tiempo de permanencia en el horno	40 minutos
Temperatura del aceite	32,6 °C
Tiempo de inmersión	8,90 minutos
Temperatura del horno de revenido	465 °C
Tiempo de proceso de revenido	2 ½ horas

Las probetas se calentaron hasta la temperatura de austenización permaneciendo durante 13 minutos adicionales; inmediatamente se retiraron del horno, se sumergieron en aceite Fenso 42 durante 8,90 min., para efectuar el enfriamiento rápido y lograr la transformación de la fase austenita en martensita. A continuación

se efectuó el tratamiento térmico de revenido para el alivio de tensiones y transformación a la fase martensita revenida. Las temperaturas que se obtuvieron en las probetas, durante el proceso térmico se registran en la Tabla 4.

Tabla 4. Temperaturas de las probetas de acero SAE 5160 durante el proceso de temple.

Probeta	T salida horno (°C)	T entrada aceite (°C)	T después de la inmersión (°C)
1	876	846	88
2	863	833	78
3	882	852	63
4	862	832	84

Se realizó análisis metalográfico a las cuatro (4) probetas de acero SAE 5160 tratadas térmicamente; en las figuras 5 y 6 se observan los resultados analizados. Se encontró en la superficie de las muestras niveles de decarburación. Del borde hasta los 9 mm la fase predominante es martensita revenida; a mayores profundidades hasta 12,5 mm; se observó la presencia de otras fases como perlita y bainita.

El tamaño de grano medido varió desde 7 hasta 8 ASTM. Se midió la dureza Rockwell C de las probetas en la superficie encontrándose un promedio de 44 y en el centro de 41,5 Rockwell C. Los resultados de los análisis anteriores se registran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados pruebas del acero SAE 5160 con tratamiento térmico de bonificado.

Probeta	Tamaño de grano ASTM	Decarburación	Dureza borde (HRC)	Dureza núcleo (HRC)
1	7	0,15	44	41
2	8	0,21	45	42
3	8	0,12	43	41
4	7-8	0,20	44	42

Figura 5. Estructura metalográfica de la superficie del acero SAE 5160 con tratamiento de bonificado, (nital al 2% a 50X).

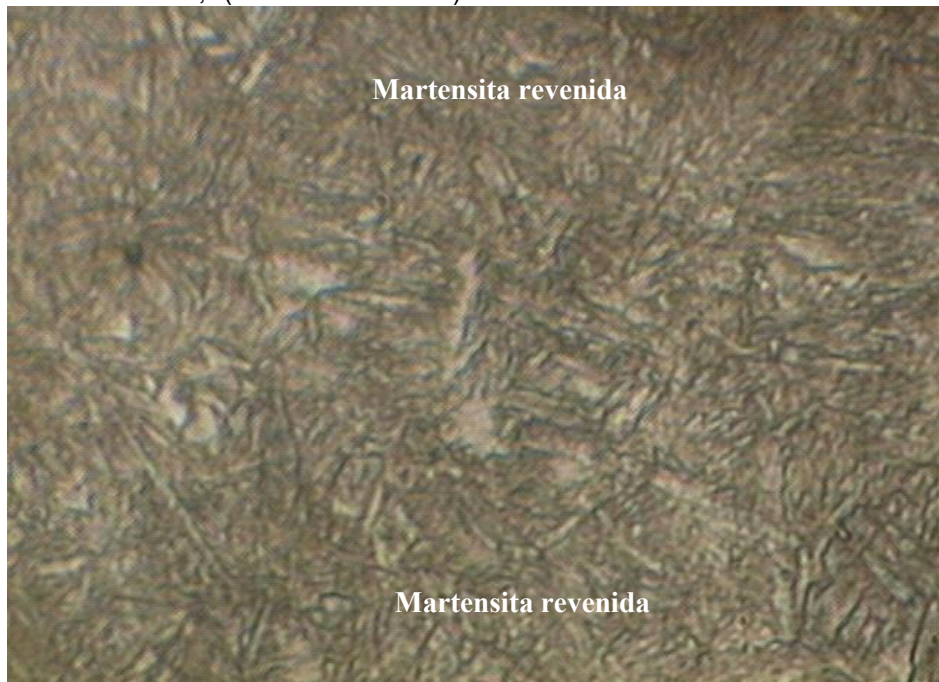
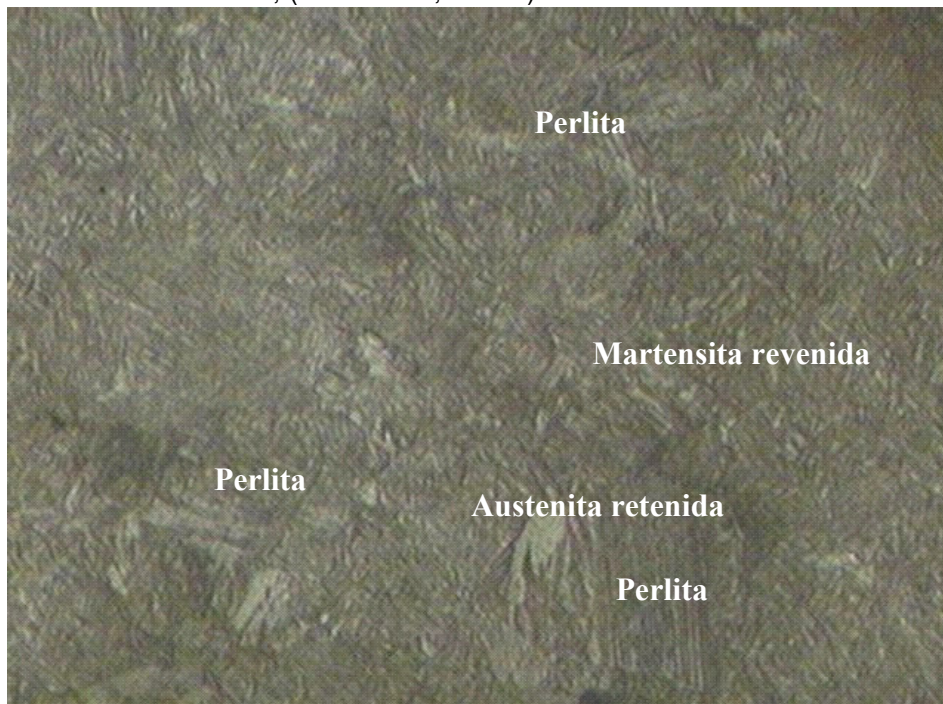


