

HIERRO NODULAR AUSTEMPERIZADO (A.D.I.) UNA ALTERNATIVA VIABLE EN REDUCCIÓN DE PESO ESTRUCTURAL

*Francisco Lagunas Moreno.¹
Ricardo Altamirano Ríos.²
Israel Guadarrama Hernández.²*

Resumen

El presente estudio se realizó motivado por las exigencias ambientales a nivel mundial, para lograr la disminución del peso vehicular a fin de racionalizar el uso de energía utilizada en los desplazamientos, así como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, consiguiendo mejorar los índices de sustentabilidad óptimo, al reducir el peso muerto. Esto requirió que el hierro nodular, fuera sometido a un tratamiento térmico en dos fases, que consistieron en una velocidad grande en el enfriamiento aplicado en la primera etapa y sosteniendo un nivel isotérmico en la segunda para obtener la transformación en la matriz deseada. Sometido a las pruebas físicas, mecánicas y metalográficas se obtuvo, en comparación con un acero, al aplicar igualdad de cargas el hierro nodular austemperizado requirió un treinta por ciento de sección transversal menor. Lo anterior abre las posibilidades de revelar el peso muerto sobre todo en los vehículos de transporte, ferroviario carretero etc., que transformado en flete útil contribuirá a eficientar esa operación.

Palabra-clave: ADI Austemperid, Dúctil Iron, Bainita, Austemperizado.

(1) *Profesor de Instituto Politécnico Nacional ESQIE DIMM Apdo. Postal 75-875 México D. F. C.P. 07300. TEL (01) 5557296000 Ext. 55270 mail Ferrolag@hotmail.com.*

(2) *Estudiantes de Instituto Politécnico Nacional ESQIE DIMM Apdo. Postal 75-875 México D. F. C.P. 07300. TEL (01) 5557296000 Ext. 55270 mail i_guadarrama@hotmail.com*

INTRODUCCIÓN

Métodos de Obtención de Hierro Nodular

En la actualidad existen varios métodos para la obtención de hierro dúctil, a continuación se describirán brevemente algunos de los más importantes (1):

El método del cucharón abierto: Es el método más simple para la obtención de hierro dúctil. Consiste básicamente en vaciar rápidamente el metal líquido en el cucharón de reacción, en la parte inferior del cucharón de reacción se deposita la aleación que contiene magnesio. Para poder obtener una buena recuperación de Magnesio en este método se recomienda que la altura del cucharón de reacción se a de 2 1/2 a 3 veces el diámetro del mismo, esto es con la finalidad de prolongar el contacto entre el Hierro y los vapores de Magnesio.

En este método las recuperaciones de magnesio son de aproximadamente del 20 al 25 %, la recuperación del magnesio depende de factores como: la temperatura de vaporización del Magnesio y la baja solubilidad en el hierro.

El método del sándwich. Este es un método que se origina del método de cucharón abierto, pero con una modificación en el fondo de la olla (bolsa, recoveco, depresión). El término de sándwich se deriva porque a la aleación nodulizante se le cubre con un material antes de adicionar el Hierro líquido para retardar el inicio de la reacción. Este método es uno de los mas usados en la producción de hierro dúctil y consiste en una olla de reacción de altura de 2 1/2 a 3 veces el diámetro de la misma y en el fondo de la olla de reacción un recoveco para el alojamiento de U aleación que aporta el Magnesio y el material que cubrirá la aleación de Magnesio. La recuperación de Magnesio es mayor que en el método de cucharón abierto. El material que cubre a la aleación nodulizante puede ser pedacería de acero, arena recubierta con resina Shell y carburo de calcio.

Como beneficio de este método tenemos el enfriado de la aleación nodulizante, por el material que se ocupa para cubrir la aleación, ya que el Magnesio tiene un bajo punto de fusión y de esta forma podemos tener una mayor recuperación de Magnesio. Como desventaja de este método tenemos la pérdida de temperatura (+/- 40°C) por el calor adicional requerido para fundir el material que recubre la aleación nodulizante. El metal líquido debe caer del lado contrario al recoveco, el procedimiento para la obtención del hierro nodular por este método es el siguiente:

a) Adicionar la aleación que aporta el Magnesio en el recoveco de la olla de reacción.

b) Adicionar el material que cubre la aleación que aporta el magnesio

c) Vaciar el metal a la olla de reacción

b) Transferir el metal a la olla de vaciado y realizar la inoculación

El método donde se ocupa arena recubierta como material que cubre la aleación nodulizante se le conoce como el método del gatillo. Con el metal líquido se forma una película de vidrio la cual tiene que ser perforada para dar inicio a la reacción de nodulización, como desventaja de este método se tiene la gran cantidad de escoria generada ⁽¹⁾.

