

INFLUENCIA DEL CARBONO PRESENTE EN LA MARTENSITA EN LA
RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO AISI SAE 1045 TRATADO
DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS SEGUIDO DE UN TRATAMIENTO
CRIOGÉNICO

JORGE ESAU TIERRADENTRO CRUZ

20132375401

SERGIO IVAN MARTÍNEZ

20132375047

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

INFLUENCIA DEL CARBONO PRESENTE EN LA MARTENSITA EN LA
RESISTENCIA AL DESGASTE DE UN ACERO AISI SAE 1045 TRATADO
DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS SEGUIDO DE UN TRATAMIENTO
CRIOGÉNICO

JORGE ESAU TIERRADENTRO CRUZ

20132375401

SERGIO IVAN MARTÍNEZ

20132375047

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PRESENTADO A:

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN	4
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	6
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEORICO.....	15
3.1 ACERO.....	15
3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	16
3.3 TEMPLE DE LOS ACEROS	18
3.4 TRATAMIENTO TÉRMICO CRIOGÉNICO	19
3.5 TRATAMIENTO TÉRMICO REVENIDO DEL ACERO	20
3.6 DESGASTE ABRASIVO.....	22
3.7 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	22
3.8 DILATOMETRÍA.....	23
4. METODOLOGÍA	25
5. CRONOGRAMA	26
6. PRESUPUESTO.....	27
7. BIBLIOGRAFIA.....	28

0. INTRODUCCIÓN

Los aceros al medio carbono son utilizados en la industria con una mayor frecuencia gracias a sus buenas características de resistencia que mejoran al ser tratados térmicamente. El gran uso de estos materiales exige aumentar el conocimiento respecto al comportamiento del material en otras situaciones que también afectan el desempeño del acero. Es necesario entonces conocer el efecto de otros tipos de tratamientos térmicos como la criogenia.

La poca bibliografía que se encuentra relacionada al tratamiento criogénico se ha realizado en acero para herramientas y en recubrimientos, todos estos con resultados satisfactorios aumentando la resistencia al desgaste del material o el recubrimiento con el que se haya trabajado. La reducción del desgaste, un factor que afecta la vida útil de una pieza, conduce a la reducción de horas muertas en maquinaria de producción. Por esta razón se desea evaluar el comportamiento del acero AISI/SAE 1045 al someterlo a tratamiento criogénico, además se realizará el estudio en diferentes tiempos de revenido con el fin de determinar la influencia de estos en la resistencia al desgaste abrasivo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la industria en general y las diferentes áreas de conocimiento, se hace uso de los tratamientos térmicos, que según *Metals Handbook* es: “una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, en tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas¹”. Los tratamientos térmicos del acero se basan en la aplicación de las transformaciones estructurales que experimenta el acero (transformaciones alotrópicas) y de los procesos de recristalización y de difusión. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita.

A nivel mundial, debido a la necesidad de conseguir herramientas y componentes metálicos que se comporten mejor ante los implacables y exigentes factores industriales, investigaciones recientes en el campo de los tratamientos térmicos apuntan al empleo de exponer a los metales a bajas temperaturas como un camino para conseguir estructuras con mejores características de dureza y resistencia al desgaste. Actualmente, el sector utiliza los procesos a temperaturas bajo cero para aumentar la resistencia a la fatiga, reducir la fragilidad y las tensiones internas de los aceros y sus aleaciones con el fin de prolongar la vida útil de las piezas en servicio.

Por lo anterior, entendemos que el tratamiento de temple con enfriamiento criogénico, conocido también como simplemente tratamiento criogénico, es una de las alternativas más recomendables para mejorar propiedades como dureza y resistencia al desgaste, así mismo, el método empleado no requiere de altas inversiones en equipos, ni infraestructuras muy sofisticadas.

Con este proyecto se pretende evidenciar el efecto del tratamiento criogénico sobre las propiedades mecánicas de un acero AISI/SAE 1045, es decir, determinar el vínculo que existe en un cambio micro estructural que denota este acero cuando es expuesto a un tratamiento criogénico, temple desde temperaturas intercríticas y revenido, con los cuales se quiere examinar si el proceso ya mencionado tiene una influencia de mejoría notable en el desgaste abrasivo en el material.

¹ M.I. F ASM HANDBOOK, Heat treating. Volume 4, Cold Treating and Cryogenic Treating and Cryogenic treatment of steel. 2001.

Así mismo, de acuerdo a los resultados obtenidos, mejorar la vida útil de los elementos elaborados en dicho acero que requieren dureza y tenacidad como ejes, manivelas, chavetas, pernos, tuercas, cadenas, engranajes de baja velocidad, espárragos, acoplamientos, bielas, pasadores, cigüeñales y piezas estampadas. De igual forma, aprovechando la viabilidad de este material al ser sometido a temple y revenido; todo esto, mediante el desarrollo de un ciclo térmico conveniente.

Existiendo antecedentes de que un material tratado térmicamente tiende a cambiar algunas de sus propiedades, se busca enlazar cambio de las fases de la microestructura del acero el cual se pretende evidenciar cual es el que tiene mejor respuesta ante el desgaste abrasivo, correlacionando la cadena de tiempos, temperaturas y clases de tratamientos para evidenciar el más influyente en el acero y el cambio en sus propiedades mecánicas.

1.1 ESTADO DEL ARTE

La correlación existente que pueda haber entre mejorar el desgaste erosivo de un material y variados procesos de tratamientos térmicos como lo son el temple, el revenido y la criogenia se ha convertido en un reto significativo. Se realiza una investigación con el fin de referenciar los distintos trabajos realizados relacionados con los tratamientos térmicos y los cambios que producen en las propiedades de los materiales; se abarcan referencias tanto nacionales como internacionales.