Figura 6. Microestructura del acero SAE 5160 con tratamiento térmico de bonificado a 12.5 mm del borde, (nital al 2%, a 20X).



Para determinar las condiciones óptimas de tratamiento térmico de bonificado del acero SAE 6150 se realizaron ensayos a diferentes temperaturas, basadas en las especificaciones de los catálogos de los aceros²³. Se efectuó calentamiento al acero a diferentes temperaturas utilizando el horno y aceite Fenso 42. Posteriormente se realizó tratamiento de revenido con un tiempo de 2 ½ horas en el horno continuo a diferentes temperaturas, determinando que las condiciones óptimas se realizan a temperatura de temple mínimo de 830°C y máximo de 920°C. A temperaturas por debajo de 830°C y, por las condiciones del proceso, se obtienen otras fases además de la martensita; como perlita, bainita y austenita retenida. A temperaturas superiores a 920°C se inicia el crecimiento del grano.

La temperatura de revenido recomendada se encuentra entre 445°C y 485°C. A temperatura inferior de 445°C la dureza es muy alta, y se ingresa en la zona de fragilidad de revenido entre 250°C y 400 °C. Con temperaturas superiores a 485°C la dureza es baja, obteniendo valores que no cumplen con la norma. Los resultados se consignaron en las tablas No. 6, 7 y 8.

Tabla 6. Resultados de ensayos de temple y revenido a 430 °C para el acero SAE 6150

T. Temple (°C)	Dureza (HRC)	Fases Presentes (Núcleo)	Tamaño de grano ASTM
790	44	Poca Martensita revenida y Perlita	8
810	45	Martensita revenida y poca perlita	8
820	47	Martensita revenida	8
830	49	Martensita revenida	8
850	50	Martensita revenida	7 y 8
920	50	Martensita revenida	6 y 7

²³ Especificaciones Acero SAE 5160 [en línea]. Santiago de Cali: Sidelpa S.A., 2005. [Consultado abril de 2005]. Disponible en Internet: http://www.sidelpa.com/acero_6150.htm

Tabla 7. Resultados de ensayos de temple y revenido a 460 °C para el acero SAE 6150

T. Temple °C	Dureza (HRC)	Fases Presentes (núcleo)	Tamaño de grano ASTM
790	39	Poca Martensita revenida y Perlita	8
810	41	Martensita revenida y perlita	8
820	43	Martensita revenida y poca perlita	8
830	43	Martensita revenida	8
850	44	Martensita revenida	7
920	44	Martensita revenida	6

Tabla 8. Resultados de ensayos de temple y revenido a 490 °C para el acero SAE 6150