Método tundish. La primera información que se tuvo del método de olla cubierta fue publicada en 1978. Para 1988 en USA se ocupa para producir el 40 % del hierro nodular, teniendo recuperaciones de magnesio de un 60 a 70 %. La pérdida de Mg como MgO son reducidas considerablemente debido a que una vez que el orificio de la olla es cubierto con metal no hay posibilidad que pueda entrar oxígeno nuevo a la olla. Debido a que la cubierta resulta en un sellado hermético se requieren algunos métodos de ventilación para liberar la presión generada por el tratamiento, con el fin de evitar deformaciones en el orificio de la olla, realizando un barrenado de 12 mm aprox. en la parte superior de la olla. En este método se tiene que cambiar la cubierta de la olla en cada tratamiento siendo esto una desventaja para este método. Pero esta desventaja fue superada por la incorporación de una abertura separada al orificio de alimentación del metal líquido, por medio de la cual se adiciona la aleación nodulizante siendo posteriormente cerrada por un tapón de acero. Muchos diseños de ollas cubiertas incorporan el uso de una división en la parte baja de la olla; también se recomienda el uso de un material de recubrimiento para la aleación nodulizante en pequeñas cantidades comparada con el método sándwich. Las desventajas principales de este método son: Como en este método no se puede ver el nivel de la olla se requiere de la ayuda de una escala y la constante reparación de las tapas debido a la gran cantidad de escoria que se acumula en ellas. Las principales ventajas son: La recuperación de Magnesio, la eliminación de la flama, la reducción del 90 % de vapores, se reduce la salpicadura de metal, reduciendo pérdidas de carbono y temperatura.

Método de inmersión. En este método un dispositivo refractario en forma de campana conteniendo el material nodulizante es sumergido profundamente en el metal líquido en la olla, el material nodulizante es usualmente contenido en la campana por una lamina de metal o algún otro dispositivo para su contención. Se recomienda el uso de una olla de altura dos veces el diámetro de la misma con el fin de tener una mayor recuperación de Magnesio, ya que los vapores de Magnesio tendrán un mayor contacto con el metal por la distancia que recorren. La vida de la campana de inmersión depende del cuidado de la misma principalmente evitar cambios bruscos de temperatura, se recomienda el precalentamiento de la campana y evitar el enfriamiento de la misma durante su uso. Desventajas: la gran pérdida de temperatura debido a la masa y ensamble de la campana, es un método para procesos continuos. Ventajas: se requiere menos cantidad de material nodulizante que en otros métodos, menos emanación de humos y flama, menos cantidad de escoria, reduce la salpicadura de metal, con una aleación nodulizante del 5 % en Magnesio se pueden tener recuperaciones de Magnesio del 50 % (1).

El método de tratamiento en molde. Este proceso consiste en una cámara de reacción especial que es incorporada dentro de los corredores y sistemas de alimentación del molde, la aleación nodulizante es colocada dentro de la cámara y la reacción ocurre durante el proceso de vaciado. Este proceso requiere de un control adecuado para producir un buen esferoidizado y una buena pieza. Una reacción controlada entre la aleación nodulizante y el metal líquido depende de un gran número de condiciones como: temperatura del metal, la velocidad de alimentación, la condición de la aleación, el tamaño y la geometría de la pieza; sin

embargo estos factores son fácilmente controlables pero se requiere conocimiento y experiencia para manipularlos correctamente. Las recuperaciones de Magnesio son del 70 y 80 % aunque se han logrado aproximaciones al 100 %. Este método requiere de contenidos de azufre de 0.01 % o menores. Las desventajas principales de este método son: el incremento de la escoria y otros productos de reacción atrapados en la pieza. La necesidad de realizar pruebas de nodularidad en cada pieza producida debido a que cada molde es un tratamiento.