Partiendo de lo anterior, se abarcará principalmente con referencias internacionales donde se han realizado la mayor cantidad de estudios: como es el caso en el que se efectúa una revisión del tratamiento de criogénico exclusivo para herramientas de corte desarrollado por *Gümüşova Vocational School of Higher Education, Düzce University, Düzce* y por *Machine Engineering, Karabük Universty, Karabük*, en Turky², en la que se presenta un estudio sobre el rendimiento de las herramientas de corte después de haber sido sometidas a un tratamiento criogénico.

Al considerar un factor importante el mejorar el rendimiento de las herramientas de corte en cuanto a la reducción de costes en la producción, los autores del proyecto consideran que al ser sometidas las herramientas de corte a tratamientos criogénicos, o también llamados tratamiento térmico bajo cero, dicho tratamiento ha

² Sitki, Akincioğlu; Hasan, Gökkaya y İlyas Uygur. (2015). "A review of cryogenic treatment on cutting tools" (pp. 3-16). Springer-Verlag London 2015.

hecho contribuciones significativas al a mejora de la resistencia del desgaste, mejorando la vida útil de la herramienta, mejor distribución de las fuerza de corte, propiedades metalúrgicas, y por ende, la integridad de la calidad de la herramientas de corte. Con el fin de lograr los máximos beneficios de los tratamientos criogénicos en las herramientas de corte, los parámetros de tratamiento criogénicos (Temperatura de mantenimiento, tiempo de mantenimiento, la identificación de calor, el tratamiento que debe aplicarse antes o después, etc.) deben ser aplicados en condiciones óptimas de acuerdo a la herramienta.

De la mano con el trabajo anterior, los tratamientos criogénicos se consideran una buena manera de reducir el contenido de austenita retenida y mejorar el rendimiento de los aceros de herramientas. En *Department of Materials Science and Metallurgic Engineering, Polytechnic School of Engineering, University of Oviedo*³, en Gijón, Spain, según los señores Belzunce y Pérez, se realiza cuatro tratamientos térmicos diferentes, dos de los cuales incluían una etapa criogénica profunda, que se aplican a un acero para herramientas H13, posteriormente se determinan las propiedades mecánicas por medio de ensayos de tracción, dureza y tenacidad a la fractura. Por otra parte, mediante microscopía electrónica de barrido y análisis de difracción de rayos X se utilizan para hacerse una idea de la evolución micro estructural de estos tratamientos térmicos durante todas las etapas.

Se llega a la conclusión que la aplicación de un tratamiento criogénico profundo para acero H13 induce tensiones térmicas mayores y defectos estructurales, la producción de una red dispersa de carburos finos después de las etapas de templado posteriores, que fueron responsables de una mejora significativa en la tenacidad a la fractura de este acero sin la modificación de otras propiedades mecánicas. Aunque la aplicación de un tratamiento criogénico de profundidad reduce el contenido de austenita retenida, con un contenido mínimo innata que no puede ser transformado por tratamiento térmico. Sin embargo, esta austenita, se cree que es lo suficientemente estable y no debe transformarse durante la vida útil normal de matrices de forja.

Por otra parte, la aplicación de los tratamientos criogénicos a aceros de baja aleación e incluso a materiales no ferrosos se está convirtiendo en objeto de varias investigaciones, debido su potencial para reducir el desgaste; por tal razón, en la

³Belzunce, Francisco y Pérez, Marcos. (2014). "The effect of deep cryogenic treatments on the mechanical properties of an AISI H13 steel," en [Materials Science and Engineering: A, Volume 624](#), 29 January 2015, (Pages 32-40).ScienceDirect

*Universidad Nacional del Sur/CONICET*⁴, los autores tienen como objetivo de estudio analizar los cambios micro estructurales y el efecto de los tratamientos criogénicos en dureza y resistencia al impacto en martensítica de acero inoxidable AISI 420. Para su caso de estudio se emplea la difracción de rayos X (XRD) para el análisis de fase y caracterización, mientras que la fracción de volumen de carburo, tamaño y la evaluación de composición se realiza mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) y espectrometría de energía dispersiva (EDS). Mientras que la dureza se evalúa con la técnica de Vickers y la tenacidad al impacto se mide por medio de ensayos con entalla en V Charpy 's. Las superficies de fractura se analizan con ayuda de la microscopía electrónica de barrido para evaluar los micro mecanismos fractura.

En este estudio, los autores demuestran experimentalmente que los tratamientos criogénicos favorecen la precipitación de pequeños carburos, además, que presentan una distribución de tamaños más homogénea. Se observa que esta característica micro estructural es responsable de la mejora de las propiedades mecánicas del material.

Muy de la mano con el trabajo referenciado inmediatamente anterior, un estudio experimental muestra los resultados de las investigaciones de los efectos de los tratamientos térmicos criogénicos sobre las propiedades mecánicas y la microestructura del acero AISI 4340, dicha investigación fue llevada a cabo en *Concordia University, Department of Mechanical Engineering, 1455 de Maisonneuve Boulevard West, Montreal, Que., Canada* ⁵.

El experimento consiste en realizar la comparación de los resultados después de llevar a cabo varios tratamientos térmicos y pruebas mecánicas que incluyen el impacto, la dureza y la fatiga, así como también, la comparación de las características de las fracturas presentes en las muestras. Donde se evidencia que, en general, la dureza y la resistencia a la fatiga de las muestras tratadas criogénicamente son más altas; mientras que, la dureza de las muestras del mismo tratamiento criogénico disminuye respecto a un acero tratado convencionalmente. En adición, la difracción de neutrones sobre las muestras resalta que la transformación de austenita a martensita ocurrió junto con la posible formación de

⁴G. Prieto; J.E. Perez Ipiña y W.R. TuckartZ. (2013). " Cryogenic treatments on AISI 420 stainless steel: Microstructure and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, Volume 605, 27 May 2014, (Pages 236-243).

⁵S. Zhirafar, A. Rezaeian y M. Pugh. (2006). "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel," *Journal of Materials Processing Technology* 186, (2007) (pp. 298–303).

carburo durante el revenido, lo que es un factor clave en la mejora de la dureza y la resistencia a la fatiga de las muestras que son tratadas criogénicamente.