T. Temple °C	Dureza (HRC)	Fases Presentes (Núcleo)	Tamaño de grano ASTM
790	38	Poca Martensita revenida y Perlita	8
810	40	Martensita revenida y perlita	8
820	40	Martensita revenida	8
830	41	Martensita revenida	8
850	41	Martensita revenida	7 y 8
920	42	Martensita revenida	6 y 7

Finalmente con las condiciones encontradas se realizó el tratamiento térmico de bonificado a cuatro (4) probetas de acero SAE 6150 (30 cm de espesor). Las probetas se calentaron hasta temperatura de austenización durante 15 minutos, se retiraron del horno, se sumergieron en aceite Fenso 42, para efectuar el enfriamiento rápido y lograr la transformación de las fases. A continuación se efectuó el tratamiento térmico de revenido y transformación a la fase martensita revenida. Las temperaturas de las probetas, que se obtuvieron durante el proceso térmico están en la Tabla 9 y las condiciones del proceso en la Tabla 10.

Tabla 9. Parámetros establecidos para el procesamiento del acero SAE 6150

Característica	Valor
Set Point Horno de tratamiento térmico	950 °C
Tiempo de permanencia en el horno	45 minutos
Temperatura del aceite	32,6 °C
Tiempo de inmersión	5 minutos
Temperatura del horno de revenido	455 °C
Tiempo de proceso de revenido	2 ½ horas

Tabla 10. Condiciones de las probetas de acero SAE 6150 durante el proceso de temple

Probeta	T salida Horno (°C)	T entrada aceite (°C)	T después de la inmersión (°C)
1	890	860	96
2	870	840	87
3	880	850	86
4	865	835	79

Se realiza análisis metalográfico a las cuatro (4) probetas de acero SAE 6150 y la microestructura es la fase martensita revenida ver las figuras 7 y 8.

Figura 7. Estructura metalográfica en el núcleo del acero SAE 6150 a 15 mm del borde (nital al 2% a 50X).

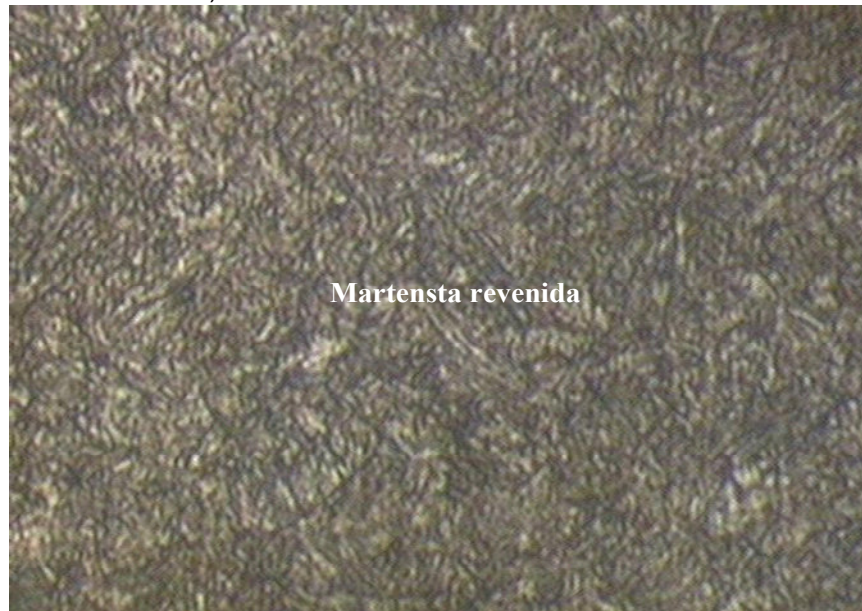
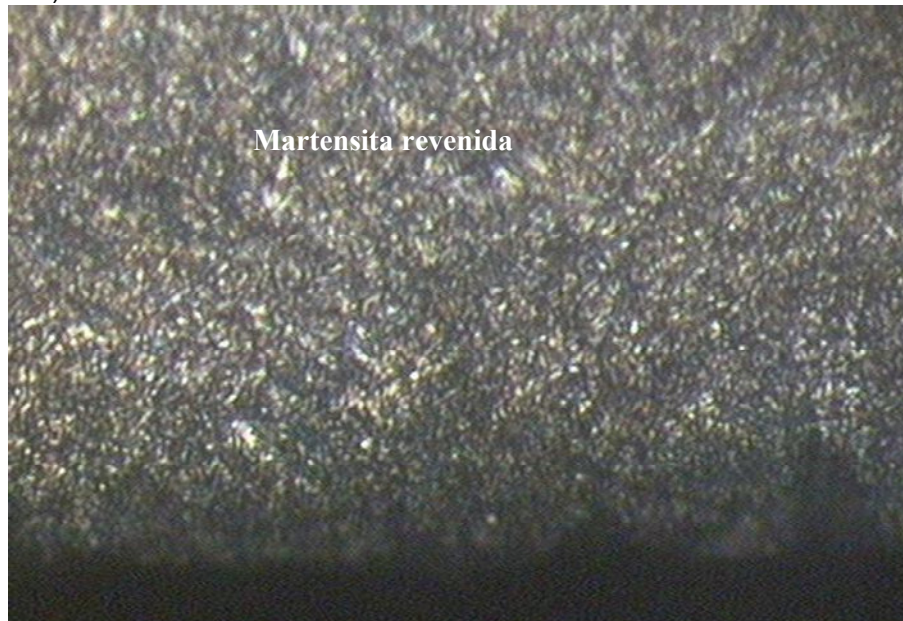