El método del tapón poroso: La intensa agitación por la introducción de una gran cantidad de burbujas de gas inerte a través de la parte baja de la olla puede ser usada efectivamente para la nodularización. Con esta acción turbulenta la aleación reactiva de Magnesio u otro material nodulizante puede ser adicionada en la parte superior del baño en las ollas de tratamiento; la acción de mezclado arrastra al material a la parte baja de la olla de tratamiento donde la reacción respectiva tiene lugar libre de la presencia del oxígeno existente en la atmósfera. La recuperación de Magnesio puede ser como máximo de 35 por ciento, sin embargo el excesivo burbujeo reduce esta recuperación rápidamente. El tiempo normal de burbujeo para el nodulizado es de 15 a 30 segundos. Cuando el proceso de tapón poroso es usado con Magnesio generalmente se conjuga con una operación de desulfurado en el mismo reactor. La pérdida de temperatura con el burbujeo del gas inerte es una desventaja del proceso. Para ollas grandes se requiere más de un tapón poroso para poder lograr una agitación adecuada.

Método del reactor basculante: Es un reactor cilíndrico capaz de girar 180° sobre un eje estacionario, este proceso es capaz de usar Magnesio puro debido a la habilidad de poder ser sellado herméticamente ⁽¹⁾. Una cámara de reacción con su propia puerta es construida con refractario perforado para contener el material nodulizante que está fuera de contacto con el hierro líquido cuando está en posición horizontal; cuando el reactor es rotado a su posición vertical la reacción entre el Magnesio y el Hierro líquido se inicia generando una presión de 4 a 5 Psi. Como ventajas de este método se pueden mencionar las siguientes: se puede usar una aleación de bajo costo, se puede desulfurar y nodulizar al mismo tiempo. Como desventajas de este método tenemos: la violencia de la reacción y el elevado costo del equipo.

ALCANCE DE LA PRUEBA DEL POTENCIAL DEL ADI CONVERSIÓN DE POTENCIAL

Este estudio examina dos oportunidades de conversión para el uso del hierro dúctil austemperizado (ADI), obtenido mediante un tratamiento térmico, las propiedades en detalles y consideraciones del plan para establecer una confianza para el desarrollo del producto en un futuro. El hierro dúctil austemperizado (ADI) es una transformación del metal para la conversión de su uso o aplicación de mayores requerimientos. Este material está esencialmente en una etapa de lanzamiento debido a la innovación por lo que se requiere de un tratamiento térmico conocido como austemperizado el cual ofrece a la ingeniería una alternativa para la sustitución del acero, hierro y aluminio cuando se requiere mayor resistencia y el aligeramiento de peso. Este no puede reemplazar a los tres

metales en todas las aplicaciones. Pero para algunos casos, puede ofrecer arriba del 50% de ahorro, así como una reducción de peso de los otros componentes (incluso para aluminio). Esto es debido a las propiedades que el material posee. Por ejemplo, este material es una alternativa para todas las aplicaciones del acero. Las aplicaciones de alta resistencia son requeridas en el alto-contacto que existe en el rolado, el cual tiende a incrementar las condiciones de fatiga, además de la fractura por dureza e impacto con una resistencia elevada. Las propiedades de fatiga para el ADI son comparables a los aceros tratados térmicamente. Además, la calidad del ADI excede las propiedades que impactan a la resistencia, las propiedades a temperaturas bajas y endurecimiento superficial de un acero **8620**.

Mientras el ADI puede producirse con la dureza de 30 - 50 Rc, la resistencia requerida para su uso a un nivel de dureza establecido es superior al de muchos materiales convencionales. En algunas aplicaciones el ADI con 42 - 46 Rc ha reemplazado durezas de 60 Rc en carburizado y endurecido en un acero 8620 por las propiedades que este presenta. Siguiendo esto, el tratamiento térmico para el ADI permite al material tener un excelente desarrollo contra la fatiga en un contacto de rolado que le permite establecer un desarrollo óptimo aún en las aplicaciones donde existan tensiones de contacto que excedan 250 ksi. La clave para aumentar las propiedades de estos materiales, es propiamente el diseño de los componentes tomando en cuenta las ventajas que estos ofrecen. El diseño es lo que le permite al ADI reemplazar al acero y los componentes de aluminio (debido a la alta resistencia por unidad de área que lo caracteriza) al reducir el peso y costo. Un ejemplo de este componente con conversión para probar sus oportunidades de uso fue desarrollado para la camioneta Dodge Ram Pickup en el 2003. A estas alturas, la fundidora Daimler Chrysler Cast Metals Engineering & Prototyping se acercó para discutir la viabilidad de un plan de ADI. Recientemente ha habido un pequeño interés, en la aplicación de ADI a los componentes de suspensión de automotores y camiones ligeros. Dos aplicaciones recientes demostrando la disminución de volumen son: el brazo del mando superior de la suspensión trasera independiente de la Ford Mustang Cobra y la limousine de Cadillac. Para las aplicaciones de alto volumen, el énfasis ha estado en convertir los componentes de hierros dúctiles a aluminio para economías de peso a costo más alto. Pero con el desarrollo del ADI en la reducción del costo actual, el ADI tiene 3 veces la resistencia y 2.3 veces la rigidez del aluminio y puede ser una alternativa rentable y competitiva en peso.

