

**Efecto del Tratamiento Térmico de Recocido Intercritico
sobre la Microestructura y su Resistencia a Corrosión y
Desgaste de un Acero Grado PJ55**

Effect of the Intercritical Annealing Heat Treatment on the
Microstructure and its Resistance to Corrosion and Wear of a PJ55
Grade Steel

Cynthia Abigail Guerra Linares^{*a}, Ma.de Jesús Soria Aguilar^b, Josefina Garcia Guerra^c,
Antonia Martinez Luevanos^d.

^{a, b, c} Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia Unidad Norte UA de C,
Carretera 57, Km. 5. Zona Universitaria. Monclova, Coah. C.P. 25710, Monclova,
Coahuila.

^d Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas Unidad Norte UA de
C, Blvd. V. Carranza s/n esq. con Ing. José Cárdenas Valdés. Col. Republica Ote. C.P.
25280. Saltillo, Coahuila.

Correo electrónico: cynthia_guerra@uadec.edu.mx

Resumen

Los tratamientos térmicos tienen como propósito mejorar la microestructura y por ende las propiedades mecánicas del acero. En este trabajo se busca en base de la literatura, la ruta óptima de procesamiento para transformar un acero convencional grado PJ55, comúnmente utilizado para tuberías en la industria petrolera, a un acero doble fase, que presente ductilidad y alta resistencia a la deformación. Además se pretende relacionar el estudio tribológico con la microestructura que se obtiene, a fin de evaluar la mayor resistencia al desgaste de este material.

Palabras clave: Acero PJ55, recocido, acero DP, resistencia, ductilidad, desgaste.

Abstract.

The purpose of heat treatments is to improve the microstructure and thus the mechanical properties of steel. In this work, based on the literature, the optimal processing route to transform a conventional steel grade PJ55, commonly used for pipes in the oil industry, to a dual phase steel, which presents ductility and high resistance to deformation. In addition, it is intended to relate the tribological study with the microstructure obtained, in order to evaluate the higher wear resistance of this material.

Key words: PJ55 steel, annealing, steel DP, resistance, ductility, wear.

1. Introducción

El grado de acero PJ55 se encuentra dentro de los grados de acero API 5CT, basados en los estándares de los códigos API (American Petroleum Institute), son utilizados en la construcción de tubos para, la industria petrolera y transporte de gas natural, por ello requieren propiedades como, soldabilidad, formabilidad, tenacidad a la fractura, resistencia a la corrosión bajo tensión y resistencia a la fatiga (Shaanxi World Iron & Steel Co., 2018).

Para lograr mejores propiedades de dicho material, se debe someter el acero a una serie de tratamientos térmicos, y así transformar su microestructura a un acero con características de alta resistencia (Advanced High Strength Steels), los cuales han sido ampliamente demandados, debido al interés en disminuir el peso de la estructura, sin reducir su resistencia mecánica, categoría en que se encuentran los aceros Doble Fase (Dual Phase Steel), los cuales se caracterizan por su microestructura, compuesta por ferrita y martensita, entre otras fases dispersas en mucha menor relación como bainita, perlita y austenita retenida que en conjunto proporciona mejor ductilidad y resistencia al material (Barajas Aguilar y col., 2016). De acuerdo con la Rodríguez, 2017 para obtener una microestructura de doble fase, el acero se produce por laminación en caliente, laminación en frío y/o tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas, las cuales están comprendidas entre las líneas Ac_1 y Ac_3 del diagrama Fe-Fe₃C. El tratamiento de recocido se basa en calentar el acero hasta la zona intercrítica y así formar ferrita+austenita, después por medio del temple, que implica un rápido enfriamiento, se transforma completamente la austenita a martensita (Rodríguez, 2017).

El acero bifásico es un material que debido a su capacidad de mantener alta resistencia y buena ductilidad en conjunto, este tipo de acero se utiliza en la industria automotriz, transporte ferroviario, infraestructura, construcción naval y aeroespacial.

2. Clasificación de los aceros.

El acero es una aleación de hierro-carbono con pequeñas cantidades de elementos como silicio, fósforo, azufre, oxígeno, etc., que le proporcionan características específicas, volviéndolo el material principal en construcción, lo que permite referirse al mismo como acero estructural. De acuerdo con el Manual de Construcción en Acero 5ta Edición, las propiedades principales con las que debe de contar el acero son resistencia, ductilidad, soldabilidad, y tenacidad (Beltrán, 2016).

Acero Grado PJ 55.