En el *School of Vehicle Engineering, Tianjin Transportation Vocational College* en Tianjin, P.R. China, su autor realiza indagaciones en cuanto a la expansión de las aplicaciones del tratamiento criogénico. Mediante el tratamiento criogénico (tratamiento criogénico profundo) a los materiales metálicos, las propiedades mecánicas de los materiales de metal se pueden mejorar, así como la resistencia al desgaste, dicha propiedad podría aumentar en gran medida⁶. La tecnología de tratamiento criogénico tiene un significativo efecto sobre algunos materiales de metal, especialmente para herramientas, moldes y herramientas de corte. Por lo que tiene gran aplicación y valor en el campo de los materiales. Sin embargo, según el autor, el tratamiento de criogenia profunda es muy estricto en el equipamiento, el proceso, así como la precisión de control. Y los principales factores de impacto son la estructura de la caja de enfriamiento, la manera de la refrigeración con nitrógeno líquido, la precisión de la temperatura y el control uniforme. En consecuencia, el equipo es costoso.

El autor considera que con una mayor investigación del tratamiento criogénico. Los campos de aplicación de esta tecnología se podrían extender gradualmente de herramientas de corte pasando por matrices de acero para la automoción, accesorios de máquinas de construcción hasta el campo de procesamiento de no metales, por lo que tiene una perspectiva perfecta.

Por otra parte, en el trabajo titulado "*evaluación de los parámetros de temple y revenido para el acero AISI/SAE1045 a escala industrial*"⁷, se realiza un experimento del tipo "mover un factor a la vez" (OFAT) para evaluar diferentes combinaciones de temperatura y tiempo en los tratamientos térmicos de temple y revenido del acero AISI-SAE 1045 a escala industrial. La evaluación se realizó con base en el análisis de la microestructura y dureza obtenidas en cada tratamiento térmico. Los resultados obtenidos sugieren que en condiciones industriales la temperatura recomendada para austenización del acero AISI/SAE1045 es 870°C y que puede existir una relación entre la temperatura de austenización y la tetragonalidad de la martensita obtenida al templar aceros simples al carbono.

⁶Zongbao, Wu.(2009)." The Expanded Application Research of Deep Cryogenic Treatment," 2009 *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. IEEE.

⁷M. Robledo, D. Mazuera, A. Ortiz; "Evaluación de los parámetros de temple y revenido para el acero AISI/SAE1045 a escala industrial". (2011). *Volumen No 49, Universidad Tecnológica de Pereira*

Durante los últimos años se han desarrollado algunos modelos físico-matemáticos sobre las transformaciones de fase en enfriamiento continuo e isotérmicas, aplicables a un amplio rango de aceros. Sin embargo, la modelización de las transformaciones en calentamiento continuo no ha tenido un desarrollo paralelo a las de enfriamiento y su avance ha sido, apreciablemente, menor. En el trabajo realizado por E. García Caballero, C. Capdevila, D. San Martín y C. García-de Andrés⁸, se aborda el estudio y modelización de las transformaciones que se producen durante el calentamiento continuo a lo largo de lo que, genéricamente, se denomina la austenización del acero. El principal objetivo es, por consiguiente, describir los procesos que controlan la formación aniso térmica de la austenita en aceros con microestructuras iniciales de ferrita y/o perlita.

Se ha utilizado el conocimiento teórico acerca de la formación isotérmica de austenita, a partir de microestructuras iniciales puras y mixtas para desarrollar un modelo para la formación aniso térmica de austenita en aceros con microestructura inicial formada por ferrita y/o perlita. Se usa la ecuación de Avrami para reproducir la cinética de formación de austenita durante el calentamiento continuo.

Igualmente, en el trabajo titulado "*influencia del acabado superficial sobre el comportamiento tribológico de capas nitro carburadas en acero x40cr1v1ov5 1*"⁹, se estudia la influencia que el acabado superficial del acero X40CrMoV5 1 tiene sobre la capa blanca o de combinación formada en el proceso del nitro carburación gaseosa. Se consideran acabados superficiales en el rango de 0,02 a 1,50 μm para Ra. Los resultados obtenidos indican que la rugosidad aumenta en todos los casos, aunque tiene poca influencia sobre el espesor de capa formada. También se ha investigado el comportamiento frente al desgaste abrasivo de las capas obtenidas que están constituidas en su totalidad por nitro carburo 8 y son de un espesor aproximado de 6 μm . Se ha encontrado un comportamiento diferenciado frente al desgaste de la zona extrema de la capa frente a la zona subsuperficial. Los resultados revelan que la capa extrema de la capa de combinación es poco efectiva frente al desgaste en relación con la capa subsuperficial. La zona de peor comportamiento es mayor para las probetas con acabados superficiales más finos

⁸E. García-Caballero, C. Capdevila*, D. San Martín y C. García-de Andrés; (2004) "Austenización de aceros con microestructuras diferentes", *Rej; MetaL Madrid* 40. pp.214-218

⁹V. Miguel, A. Calatayud, J. Coello, A. Martínez y A. Caminero; (2005). "Influencia del acabado superficial sobre el comportamiento tribológico de capas nitro carburadas en acero X40CrV1oV5 1", *Rev. Metal. Madrid Vol. Extr.* Pp.17-22

El acabado superficial del acero, para los valores de rugosidad considerados, no parece condicionar la formación de capas nitro carburadas si se asegura una atmósfera de gases suficiente en la proximidad de la superficie del material. La rugosidad de las muestras siempre aumenta con el tratamiento de nitro carburación. El incremento en los parámetros de rugosidad se mantiene prácticamente constante en la gama de acabados superficiales experimentados, lo que significa en términos relativos que la variación en los acabados más finos es mucho más importante. El comportamiento frente al desgaste abrasivo de la capa de combinación o capa blanca se caracteriza por una primera etapa en la que la pérdida de capa se produce a una velocidad más elevada que en el resto del ensayo. Además, la velocidad de desgaste en esta primera etapa es uniforme. Para los acabados más finos el espesor de capa con el comportamiento descrito es mayor, hasta un 90 %. A partir de un determinado espesor de capa de combinación, que depende del acabado superficial del acero, la efectividad del resto de capa frente al desgaste es baja. En cualquier caso, los acabados superficiales más bastos conducen a una mejor resistencia al desgaste, con espesores menores de capa poco efectiva. Los resultados obtenidos revelan que un mejor acabado superficial en la fabricación de matrices de extrusión no mejora, necesariamente, el comportamiento frente al posible desgaste abrasivo.