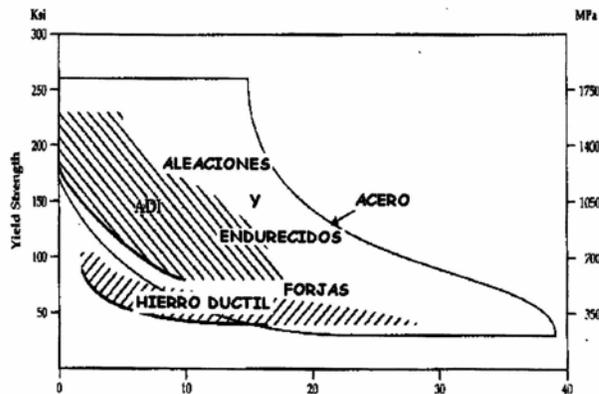
El criterio del diseño inicial del brazo de control inferior del mando incluyó 14.97 Kg., requisitos de carga vertical y freno, y un costo de menos de \$450 pesos reunidos. Los pasos básicos para seguir el programa de desarrollo en el metal de prueba incluye:

- el diseño para Manufactura y ensamblado;
- la optimización para el costo, peso y cambios;
- el análisis estructural y aprobación del componente;
- la simulación del proceso para la calidad óptima y productividad;
- la dirección del proyecto para asegurar la planeación y ejecución.

El concepto del diseño inicial y análisis, mostró que la parte de prueba donde se encontraría el criterio de análisis fue en el elemento finito para las condiciones de

carga. Además, el peso reunido para el plan inicial era 12.70 Kg. La prueba también se llevó a cabo en la simulación del proceso del diseño del prototipo para entender la entereza del componente para su óptima manufactura. Los resultados de la simulación no indicaron alguna deformación significativa o la presencia de la porosidad en la prueba. Las áreas de porosidad menor podrían existir como se esperarla de cualquier componente de la prueba de fundición.

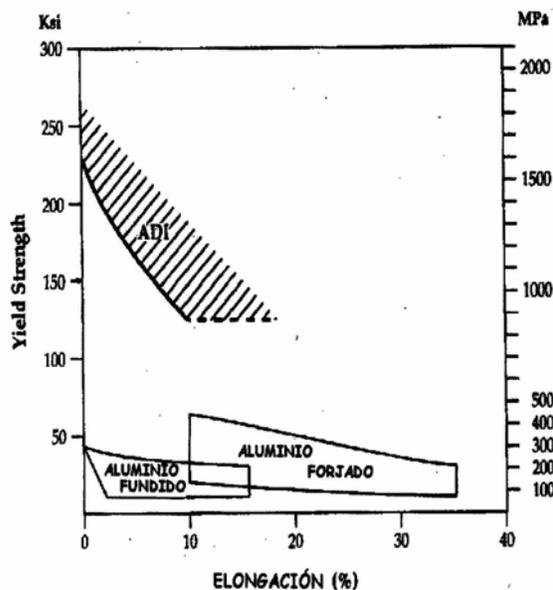
El ADI comparado con el acero y hierro dúctil.



- En costos 20% menor que el acero.
- En densidad 10% menor que el acero.
- Mejoras en la maquinabilidad.

Figura 1. Demostración de ventajas del ADI comparado con el acero y hierro dúctil.

El ADI comparado con Aluminio.



- Mínimo 30% rescatable en costos.
- Tres tiempos de dureza.
- 2.3 tiempo de rigidez
- Fatiga
- Mejor resistencia en uso.

Figura 2. Demostración de ventaja del ADI comparado con el Aluminio.

Como base para nuestro estudio se presenta la microestructura de austemple, del hierro dúctil ADI.

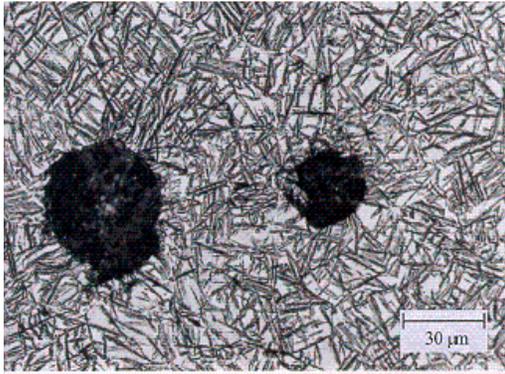


Figura 3. Austenita conservada (fondo ligero), ferrita bainítica (afectados de la oscuridad) y nódulos del grafito.