El grado de acero PJ 55 o API 5CT, presenta buena resistencia a la tracción y dureza. De acuerdo con la norma API este tipo de acero es específico para tubos de acero dentro de la industria de petróleo y gas natural, también como cubierta o tubería para pozos. Dentro de los grados de acero 5CT se encuentra el J-55 el cual es de relativamente baja resistencia (Shaanxi World Iron & Steel Co., 2018).

Acero de alta resistencia doble fase (DP).

Los aceros de alta resistencia (Advanced High Strength Steels, AHSS), son aquellos que sustituyen a los aceros convencionales en diferentes aplicaciones para obtener mejores propiedades mediante la modificación de la microestructura. Dentro de la producción de aceros de alta resistencia y baja aleación (Ultra Light Steel Auto Body, USLAB), se considera acero de alta resistencia aquel cuyo límite elástico se encuentre en el rango de 210 – 550 MPa. En la Figura 1 se muestra el diagrama de conformabilidad global de los aceros AHSS. Estos aceros se fabrican mediante procedimientos físicos y químicos de los cuales resultan aceros templados y aleados con fósforo o boro (López, 2017)

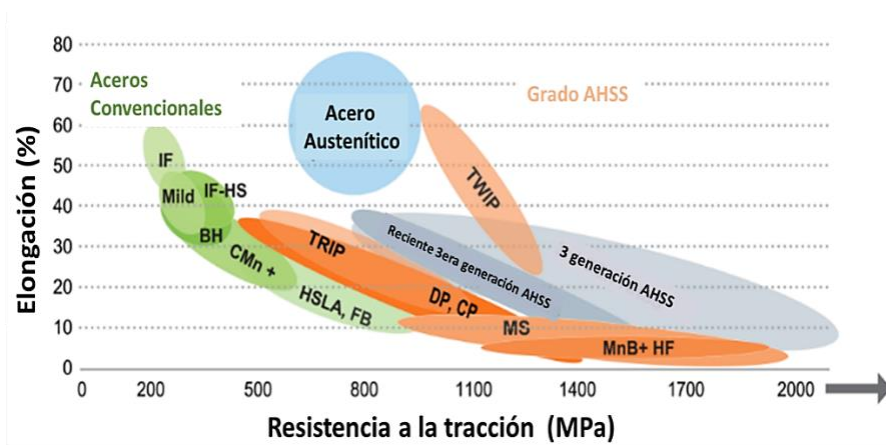


Figura 1. Diagrama de conformabilidad global de los aceros AHSS.

Fuente: (López, 2017)

Los aceros doble fase o “dual phase, DP” presentan dos fases en la microestructura, en la Figura 2 se muestra un esquema representativo, 20% de martensita dispersa en una matriz dúctil de ferrita, además de otras fases dispersas en menor relación como bainita, perlita y austenita retenida (Alibeyki y col., 2018).

Al añadir elementos como el manganeso, el cromo, el molibdeno, vanadio y níquel ayudan a la formación de la martensita, la cual puede ser regulada lo que cambia la relación entre resistencia y deformabilidad. Se caracterizan por presentar una resistencia tensil aproximada a los 550 MPa (80,000 psi.) (Bohórquez, 2012).

Cuando este tipo de acero se deforma, el esfuerzo se concentra en los límites de grano de la ferrita rodeado por las islas de martensita, concibiendo una alta velocidad de endurecimiento por deformación. La ferrita presente se encuentra

entre un 85-90% total de su microestructura, esto antes de sufrir deformación (Alibeyki y col., 2018).

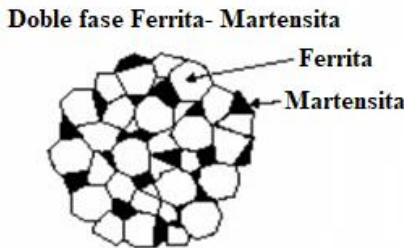


Figura 2. Microestructura esquemática del acero doble fase.