Así mismo, un tratamiento criogénico para mejorar la fatiga es el que se desarrolla en el artículo "*tratamientos criogénicos sobre el acero f1560 cementado para la mejora de propiedades a fatiga*¹⁰". El acero F1560 cementado se utiliza en la fabricación de engranajes y requiere valores elevados de dureza para soportar el desgaste y a la vez una buena tenacidad para evitar problemas de fatiga. Los tratamientos criogénicos se vienen utilizando desde hace tiempo para mejorar las propiedades de diversos componentes en automoción y podría ser una manera de aumentar la vida de los engranajes, aunque uno de los inconvenientes de estos tratamientos es la duración de los mismos. En este trabajo, se ha estudiado la influencia de los tratamientos criogénicos sobre propiedades como fatiga, resiliencia y desgaste de un acero F1560 cementado. También se ha visto la diferencia entre tratamientos criogénicos convencionales y tratamientos criogénicos multi etapa, cuya principal ventaja es que son más cortos. Por último, se ha intentado estabilizar

¹⁰M. Preciado, M. Solaguren-Beascoa, P. M. Bravo, J. M. Alegre; (2008). "Tratamientos criogénicos sobre el acero f1560 cementado para la mejora de propiedades a fatiga"; *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, Vol. 1.

la austenita retenida, ya que no está claro si la presencia de la misma resulta beneficiosa

Después de un tratamiento criogénico, la dureza no se ve alterada por la transformación de austenita retenida en martensita. - Los tratamientos criogénicos no parecen modificar las durezas del núcleo. - Propiedades como la resiliencia o la vida a fatiga no se ven afectadas por los tratamientos criogénicos. - El desgaste es la propiedad que se mejora con el tratamiento criogénico, resultando un tratamiento sin revenido anterior al tratamiento criogénico y un revenido posterior al mismo. - Finalmente, no parece que haya diferencia entre dar un tratamiento criogénico convencional o multi etapa, desde el punto de vista de propiedades, resultando este último más ventajoso desde el punto de vista industrial, por ser más corto.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Debido a la exigencia del sector industrial por buscar materiales con cada vez estándares de resistencia más altos, se tiene que explorar en diversos procesos que realicen cambios favorables a las propiedades mecánicas, en los cuales está uno de los más relevantes como lo es el tratamiento térmico, el cual puede realizar a bajas o altas temperaturas, mostrando cambios significativos a la microestructura de los elementos.

En primer lugar, el proyecto se sustenta en un ambiente académico, debido a que nace de la necesidad de realizar e investigar los procesos de mejoras para el acero ASI/SAE 1045, y así, determinar cómo afecta el comportamiento del material un tratamiento térmico de templado desde temperaturas intercríticas, criogénico y revenido, expuesto a un ensayo de desgaste abrasivo, pues este es un material de uso general, por su buena maquinabilidad utilizado en la fabricación de una variedad de tornillos, bielas, pinzas hidráulicas, ejes, variedad de clavijas, rollos, postes, árboles y muchas otras piezas de metal, por lo tal, es tan apetecido y exhorta a que se hagan investigaciones de mejoras. Lo anterior es una razón de peso para trabajar en este campo tanto a nivel internacional como a nivel local.

En segundo lugar, en un ambiente tecnológico, el proyecto se argumenta en la insuficiencia de conseguir herramientas y componentes metálicos que se comporten mejor ante los implacables y exigentes factores industriales, pues, investigaciones recientes en el campo de los tratamientos térmicos apuntan al empleo del frío como un camino para conseguir estructuras con mejores características de dureza y resistencia al desgaste. Actualmente, el sector utiliza los procesos a temperaturas bajo cero para aumentar la resistencia la fatiga, reducir la fragilidad y las tensiones

internas de los aceros y sus aleaciones con el fin de prolongar la vida útil de las piezas en servicio.

Por último, el proyecto se valida en un ámbito personal, en el reforzar los conocimientos prácticos y teóricos relacionado con los tratamientos térmicos y las posibilidades de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros, para ir un paso más allá de ellas para qué sirven estas pruebas y saber cuál es la forma más adecuada de aprovechar las propiedades de un material dependiendo de su uso.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la relación del carbono en la martensita y la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI/SAE 1045 tratado desde temperaturas intercríticas seguido de un tratamiento criogénico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✦ Establecer la secuencia de tiempos y temperaturas basados en los ensayos de dilatometría para el acero AISI SAE 1045 que incluya un ciclo criogénico.
- ✦ Realizar ensayo por desgaste abrasivo a las probetas tratadas térmicamente, de acuerdo con la norma ASTM G-65.
- ✦ Analizar la microestructura del acero AISI/SAE 1045 después de ser sometido a tratamiento térmico de criogenia, temple y revenido.
- ✦ Determinar el porcentaje de carbono presente la martensita utilizando microscopia electrónica de barrido y establecer la relación los valores de desgaste encontrados antes y después de los tratamientos térmicos.

3. MARCO TEORICO

3.1 ACERO

El acero es, básicamente, una aleación de hierro y de carbono. El contenido del carbono en el acero es relativamente bajo. La mayoría de los aceros tienen menos de 9 átomos de carbono por cada 100 de hierro en el acero. Como el carbono es más ligero que el hierro, el porcentaje de masa de carbono en el acero es casi siempre menos del 2%. La forma convencional de expresar el contenido de los elementos en las aleaciones es por el porcentaje de la masa total con que cada uno contribuye. El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0.5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0.1%. Además, como puede apreciarse en la figura 3, si el contenido de 8 carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0.1%.