Figura 8. Estructura metalográfica en la superficie del acero SAE 6150 (nital al 2% a 20X).



El tamaño de grano fue de 8 ASTM. Se midió la dureza Rockwell C de las probetas en la superficie encontrándose un promedio de 44.5 y en el centro 44.25 Rockwell C. Los resultados de los análisis anteriores se registran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de Análisis Metalográfico y Dureza

Probeta	Tamaño de grano ASTM	Descarburación		Dureza Borde (HRC)	Dureza Núcleo (HRC)
		Tipo	Prof. (mm)		
1	8	-	0	45	44
2	8	3	0,09	45	45
3	8	3	0,07	44	44
4	8	-	0	44	44

3.2.4 Ensayo de tensión

3.2.4.1 Ensayo de tensión al acero en estado de suministro. Se realizó ensayo de tensión, utilizando la maquina UTS de la UAO, a tres probetas de cada acero, en estado de suministro con la finalidad de comparar las propiedades

mecánicas que poseen estos materiales. Los resultados obtenidos para el Acero SAE 5160 en estado de suministro se detallan en la Tabla 12 y en las figuras No.9 y 10.

Tabla 12. Resultados ensayos de tracción de los aceros en estado de suministro

Característica	Acero SAE 5160				Acero SAE 6150			
	1	2	3	Prom.	1	2	3	Prom.
Modulo Elasticidad (GPa)	193	202	211	202	196	188	229	204
Esfuerzo Fluencia (MPa)	725	522	557	601,3	600	720	580	636,6
Esfuerzo Ultimo (MPa)	1117	1030	1008	1051,6	1005	1050	1007	1020