Fuente: (Alibeyki y col., 2018)

La microestructura es el resultado de una caracterización microestructural y mecánica de aceros de doble fase obtenidos por tratamiento térmico de austenizado, recocido intercrítico y temple, en la Figura 3 se muestra las microestructuras obtenidas por Castillo y col. 2018, de un acero estructural en estado inicial (Figura 3a) y tratado térmicamente, el tratamiento 1 consistió en austenizado inicial a 915 °C durante 30 minutos y enfriamiento en aire (normalizado), seguido por un calentamiento a una temperatura intercrítica de 780 °C por 30 minutos, finalizando con un temple en agua (Figura 3b), el tratamiento 2 consistió en un calentamiento a 915 °C por 30 minutos, con un enfriamiento posterior en agua, después el material fue calentado a 780 °C por 30 min. y enfriado en agua (Figura 3c), y el tratamiento 3 consistió en proceso termomecánico después que el material se normalizó desde una temperatura de austenización de 915 °C durante 20 minutos, luego se llevó a una temperatura intercrítica de 810 °C durante 20 minutos, posteriormente se aplicó una deformación del 10% en caliente, seguido de un temple en solución de NaOH al 5%.

En todas las microestructuras se observa la presencia de las dos fases, correspondientes a la martensita, regiones oscuras, y a la ferrita, regiones claras, no se visualizan diferencias notorias entre el tratamiento 1 y 2 (Figura 3b y Figura

3c), mientras que el tratamiento 3 (Figura 3d) presenta granos más asimétricos y alargados (Castillo y col., 2018).

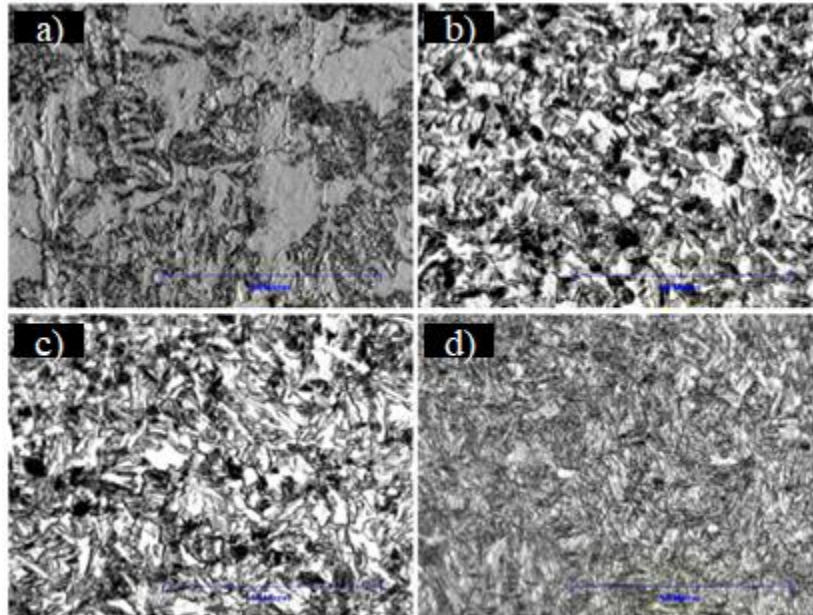


Figura 3. Micrografías de la microestructura de los aceros: a) estado inicial, b) tratamiento 1, c) tratamiento 2, d) tratamiento 3.

Fuente: (Castillo y col., 2018)

3. Obtención de los aceros doble fase.

Los aceros DP son fabricados controlando el enfriamiento de la austenita para después transformarla en martensita, sin embargo, dependiendo del proceso de fabricación, laminación en caliente, laminación en frío y/o tratamientos térmicos, pueden mejorar sus propiedades por la aparición de bainita (Rodríguez, 2017)

Gonzales (2019) estudiaron el desarrollo de un acero de medio Mn con adiciones de B y V, de dicho estudio se obtuvo la Figura 4, que muestra el diagrama hierro-carbono donde se observa que es posible experimentar con aceros templados desde temperaturas de 730°C para obtener aceros bifásicos con altos contenidos de ferrita, o templar a temperaturas de 850°C para obtener aceros bifásicos con

altos contenidos de martensita. Las cantidades de martensita y ferrita indican las propiedades mecánicas deseadas en un material (González, 2019)

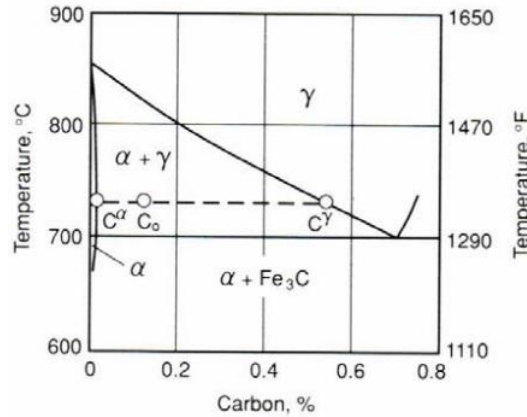


Figura 4. Diagrama fase para acero con 1.5% Mn.