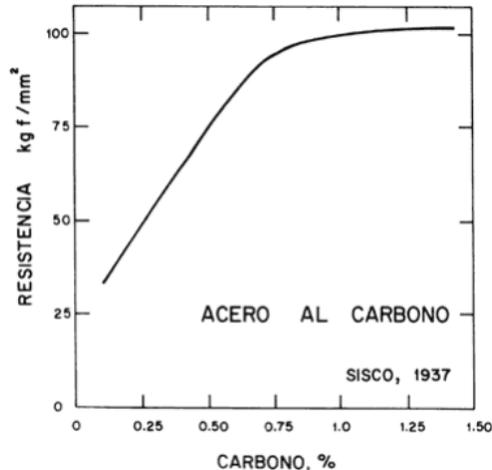


Figura 3. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros.

El carbono, sin embargo, generalmente reduce la ductilidad del acero. La ductilidad es una medida de la capacidad de un material para deformarse, en forma permanente, sin llegar a la ruptura. Por ejemplo, el vidrio de las ventanas no es nada dúctil. Cualquier intento por deformarlo, estirándolo o doblándolo, conduce inmediatamente a la fractura. El aluminio, por el contrario, es sumamente dúctil.

3.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El objetivo de estos procesos es que las herramientas posean suficiente tenacidad con una determinada dureza y resistencia al desgaste. Los tratamientos convencionales para obtener estas características son el TEMPLE Y REVENIDO. En los aceros, La fase gamma se llama austenita, es una fase de alta temperatura y tiene una estructura cúbica centrada en las caras (FCC). La fase alfa se llama ferrita. La ferrita es un componente común en aceros y tiene una estructura cúbica centrada cuerpo (BCC). El Fe_3C se llama cementita y el eutéctico corresponde a la mezcla ferrita +cementita se denomina perlita (fig. 3).

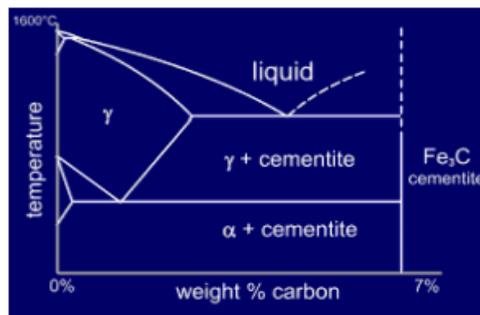


Figura 3. Diagrama Hierro-Carbono

Fuente: BLOG LA TECNOMANU. Cateto cuadrado [En línea]. 2011. Disponible en Internet: <URL:www.catetocuadrado.wordpress.com>

La finalidad de los procesos de temple y revenido es originar cambios microestructurales como¹¹:

1. Transformación de una estructura perlítica – ferrítica (aceros hipoeutectoides) o perlítica – cementítica (aceros hipereutectoides) a una estructura martensítica.
2. Formación de carburos después del proceso de revenido; esto con el fin de mejorar las propiedades, como por ejemplo la dureza.

El ciclo térmico de estos aceros altamente aleados consta generalmente de cuatro etapas:

¹¹ IRIAS, Adrián y STACKPOLE, César. Aumento en la resistencia al desgaste de aceros para herramientas a través de la aplicación de tratamiento criogénico, proyecto de grado ingeniería de materiales. 2004.

- a) Precalentamiento: Minimizar tensiones que ocurren durante el temple.
- b) Austenización: Transformar totalmente la matriz en una estructura austenítica, es un proceso dependiente de la temperatura y el tiempo. Altas temperaturas de austenización pueden proporcionar mayor dureza y resistencia al desgaste, pero menor tenacidad y mayor probabilidad de grietas, bajas temperaturas lo contrario.
- c) Enfriamiento hasta temperatura ambiente: Una vez austenizado el acero, enfriar a una velocidad mayor que la velocidad crítica de enfriamiento de la curva TTT del acero correspondiente.
- d) Revenido: Después del temple, el acero presenta una microestructura consistente en martensita, austenita retenida y carburos. Las herramientas en este estado no tienen aún aplicación industrial por la gran fragilidad presentada por la martensita tetragonal resultante del temple y la posible transformación de la austenita retenida. Por tanto, es necesario realizarles un tratamiento de revenido para aumentar la tenacidad por medio de un distensionado y transformación de la martensita, y al mismo tiempo, asegurarse que no haya cambios dimensionales tanto en servicio como en la realización de posibles tratamientos adicionales.

Cuando un acero de herramientas es templado, la matriz no se transforma completamente en martensita, ya que la temperatura de terminación de formación de la martensita se encuentra muchas veces por debajo de la temperatura ambiente (Figura 4) y los medios usados para templar como son el agua, el aceite o salmuera entre otros se encuentran a temperaturas superiores o iguales a esta temperatura originando una transformación incompleta y dando como resultado la presencia de alguna cantidad de austenita, la cual es denominada austenita retenida. Esta estructura es muy suave lo que origina menor resistencia al desgaste. La cantidad de austenita durante el temple aumenta al aumentar:

1. El contenido de elementos que hacen disminuir las temperaturas de inicio y fin de la martensita (M_s y M_f).
2. La temperatura y tiempo de austenización por disolver una mayor parte de elementos de aleación que estaba en forma de carburos.
3. El espesor de la pieza.