Otro tipo de microestructuras que sirven de apoyo se estudiarán basándose en la experiencia que la composición química del hierro fundido es Fe-3.52 C-2.51 Si-0.49 Mn-0.15 Mo-0.3 Cu % en peso, basándose en esto se trabajaron en agua fuerte una serie de muestras usando el 2% nital. Las metalografías de color son producidas por la primera aplicación en aguafuerte con el 2% nital, seguido por el tratamiento de calor abierto del aire de la muestra metalográfica en 270 °C para 3 h. éste oxida la muestra y produce los colores de interferencia que son dependiente de la fase.

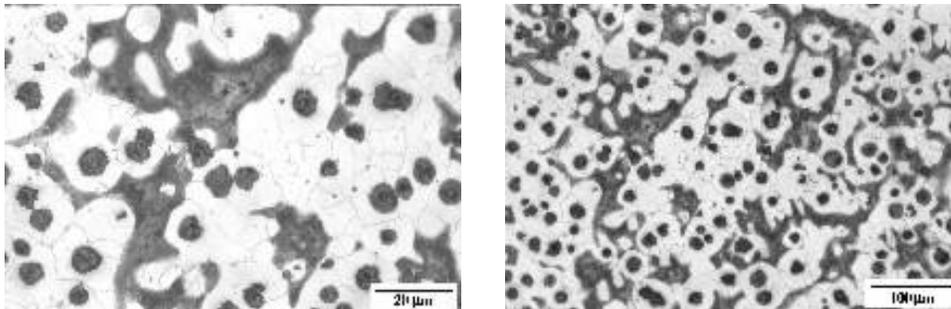


Figura 4. El hierro dúctil atacado. Nódulos de grafito, la perlita (islas oscuras) y de la ferrita (fondo ligero). Atacado con Nital el 2%

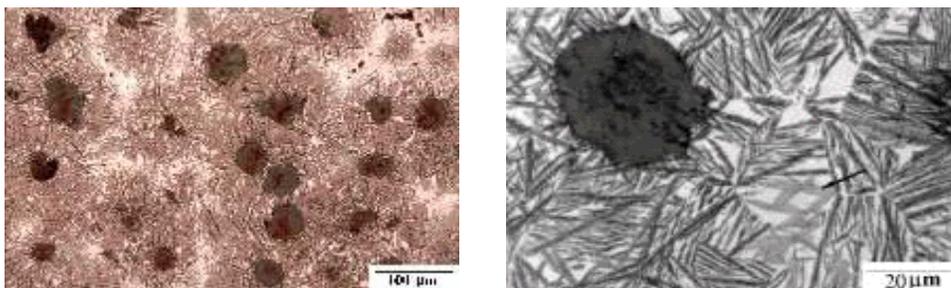


Figura 5. Austenitizado 950°C, austemperizado 350°C por 64 minutos.

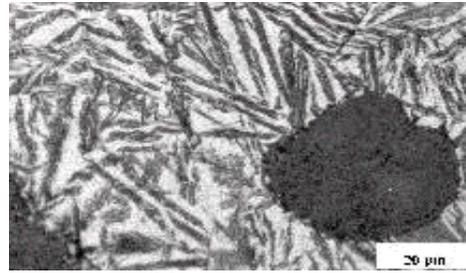
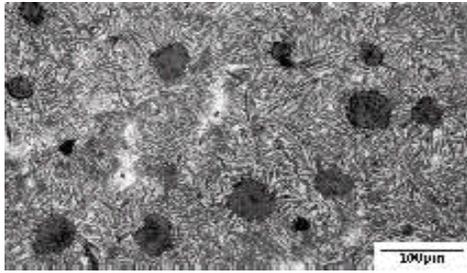


Figura 6. Austenitizado en 950°C, austemperizado en 40°C por 52 minutos.