Fuente:(González, 2019)

Soria y col. (2015) estudiaron el efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero API 5CT, sometido a los tratamientos de austenizado a 890, 920 y 950 °C durante 22, 24 y 26 min., y revenido a 460, 480 y 500 °C durante 22, 24 y 26 min.; presentando microestructuras mostradas en la Figura 5, donde 5a y 5c, corresponden a martensita en forma de agujas con regiones de austenita retenida en probetas tratadas por austenizado seguido de temple en agua, el temple facilita la transformación de la austenita a martensita lo que incrementa las propiedades mecánicas.

Las probetas sometidas a un austenizado y revenido Figura 5b y 5d, presentaron martensita revenida con pocas regiones de austenita, esto no presenta cambio significativo en la microestructura ni en el tamaño de grano, por lo que el revenido no afectó las propiedades mecánicas (Soria y col., 2015)

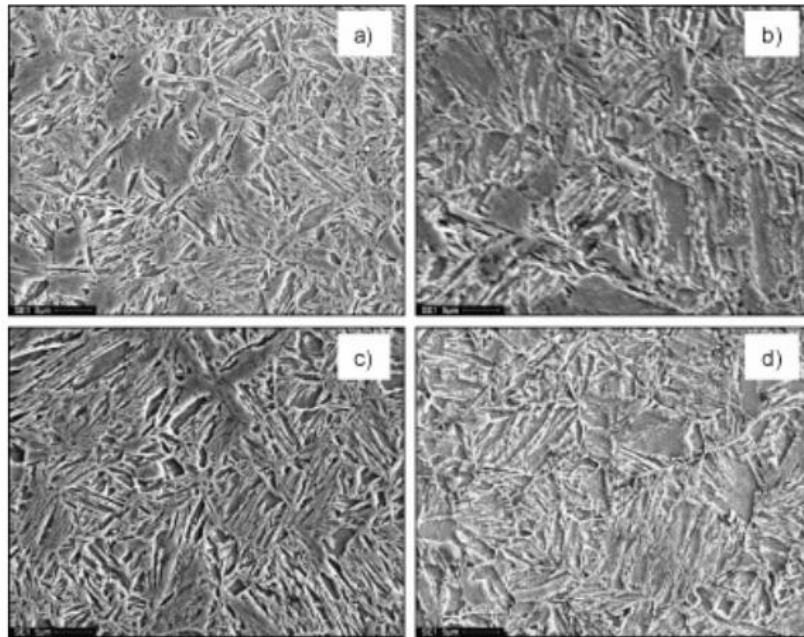


Figura 5. Fotomicrografías MEB de las muestras de tubo, a) austenizado, b) austenizado y revenido, c) austenizado y d) austenizado y revenido.

Fuente:(Soria y col. 2015)

3.1. Tratamiento térmico de recocido intercrítico.

El tratamiento de recocido es esencial en estos aceros, ya que de ahí se obtiene la fase más dura. Diversos estudios han demostrado que el recocido efectuado entre temperas intercríticas para aceros de bajo y medio carbono presentan estructuras bifásicas ferrítico-martensítica con mayor ductilidad que aquellos aceros de baja aleación normalmente endurecidos por precipitación (Petite y col., 1998).

Para promover una fase dual de ferrita y martensita, se realizó un nuevo tratamiento de recocido intercrítico de aceros resistentes al desgaste con boro de bajo impacto ambiental, se calentó el acero hasta llegar al campo $\alpha+\gamma$ del diagrama Fe-C, esto es en el rango de temperaturas intercríticas comprendidas entre las líneas A_{c1} y A_{c3} que dependen de la composición de cada acero, en este estudio se utilizaron temperaturas entre 750-770 °C, y posteriormente fueron templadas en agua,

provocando un ahorro energético, reducción de tiempo de producción y un impacto ambiental favorable. Obteniendo una estructura de ferrita + martensita (Will y Mugas, 2020)

Se aumenta la resistencia en los aceros DP cuando cualquier fracción volumétrica o resistencia (dureza) de la fase martensita es aumentada, ver Figura 6. Se evaluaron las propiedades mecánicas en recubrimientos galvanizados por doble inmersión en caliente sobre acero al carbono doble fase, presentando la dependencia de la resistencia de la fase de martensita, la cual es determinada por las condiciones de templado intercrítico y el contenido original de carbono en el acero. La resistencia de la fase de ferrita depende del tamaño de grano y las contribuciones del endurecimiento de la solución sólida de los elementos aleantes (Carrasquero y col., 2019)