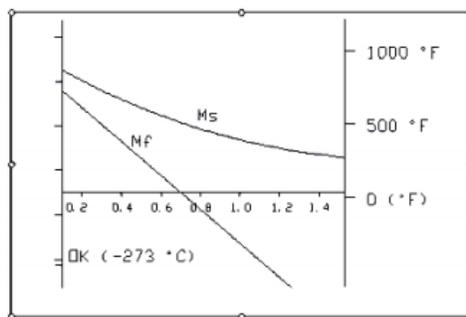


Figura 4. Temperaturas Ms y Mf en función del contenido de carbono para aceros al carbono. Los elementos de aleación disminuyen aún más las temperaturas Ms y Mf

Fuente: RUSIÑOL, Marco. Efecto del Tratamiento Criogénico en las Propiedades Mecánicas de los Aceros de Herramienta de Trabajo en Frío. Proyecto de Grado Ingeniería de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Barcelona. 2004

3.3 TEMPLE DE LOS ACEROS

Uno de los atributos del acero, el cual es con toda certeza el de mayor significado para los tratamientos térmicos es su capacidad para endurecerse. Este atributo tiene un doble significado, es importante no únicamente con relación a la obtención de un alto nivel de dureza o resistencia por tratamiento térmico, sino también con relación a la obtención de un alto grado de tenacidad por medio del tratamiento térmico, lograda a partir de una microestructura deseable, generalmente martensita revenida o bainita inferior.

Debe entenderse con claridad que el endurecimiento (hardenability) se refiere al “ancho de endurecimiento” que se puede lograr bajo ciertas condiciones de enfriamiento bien establecidas, y no a la dureza máxima que se puede obtener en un acero dado. La máxima dureza depende totalmente del contenido de carbono, mientras que el endurecimiento depende de factores como: el carbono, los elementos de aleación, y del tamaño de grano de la austenita.

Por lo antes mencionado, es claro que para obtener una microestructura martensítica con las propiedades deseables, el acero debe ser tratado térmicamente; el temple y el revenido son los tratamientos térmicos comúnmente utilizados para este fin y por ello representan el tratamiento térmico final utilizado

ordinariamente para obtener las propiedades óptimas en materiales tratados térmicamente.

El templado involucra un calentamiento hasta la región de estabilidad de la austenita (temperatura de austenización), mantener el material durante un cierto tiempo a esta temperatura de austenización y después un enfriamiento continuo desde esta temperatura, hasta por debajo de la temperatura de inicio de la formación de la martensita (M_s), a una velocidad de enfriamiento tan grande (mayor que la crítica) que la transformación a perlita o bainita se inhibe y el producto de la transformación será la martensita. El propósito de este tratamiento es el de obtener, para cada composición de acero, la dureza máxima¹².

3.4 TRATAMIENTO TÉRMICO CRIOGÉNICO

El tratamiento criogénico consiste en la exposición de los materiales a temperaturas muy bajas cercanas al punto de ebullición del nitrógeno, -196°C , al igual que el proceso subcero el descenso y el posterior calentamiento hasta temperatura ambiente debe ser muy lento y controlado para evitar la aparición de tensiones en el material que puedan generar grietas o fisuras.

Este tratamiento produce un incremento de la dureza entre 2 y 5 puntos Rockwell C, transforma la austenita en martensita y también produce la precipitación de nanos carburos sobre los límites de grano. Una ventaja adicional, con respecto al tratamiento térmico subcero, es que el proceso criogénico reduce las segregaciones (concentraciones localizadas de aleantes) ya que promueve el transporte de los aleantes del acero homogenizando contenido en la pieza; además, globuliza los carburos, lo que aumenta la tenacidad del material. Estos dos últimos efectos dan una mayor resistencia y durabilidad a los materiales tratados a temperaturas criogénicas, respecto de los tratados con temperaturas subcero.

El tratamiento criogénico tiene dos modalidades: el tratamiento seco y el tratamiento húmedo. En el primero las piezas están en contacto con nitrógeno gaseoso durante

¹² M.I. Felipe Díaz Del Castillo Rodríguez M.I. Alberto Reyes Solís "Aceros, Estructuras Y Aceros, Estructuras Y Tratamientos Térmicos" Cuautitlán Izcalli. 2012

todo el proceso, mientras que en el segundo las piezas al llegar a la temperatura de sostenimiento pueden estar en contacto con el nitrógeno líquido¹³.

3.5 TRATAMIENTO TÉRMICO REVENIDO DEL ACERO

El acero en el estado endurecido carece de aplicación práctica debido a su condición de fragilidad, que surge por la formación de la martensita que trae aunados grandes esfuerzos internos; por ello, es necesario hacer un relevado de esfuerzos a fin de eliminar en cierta medida dichos esfuerzos. Por esta razón, el revenido tiene como finalidad liberar los esfuerzos internos, mejorando la ductilidad y la tenacidad del acero, pero sin que su propósito sea eliminar la dureza obtenida por el templado.

El revenido del acero comprende el calentamiento del acero endurecido a una temperatura abajo de la crítica inferior (A_{c1}) y enfriándolo a una velocidad conveniente. Por lo general, dentro del rango de temperaturas de revenido, hay un decremento en dureza y un mayor aumento en tenacidad, conforme aumenta la temperatura del revenido. El rango de temperaturas de 200°C a 450°C (400°F a 800°F) representa una zona divisoria entre aquellas aplicaciones que requieren dureza y aquellas que requieren tenacidad.

Si la principal propiedad deseada es la dureza o resistencia al desgaste la pieza se reviene a menos de 200°C , en estas condiciones los esfuerzos residuales se reducen notablemente cuando se alcanzan los 200°C . Por otra parte, si se desea que la principal propiedad sea la tenacidad, la pieza se reviene por arriba de 450°C , temperaturas por arriba de ésta prácticamente logran que los esfuerzos internos o residuales desaparezcan casi en su totalidad.

Es importante analizar lo que le sucede a la martensita al calentar el acero dentro de los rangos especificados anteriormente. Como ya quedó establecido con anterioridad, la martensita es una solución sólida supersaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal a cuerpo centrado.

Esta es una condición meta estable dado que a temperatura ambiente la fase que debería estar presente es la ferrita con estructura cristalina BCC.

¹³ Badu S., Rejendran, P Y Rao K. Cryogenic Treatment Of M1, En19 Y H13 Tool Steels To Improve Wear Resistance.