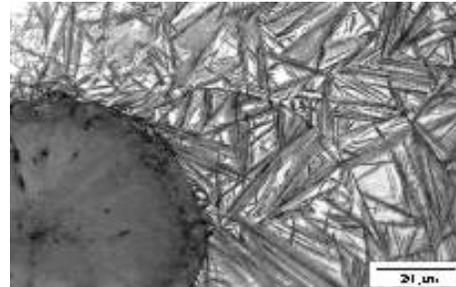
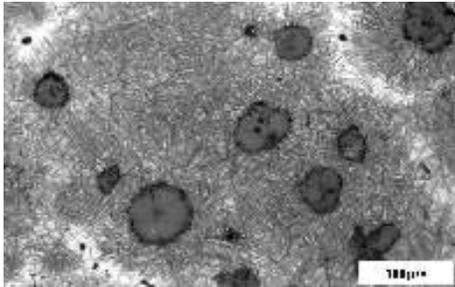


Figura 7. Austenitizado en 950°C, austemperizado en 300°C por 63 minutos.

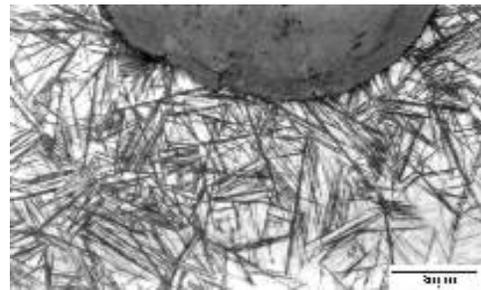
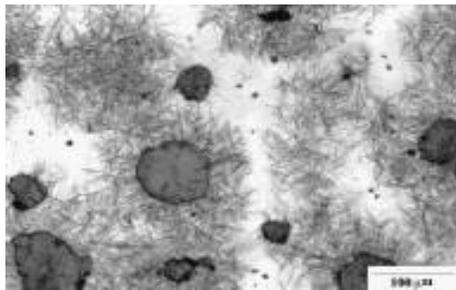
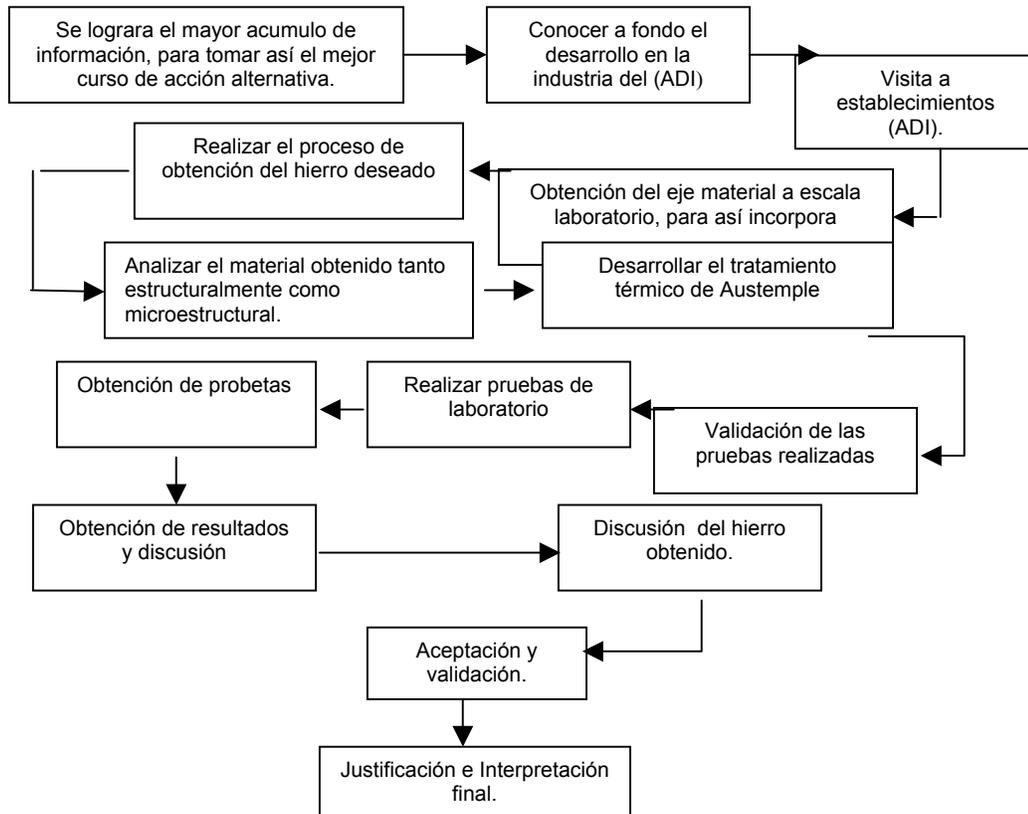


Figura 8. Austenitizado en 950°C, austemperizado en 250°C por 50 minutos.

METODOLOGÍA

A continuación se presenta el diagrama de flujo.



ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN

BASES:

- a) Según estudios realizados a nivel industrial
 - Temperatura de Transformación Austenítica (830° C - 930° C)
 - Para asegurar la transformación Bainítica, enfriar hasta (230° C – 385° C) antes de la transformación Martensítica.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE AUSTEMPLE

Austenizado:

- Tratamiento de disolución de Ferrita y Perlita a alta temperatura para formar Austenita.
- Retención de la Austenita de alta temperatura para permitir su transformación Isotérmica.
- Horno de sales neutras, temperatura de trabajo 850° C durante 30 min.

CONDICIONES DE TRATAMIENTO TERMICO			
MATERIAL	TEMP.DE AUST.	TEMP.DE TRANS.	TIEMPO. DE TRANS.
	(°C)	(°C)	(MINUTOS)
H.N. Obtenido	850	300	60

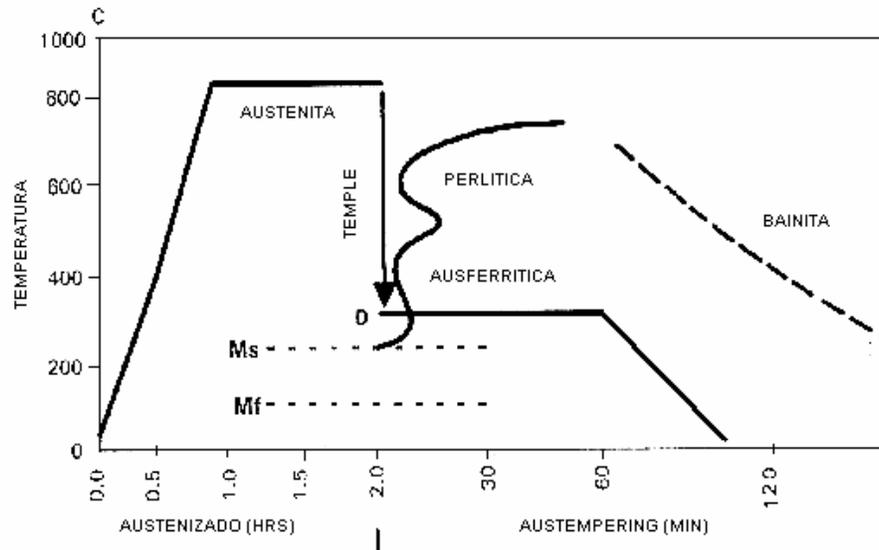


Figura 9. Diagrama utilizado para el tratamiento de austemple, modificado con las curvas del diagrama (TTT)

* Basado en literatura de apoyo (conferencia de General Electric y abalado por TTE EMISA).

A partir de este diagrama se puede establecer la velocidad mínima de enfriamiento para evitar la formación de fases intermedias, estableciendo que la transformación inicia después de entre 10 a 100 seg. Dependiendo de la composición química del hierro, esto es solo que se halla alcanzado la temperatura de transformación, antes se tiene que librar la nariz de la curva de inicio de la transformación, reduciendo el tiempo a unos cuantos segundos.

ENFRIAMIENTO EN SALES:

- Horno de sales (140) temperatura de trabajo 300° C
- Velocidad de enfriamiento (3-4 seg.)
- Transformación Bainitica (1 hr.)
- Enfriamiento al aire

MICROESTRUCTURA DEL (A.D.I.) OBTENIDA:

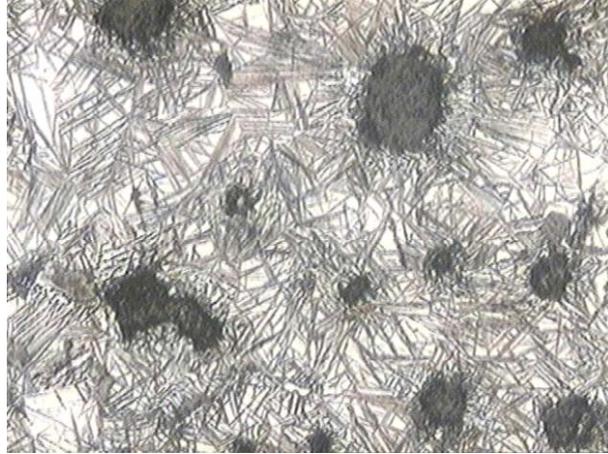


Figura 10. Según grados de clasificación ASTM, "GRADO 4"

Grados de clasificación según la ASTM en ADI.