Figura 9. Resultados ensayo de tracción del acero 5160 en estado de suministro

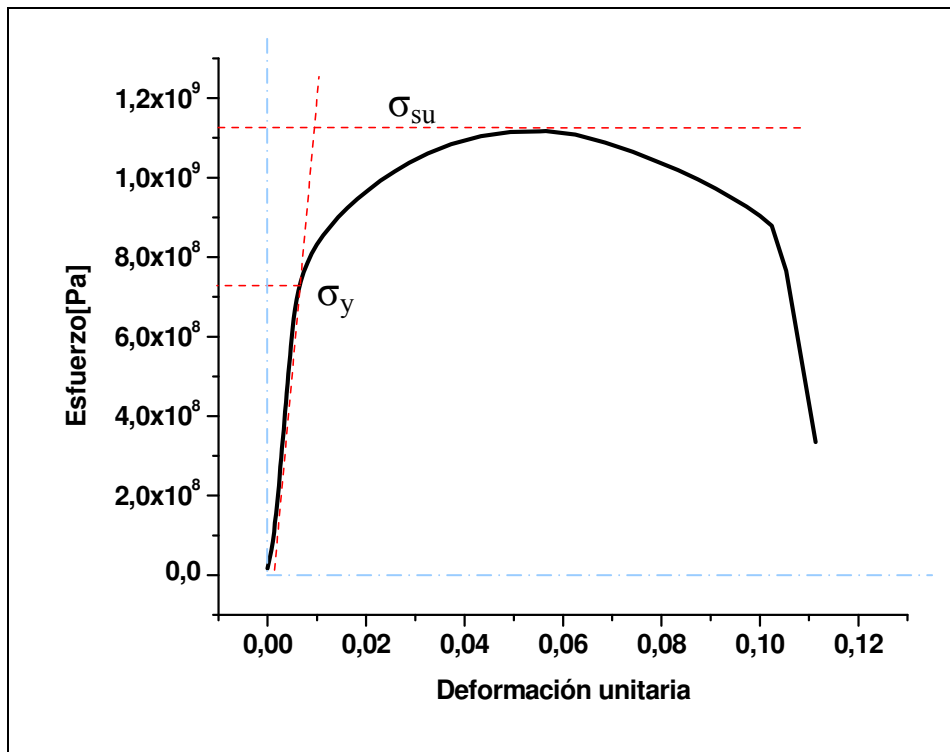
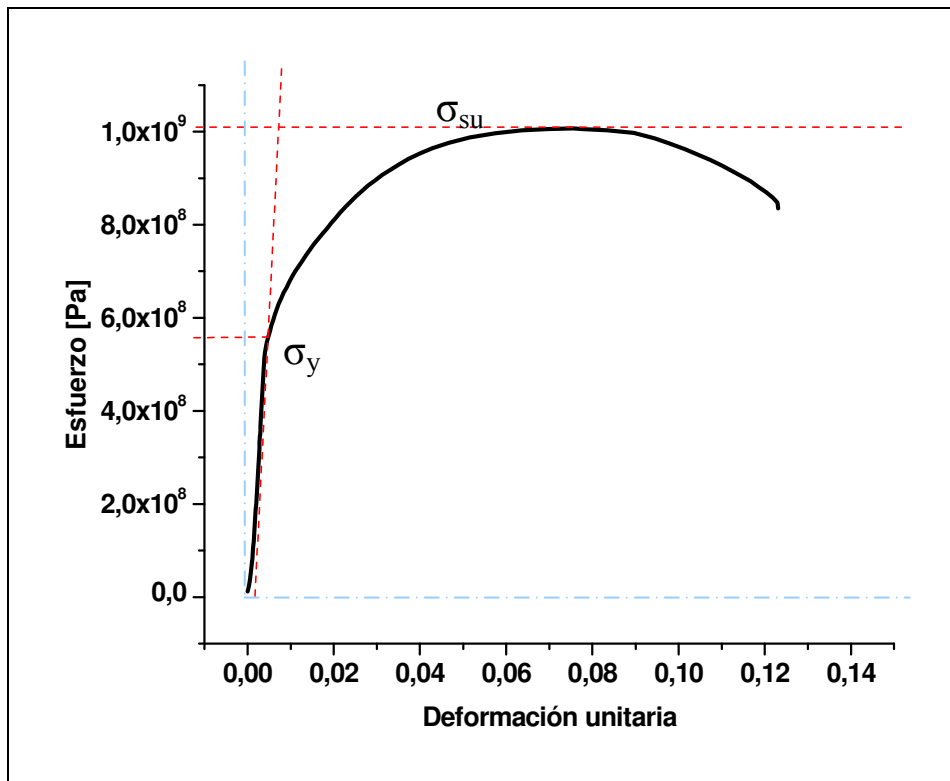


Figura 10. Resultados ensayo de tracción del acero 6150 en estado de suministro



3.2.4.2 Ensayo de tensión al acero con tratamiento térmico de bonificado.

Posteriormente se realizó el ensayo de tensión a tres probetas de cada uno de los aceros en estudio, con tratamiento térmico de bonificado. Los resultados se detallan en la Tabla 13 y en las figuras No. 11 y 12.

Tabla 13. Resultados ensayos de tracción de los aceros en con tratamiento térmico de bonificado

Característica	Acero SAE 5160				Acero SAE 6150			
	No. 1	No. 2	No. 3	Prom.	No. 1	No. 2	No. 3	Prom.
Modulo elasticidad (GPa)	200	218	223	213,6	199	215	219	211
Esfuerzo Fluencia (MPa)	1130	1130	1200	1153	1200	1110	1200	1170
Esfuerzo ultimo (MPa)	1340	1300	1330	1323,3	1340	1250	1400	1333,3

Figura 11. Resultados ensayo tracción SAE 5160 con tratamiento térmico de bonificado