Así, al someter a una cierta temperatura al acero, se le está suministrando energía, la cual es aprovechada por los átomos de carbono difundiendo fuera de la martensita precipitándose como carburo y el hierro como ferrita con red BCC.

Cuando se calienta el acero al carbono en el rango de 400°C a 200°F (100°F a 400°F), la estructura adquiere una tonalidad negra y es a veces conocida como martensita negra. La martensita original en la condición de temple está empezando a perder su estructura cristalina tetragonal mediante la formación de un “carburo de transición” hexagonal compacto (carburo épsilon) y martensita de bajo carbono.

En esta condición el acero endurece ligeramente, sobre todo aquellos aceros con alto contenido de carbono, y bajo estas condiciones el acero posee una alta resistencia, lo que trae como consecuencia una baja en la ductilidad y la tenacidad. Sin embargo, lo más importante es que gran parte de los esfuerzos internos se eliminan.

Calentando en el rango de 230°C a 400°C (450°F a 750°F) cambia el carburo épsilon a cementita ortorrómbica (Fe_3C), la martensita de bajo carbono se hace ferrita BCC y cualquier austenita retenida se transforma en bainita. Los carburos son demasiado pequeños para ser resueltos mediante el microscopio óptico y la estructura entera se colora rápidamente en una masa negra. La resistencia es mayor de 200,000 Psi, la ductilidad ha aumentado ligeramente, pero la tenacidad es aún baja. La dureza está entre 40 y 60 Rc dependiendo de la temperatura de revenido.

El revenido en el rango entre 400°C y 650°C (750°F a 1200°F) propicia el crecimiento de partículas de cementita lo que a su vez aumenta la cantidad de ferrita que es la fase que formará eventualmente la matriz del material. Esta condición hace que el material adquiera una coloración más clara al ser atacado.

Las propiedades mecánicas en este rango son: Resistencia a la tensión 125,000 - 200,000 Psi, elongación 10 - 20 % en 2 pulgadas, dureza 20 - 40 Rc y un aumento rápido en la tenacidad. Calentando en el rango de 650°C a 720°C (1200°F a 1330°F) produce partículas grandes de cementita globular. Esta estructura es muy suave y tenaz y es semejante a la estructura de la cementita esferoidal obtenida directamente de la austenita mediante el recocido de esferoidización¹⁴.

¹⁴ F. Díaz Del Castillo, A. Reyes “ACEROS, ESTRUCTURAS Y ACEROS, ESTRUCTURAS Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS” CUAUTILÁN IZCALLI. 2012

3.6 DESGASTE ABRASIVO

La Norma ASTM G-65 define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella. La diferencia entre desgaste abrasivo y desgaste por deslizamiento es el grado de desgaste. Entre los cuerpos involucrados (mayor en el desgaste abrasivo), ya sea por la naturaleza, tipo de material, composición química, o por la configuración geométrica.

Como se muestra en la figura 1, existen básicamente de los tipos de desgaste abrasivo, estos son: desgaste abrasivo a de los cuerpos o a tres cuerpos. En abrasión a de los cuerpos, el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto, mientras que la abrasión a tres cuerpos, el desgaste es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo. Como ejemplo de desgaste abrasivo a dos cuerpos, se tiene un taladro penetrando una roca, mientras que a tres cuerpos se puede citar el desgaste sufrido por las mandíbulas de una trituradora al quebrar la roca, o por la presencia de partículas contaminantes en un aceite que sirve para lubricar de las superficies en contacto deslizante¹⁵.

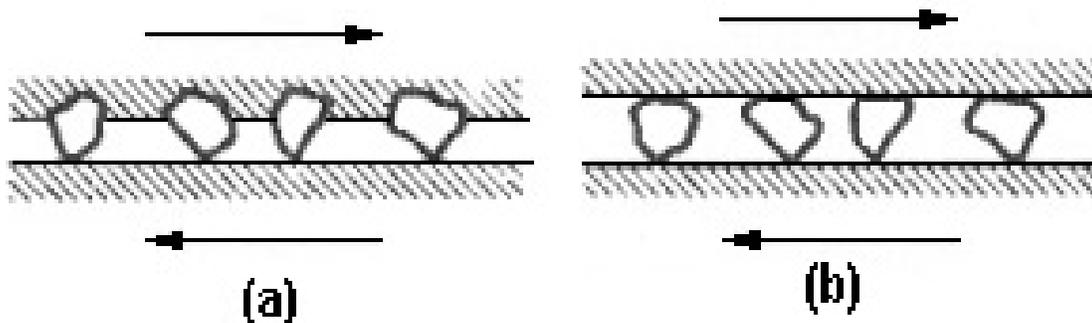


Figura 1. Desgaste abrasivo a) a de los cuerpos y b) a tres cuerpos

3.7 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada

¹⁵ Recuperado de: <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf> 28-Apr-2006

de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retro dispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semi cuantitativo y de distribución de elementos en superficies.

Se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores científicos y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

La preparación de las muestras es relativamente sencilla las principales características son: muestra sólida, conductora. Caso contrario, la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. De lo contrario, las muestras no conductoras se trabajan en bajo vacío¹⁶.

3.8 DILATOMETRÍA

Es una técnica que permite determinar la variación en longitud que sufre un material sometido a un tiempo y temperatura determinados. Este tipo de ensayo requiere un dilatómetro que consta básicamente un generador de temperatura y un equipo de medición de longitud, esta longitud se puede determinar ya sea por la medición directa o por comparación respecto a un material con coeficiente de dilatación conocido.

Los resultados de este ensayo se usan para construir ciclos de temperatura y transformaciones de fase como la transformación de ferrita a austenita del hierro.

¹⁶ Recuperado de: <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>

También se puede encontrar la temperatura de fusión de un elemento durante el calentamiento, si se realiza una gráfica de temperatura contra tiempo se encuentra la velocidad de contracción o expansión del material.