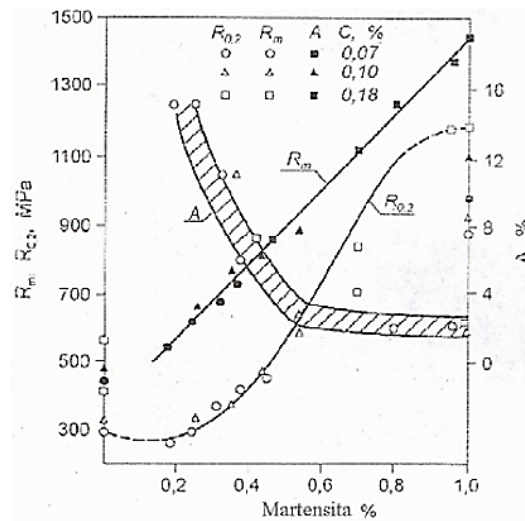


Figura 6. Relación de propiedades mecánicas de acero de doble fase en la relación del contenido de carbono y la fase de martensita.

Fuente:(Carrasquero y col., 2019)

La Figura 7 muestra el diagrama TTT del acero PJ 55, proporcionado por la empresa Altos Hornos de México S.A.B. de C.V que muestra las temperaturas intercríticas en el rango de 709.8 a 810.7 °C. Lo que indica que a la temperatura del tratamiento de

recocido intercrítico solo se presenta la fase de ferrita, por lo que para obtener austenita, el acero se calentara a una temperatura superior a los 800 °C.

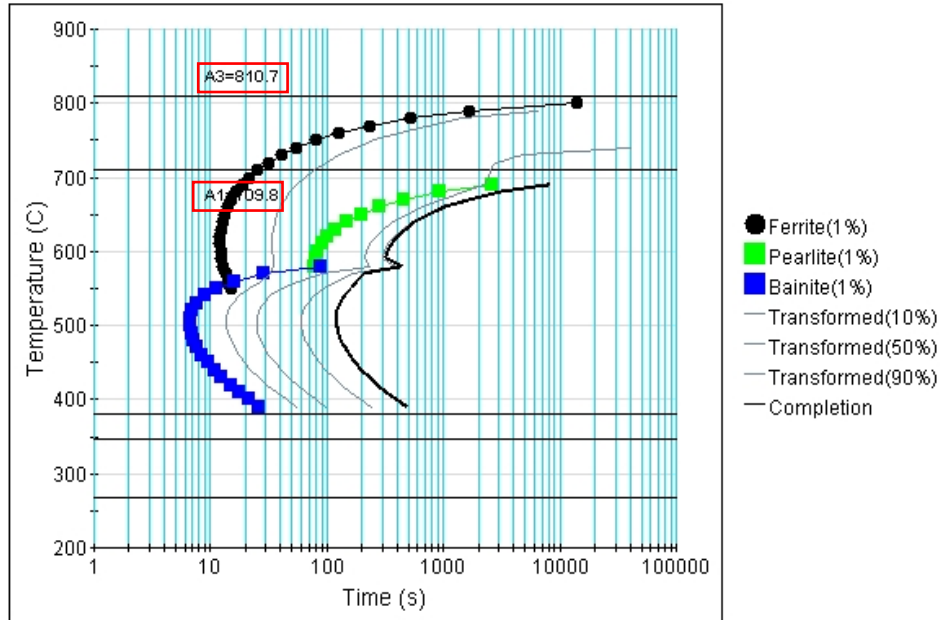


Figura 7. Diagrama TTT del acero grado PJ55.

Fuente: (Altos Hornos de México, S.A.B. de C.V.)

4. Estudio de la resistencia a la corrosión y/o abrasión en aceros tratados térmicamente.

Por medio de los tratamientos térmicos también se puede mejorar la resistencia a la corrosión.