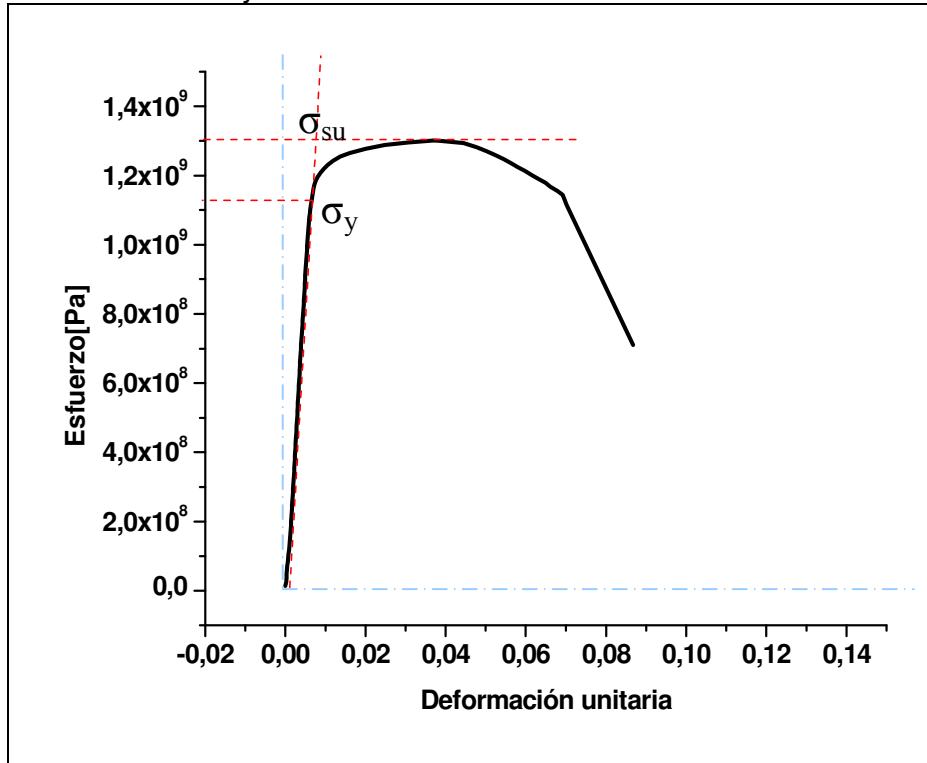
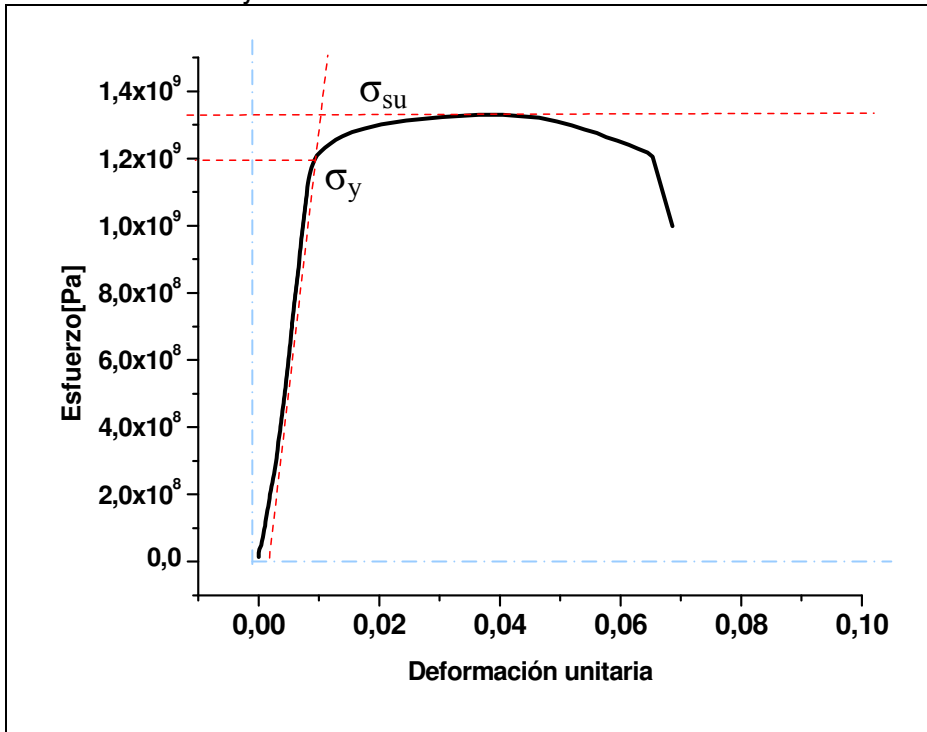


Figura 12. Resultados ensayo tracción SAE 6150 con tratamiento térmico de bonificado.



3.2.5 Ensayo Charpy. Se elaboraron tres probetas de cada acero en estado de suministro y con tratamiento térmico de bonificado para ensayo de Impacto - Charpy (Total 6 probetas) en cada uno de los aceros en estudio. El ensayo de impacto es un método que permite conocer la resiliencia del acero. Se da el nombre de resiliencia a la energía consumida para romper la probeta. Se realizó el ensayo en la maquina Charpy de la Universidad Autónoma de Occidente y los resultados obtenidos para los aceros SAE 5160 y SAE 6150 en estado de suministro se detallan en la Tabla14.

Tabla 14. Resultados ensayo de impacto sobre los aceros en estado de suministro.