Los ensayos de dilatometría resultan de gran ayuda a la hora de conocer las temperaturas o tiempos a los cuales se están dando los cambios dimensionales o micromecanismos en el material a estudiar.

4. METODOLOGÍA

Para la realización del proyecto se inicia con la fase de investigación, en la cual se debe realizar una recopilación de información para el desarrollo del estado del arte, por medio de bases de datos especializadas, artículos científicos, textos, cursos, videos, etc., acerca de los diferentes tratamientos térmicos llevado a cabo en aceros y el efecto que estas producen sobre las propiedades mecánicas del material. Igualmente, se debe consultar las distintas herramientas informáticas y laboratorios de pruebas disponibles en la Universidad Distrital F.J.D.C. o en otros lugares donde se haga necesario, esto con el fin de seleccionar las más adecuadas para la investigación y así mismo, buscar tutoriales, manuales, videos, cursos, textos, etc., para reconocer operativamente el funcionamiento, las características y manipulación de cada uno, a partir de las necesidades del proyecto.

Seguido a esto se realiza la recolección y estudio de las normas involucradas en este tipo de ensayos que se plantean en la propuesta.

Una vez se tenga el conocimiento necesario, se debe comenzar la fase de la adquisición del material acero AISI/SAE 1045 en condiciones de entrega del fabricante y certificado, posteriormente se elaborarán dos tipos de probetas que corresponden a las necesarias para la dilatometría y las que cumplan para el ensayo de desgaste abrasivo. Para este último grupo se generarán distintas probetas; luego, se procede con los tratamientos térmicos templado, criogénico y revenido, culminada esa fase se realizará el ensayo de desgaste abrasivo.

Luego de realizado esto, se hacen las preparaciones metalográficas para realizar las observaciones en el microscopio electrónico de barrido (SEM) y por último se articula toda la información y los datos obtenidos, de esta forma relacionar los posibles cambios que ocurren en la estructura del material al ser expuesto a diversos tratamientos térmicos aplicando una prueba específica de desgaste abrasivo. Una vez realizado esto, se procede a realizar el análisis a cada una de las piezas, y se guardan los resultados obtenidos.

6. PRESUPUESTO

Se pone en consideración el siguiente presupuesto para crear un marco de referencia de los materiales más relevantes para el desarrollo del proyecto: En primer lugar, se toma en consideración la financiación por parte de los autores del proyecto, en el cual se incluyen los gastos requeridos para la ejecución del proyecto:

Recurso	Costo por Hora	Horas	Costo Total
Ejecutores (Estudiantes)	\$ 40.000	700	\$ 28.000.000
Materiales y Suministros	-----	----	\$ 300.000
Dilatometría	-----	----	\$ 1.000.000
SEM	\$ 180.000	4	\$ 720.000
Fotocopias y Libros	-----	----	\$ 100.000
Energía e internet	-----	----	\$ 400.000
Transporte	-----	----	\$ 300.000
Total	-----	----	\$ 30.820.000

En segundo lugar, se toma en cuenta la financiación o contrapartida por parte de la Universidad Distrital F.J.D.C. y laboratorios particulares especializados, en cual se incluyen los elementos físicos tanto de hardware como de software para la realización del proyecto:

Recurso	Costo por Hora	Horas	Costo Total
Supervisor (Tutor)	\$ 60.000	40	\$ 2.400.000
Base de Datos Especializadas	-----	----	\$ 500.000
Desktop	-----	----	\$ 2.000.000
Laptop	-----	----	\$ 2.000.000
Tratamientos térmicos	-----	----	\$ 1.000.000
Prueba de desgaste abrasivo	-----	----	\$ 500.000
Metalografía óptica	-----	----	\$ 3.000.000
Total	-----	----	\$ 11.400.000

En resumen, se tiene:

Financiamiento	Costo
Autores	\$ 30.820.000
Universidad Distrital F.J.D.C.	\$ 11.400.000
Total	\$ 42.220.000

*Estos valores son una aproximación, basado en su costo según la duración estimada del proyecto.

7. BIBLIOGRAFIA

Sıtkı, Akincioğlu; Hasan, Gökkaya y İlyas Uygur. (2015). "A review of cryogenic treatment on cutting tools" (pp. 3-16). Springer-Verlag London 2015.

Belzunce, Francisco y Pérez, Marcos. (2014). "The effect of deep cryogenic treatments on the mechanical properties of an AISI H13 steel," en *Materials Science and Engineering: A*, Volume 624, 29 January 2015, (Pages 32-40). ScienceDirect.

G. Prieto; J.E. Perez Ipiña y W.R. TuckartZ. (2013). " Cryogenic treatments on AISI 420 stainless steel: Microstructure and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, Volume 605, 27 May 2014, (Pages 236-243).

S. Zhirafar, A. Rezaeian y M. Pugh. (2006). "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel," *Journal of Materials Processing Technology* 186, (2007) (pp. 298–303).

Zongbao, Wu. (2009)." The Expanded Application Research of Deep Cryogenic Treatment," 2009 *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. IEEE.

M. Robledo, D. Mazuera, A. Ortiz; "Evaluación de los parámetros de temple y revenido para el acero AISI/SAE1045 a escala industrial". (2011). *Volumen No 49, Universidad Tecnológica de Pereira*.

E. García-Caballero, C. Capdevila*, D. San Martín y C. García-de Andrés; (2004) "Austenización de aceros con microestructuras diferentes", *Reí; Metal Madrid* 40. pp.214-218

V. Miguel, A. Calatayud, J. Coello, A. Martínez y A. Caminero; (2005). "Influencia del acabado superficial sobre el comportamiento tribológico de capas nitro carburadas en acero X40CrV10V5 1", *Rev. Metal. Madrid Vol. Extr.* Pp.17-22

M. Preciado, M. Solaguren-Beascoa, P. M. Bravo, J. M. Alegre; (2008). "Tratamientos criogénicos sobre el acero f1560 cementado para la mejora de propiedades a fatiga"; *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, Vol. 1.