Grade	Tensile Strength (MPa /	Yield Strength (MPa /	Elongation (%)	Impact Energy (Joules /	Typical Hardness (BHN)
1	850 / 125	550 / 80	10	100/75	169-321
2	1050 / 150	700 / 100	7	80/60	302-363
3	1200 / 175	850/125	4	60/45	341-444
4	1400 / 200	1100/155	1	35/25	388-477
5	1600 / 230	1300/185	N/A	N/A	444-555

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se muestra, una tabla comparativa entre los materiales de interés de cuyos valores obtenidos se partirá como desarrollo en esta investigación, asociado con la clasificación según establecida por la ASTM.

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECANICAS.				
MATERIAL	DUREZA	LIM. CED.	RES. TENS.	% AL.
	(HB)	(Mpa)	(Mpa)	
H. N.	240	500	700	7
A.D.I.	370	1100	1190	2
GRADO 4	388/477	1100/155	1400/200	1

Basados en los resultados obtenidos en la experimentación podemos decir que dicha experimentación se llevo acabo con éxito satisfactoriamente para el desarrollo de nuevos procesos de productos con transformación isotérmica. Podemos ver que la mayoría de las propiedades mecánicas del hierro nodular obtenido fueron modifcadas, incrementando considerablemente, como principal objetivo.

CONCLUSIONES

Se espera que la respuesta obtenida al final del desarrollo del presente trabajo es la posibilidad de justificar el cambio de acero utilizado en la construcción de los trucks de ferrocarril por el ADI obtenido, trayendo como beneficios:

- Disminución de secciones
- Disminución de peso muerto
- Ahorro de energéticos (combustible)
- Incremento satisfactorio en flete
- Disminución del impacto ambiental
- Desarrollo del país.

Se espera firmemente que los resultados obtenidos después del estudio sean de carácter prioritario, a fin de establecer que el uso de este material en componentes de uso industrial en los cuales se requiere de gran resistencia a volúmenes enormes y peso excesivo, puedan ser sustituidos por este, ya que nos proporciona mejoras en las propiedades mecánicas de gran índole.

En este caso se tomara a estudio los trucks de los ferrocarriles, los cuales presentan una geometría compleja, un volumen y un peso excesivo, el cual con este estudio se tendrá una reducción en peso del 30 % a partir de tener como estadística que un solo truck de ferrocarril cuenta con un peso de 8 toneladas y así pues con la aplicación del hierro nodular austemperizado el benefició será aproximadamente de 2.4 toneladas y sabiendo que un solo vagón cuenta con dos de estos, se obtendría un ahorro de aproximadamente 5 toneladas, las cuales se transformarán en flete, teniendo así una mayor ganancia y prioridad hacia esta modificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- Sturla A., E.Castellano, Proceso de Obtención de Hierro Nodular, Ed. Alsina
- 2.- Izquierdo García A., B. Hernández R, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Universidad Michoacán, Edición especial, año 1997
- 3.- Rossi F.S. and B.K. Gupta. "Austempering of Nodular Cast Iron Automobile Components" Metal Progress, April (1981), pp. 25-31.
- 4.- Abu-Elfotough H., O.A. Zbu-Zeid, B.A. Elsarnagawy and A.M. Eleiche. "Effect of Austempering on the Microestructure and Tensile Properties of Ductile Iron" Scripta Met. (1984), pp. 995.
- 5.- Zhou H.J., J. Zeng, H. Gu and D.Z. Guo. "Fatigue Thresholds of Isothermally Transformed Cast Steel and Nodular Cast Iron", Scripta Met. (1984), pp. 2123-2128.
- 6.- Gonzalez J.L., J.M. Hallen, D. Jaramillo y K. Yasue, "Desarrollo de Alta Tenacidad Mediante Tratamientos Isotermicos", Memoria Ier. Simposium ESQIE '93, Mexico, D.F. (1993).
- 7.- Gonzalez J.L., "Fractura por Fatiga", Apuntes IPN, 1992
- 8.- Velters, Herman, Traitement Bainitique (Austempering) des fontes G.S. (Conference Pronunciada 63 Congreso Mundial de Fundición en Budapest, Hungría. Homme et Fonderie (ATF) # 293 de 1999 pag. 38-41.
- 9.- Schissler, J. M., Étude de la transformation bainitique, a 420° C, d'état es Science Physique, Univ. Nancy I (1972) Doc. CNRS. A. O. 6521
- 10.- Loper, Carl R. Jr., Professor, Retired. Materials Science and Engineering., The University of Wisconsin-Madison, Madison, WI USA