Probeta No.	SAE 5160		SAE 6150	
	Resiliencia (Kgm/cm ²)	Dureza (HRC)	Resiliencia (Kgm/cm ²)	Dureza (HRC)
1	1,250	30	1,875	32
2	1,250	32	1,500	30
3	1,000	30	1,500	30

Luego se realizó el ensayo Charpy a los aceros SAE 5160 y SAE 6150 con tratamiento térmico de bonificado y los resultados obtenidos se registran en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados ensayo de impacto sobre los aceros con tratamiento térmico de bonificado.

Probeta	Acero SAE 5160		Acero SAE 6150	
	Resiliencia (Kgm/cm ²)	Dureza (HRC)	Resiliencia (Kgm/cm ²)	Dureza (HRC)
1	3,250	43	2,500	44
2	3,375	43	2,750	44
3	3,750	43	3,125	43

Al realizar el cálculo y construcción de piezas se presentan algunas dificultades en la interpretación de los valores de resiliencia debido a que el resultado de ensayo de impacto da una indicación clara sobre el comportamiento de la pieza; por ejemplo, si esta se romperá en servicio o si tendrá larga duración. Ocurre en el caso de los muelles de ballesta que son piezas sometidas a frecuentes choques y que es necesario que tengan altas resistencias. En los aceros al carbono para muelles la temperatura de revenido es de aproximadamente 300 °C, en los aceros aleados la temperatura es un poco más alta, pero en todos los casos la resiliencia es muy baja y no suele ser superior a 3 Kgm/cm². Parece que en los muelles, trabajando a choque y con este valor de resiliencia, las roturas del acero deberían ser muy frecuentes. Sin embargo, se ha observado que si el material no tiene defectos, las roturas en los muelles son poco frecuentes. Los resortes, en general, se rompen (90% de los casos) por grietas superficiales del material generadas durante la laminación del material o durante el tratamiento térmico.²⁴

En los resultados, obtenidos en los ensayos en el laboratorio; el mayor valor fue 3,75 Kgm/cm² para el acero SAE 5160 y 3,125 Kgm/cm² para el acero SAE 6150, estos resultados están de acuerdo con los datos teóricos expuestos anteriormente; y conduce a concluir que frecuentemente no es posible predecir o controlar todas las condiciones en los aceros a través de todos los ensayos.

²⁴ APRAIZ BARRERO, Op. cit., p. 539

4. COMPARATIVO ENTRE EL ACERO SAE 6150 Y SAE 5160

4.1 VENTAJAS

- Se obtuvo mayor templabilidad en el acero SAE 6150 para los diámetros o espesores mayores a 20 mm, ya que se encontró mayor profundidad en la penetración del temple a través del ensayo Jominy para espesores máximos de 40 mm.
- El control en el proceso es un poco más sencillo, debido a que la templabilidad del acero permite que los rangos de los parámetros de producción, se adapten.
- La calidad en el tratamiento térmico de bonificado es mejor, por lo tanto se mejoran las propiedades mecánicas de los resortes.

4.2 DESVENTAJAS

- El costo del acero SAE 6150 es \$200/kg mas elevado que el SAE 5160, debido al elemento adicional Vanadio (V), que en el mercado nacional no es posible adquirir.
- Se requiere un estudio concreto en el proceso de troquelado en frío, ya que al elevarse en dos puntos la dureza Rockwell C, se debe tener cuidado con los herramientas para evitar deterioros prematuros o desgarre del material.
- Tardanza en la entrega por parte del proveedor, debido a que el vanadio es un elemento de aleación importado.

- No es un acero de producción nacional. Esto hace que se produzca nacionalmente pero bajo pedido exclusivo.

4.3 COSTOS

Se determinan dos cambios básicos en el desarrollo del acero SAE 6150 como alternativa de materia prima. El primer punto es el incremento en el costo por tener en su composición química el elemento vanadio. La revisión y desarrollo de herramientas (cuchillas de corte) debido al incremento de la dureza en estado de suministro, es decir para el proceso de corte. El detalle del costo beneficio se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16. Relación Costo-Beneficio para el primer año

CONCEPTO	COSTO	BENEFICIO
Incremento de utilidad por producto de espesor mayor a 20 mm por tonelada.		\$4'065.000
Incremento en el costo del acero por tonelada	\$200.000	
Desarrollo de herramental de corte para dureza hasta de 34 Rockwell C	\$1'000.000	
Total	\$1'200.000	\$2'865.000
RELACION B/C:	3.38	
RBC=(VPI/VPC)		

5. CONCLUSIONES

Se determinaron las condiciones optimas de tratamiento térmico temple y revenido adecuadas para el proceso de producción.

Se realizaron los ensayos mecánicos encontrando propiedades del comportamiento típico de materiales para resortes en ambos aceros.

Se encontró que las fases presentes en la microestructura de los aceros SAE 6150 y 5160, en estado de suministro, no presentan diferencias, solo un pequeño aumento de dureza entre 1 y 2 HRC en el acero SAE 6150.

Se observó para el acero SAE 5160, con tratamiento térmico de Bonificado, la fase perlítica y otras fases en el núcleo de las probetas con espesores mayores a 20 mm, esta condición disminuye las propiedades mecánicas del material.

Para el acero SAE 6150 se encontró la fase martensita revenida en toda la sección transversal de las probetas estudiadas con una dureza promedio de 44 Rockwell C, cumpliendo con la norma NTC 1349 y las recomendaciones del manual SAE HS-788.

Las curvas obtenidas en el Ensayo Jominy mostraron un comportamiento similar, para ambos aceros, sin embargo en los puntos por encima de 12,5 mm y hasta 20 mm la dureza se mantuvo en valores promedio de 57 Rockwell C para el acero SAE 6150; mientras que este valor se obtuvo para el acero SAE 5160 hasta los 12,7 mm, demostrando que tiene mayor templabilidad el acero propuesto como alternativa para la fabricación de resortes con calibres o diámetros mayores a 20 mm.

El mejoramiento de las propiedades mecánicas del acero SAE 6150 para calibres mayores a 20 mm es notorio para los resortes, ya que su calidad depende del tratamiento térmico en toda la sección transversal.

RECOMENDACIONES

Aplicar el sistema propuesto en el presente proyecto para lograr un desarrollo integral de la organización en el desarrollo de productos nuevos con calibres mayores a 20 mm y menores a 40 mm, a largo plazo.

Realizar revisión al proceso de cizallamiento (Corte en frío) ya que el aumento en la dureza en uno o dos Rockwell C, puede traer consecuencias en los herramientas que se utilizan en el troquelado en frío o cizallamiento.

Analizar y mejorar las velocidades de enfriamiento, por que a mayor calibre del acero, se presenta mayor dificultad en la transferencia de calor entre el medio y el producto.

Revisar continuamente los estándares de producción, pues son variable fundamental para el desarrollo de la propuesta.

Realizar un comparativo con pruebas de fatiga sobre resortes ensamblados con los dos aceros y construir las curvas S-N.

Realizar curvas adicionales de Jominy a las diferentes coladas de acero SAE 6150 y SAE 5160 para contar con un estudio estadístico y aleatorio de las curvas de templabilidad para verificar la templabilidad de acuerdo a la composición química.

BIBLIOGRAFIA

Aceros [en línea]. Bogotá Colombia : West Arco, 2005. [Consultado 05 de agosto de 2005]. Disponible en Internet <http://www.westarco.com/rode/Aceros.pdf>.

APRAIZ BARRERO, José. Tratamientos Térmicos de los aceros. 9 ed. Madrid: Dossat, 2000. 738 p.

ASKELAND M, Donald R. Ciencia e Ingeniería de los Materiales.4 ed. México: Internacional Thomson Editores, 1998. 790 p

ASM, International. Handbook: Heat Treating vol.4. 2 ed. Ohio: Manager Production Systems, 1994. 184 p.

ASM, International. Handbook: Metallography and Microstructure vol. 9. Ohio: Materials Park, 2004. 1184 p.

AVNER, S. Introducción a la Metalurgia Física. México: Ediciones del Castillo, 1966. 556 p.

Granallado de pretensionado III [en línea]: Comportamiento en fatiga de alto número de ciclos. Buenos Aires Argentina: Asociación Argentina de Materiales, 2005. [Consultado 15 de septiembre, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/1009.PDF>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Normas Colombianas para ensayo de tracción para materiales metálicos: método de ensayo a temperatura ambiente. Tercera Actualización. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 1995. 32 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Normas Colombianas para ensayo de dureza: Ensayo de Rockwell – Escalas A-B-C-D-E-F-G-H-K. Primera Actualización. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1994. 12 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Normas Colombianas para Ensayo de impacto Charpy: Entalla en V. Primera Actualización. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1996. 15 p.

KERN R. F. Steel Selection: A Guide for Improving Performance and Profits. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1979. 445 p.

LATJIN, M. Metalografía y Tratamiento Térmico de los Metales. 2 ed. Moscú: Mir, 1977. 440 p.

La importancia en la selección de materiales [en línea]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2005. [Consultado 08 de agosto, 2005]. Disponible en Internet: <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/162249175.180.pdf>.

SOCIETY AUTOMOTIVE ENGINEERS. International Standards to Methods of Determining Hardenability of Steels. First Actualization. Pensilvania: SAE, 1998. 15 p.

THE IRON AND STEEL INSTITUTE. Heat Treatment of metals. London: T.L. Huges, 1966. 202 p.