El acero A36 es un acero estructural al carbono, que al igual que el acero PJ 55, es muy utilizado en la construcción de estructuras metálicas. Se estudió y caracterizo el acero A36 tratado térmicamente como sustituto para la fabricación de tanques mezcladores de hormigón, para determinar si el material cumple con las propiedades adecuadas de su aplicación, las probetas fueron sometidas a una serie de tratamientos de templado, recocido, normalizado, revenido y cementado. Posteriormente se realizó un estudio metalográfico y ensayos de dureza, tracción, flexión, y desgaste. En este último se siguió la norma ASTM G99, donde los autores

la definen como la norma que “indica el desgaste que sufre una probeta tipo pin, en la que se conoce la masa inicial, forma, y dimensiones, ésta es ensayada sobre un disco que gira a velocidad constante mientras es presionada con una carga uniforme, finalmente se debe tomar datos de la pérdida de masa o a su vez la disminución de la longitud del pin durante ciclos de tiempo determinado”. Se realizaron 3 ensayos de desgaste a diferentes velocidades en el disco y cargas en la probeta cilíndrica (pin), 10 N y 100rpm , 15 N y 150rpm, 20 N y 200rpm, resultando un comportamiento similar en las gráficas del material templado y cementado, ver Figura 8, lo que demuestra que la resistencia está relacionada directamente a la dureza del material (Vásquez, 2019)

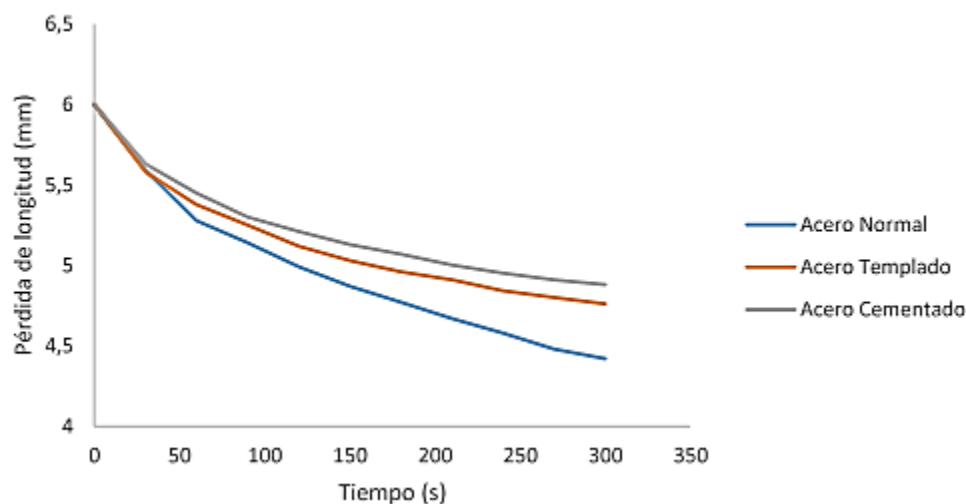


Figura 8. Curvas de desgaste a 15N Y 150 RPM para los aceros tratados y sin tratar.

Fuente:(Vásquez, 2019)

Para poder reducir la velocidad de corrosión en la aleación AZ31B, se analizó la influencia del tratamiento térmico de recocido a 345 °C durante una hora, lo que ocasionó la nucleación acelerada de nuevos granos en forma de maclas, y posteriormente se realizó un tratamiento de liberación de tensiones a 160 °C durante una hora. El material de aporte fue la misma aleación que el material base y la

aleación AZ92. Se identificó corrosión por picaduras y corrosión uniforme durante los ensayos gravimétricos. Las probetas de la aleación AZ92 presento una velocidad de corrosión similar, aunque algo superior a las de AZ31. Sin embargo, de acuerdo con la literatura, esto se puede atribuir por el contenido de aluminio. En cuanto a la influencia de los tratamientos térmicos, las probetas tratadas para liberar tensiones, presentaron menores velocidades de corrosión, esto se debe por la reducción de defectos en la red del material, disminuyendo la cantidad de maclas en la red cristalina, evitando que se produzca una dislocación anódica del material (Colao, 2017).

El recocido también reduce la velocidad de corrosión, por la completa recristalización de la estructura presentando granos equiaxiales pequeños libres de defectos. Lo que concluye que, según aumente la cantidad de defectos cristalográficos, la velocidad de corrosión será mayor.

Se analizó la resistencia al desgaste de las aleaciones FeMnAl (AF_1 y AF_2) tratadas térmicamente a temperaturas de 600 °C y 750 °C y sin tratar, y se compara por medio del ensayo pin-on-disk, con un acero inoxidable ASTM A240. Para realizar el ensayo tribológico se utilizó pin de alúmina de diámetro de 6mm a una carga de 10N y 120rpm a 25 °C y 300 °C. Como se muestra en la Figura 9, los desgastes llevados a cabo a temperatura ambiente de las aleaciones FeMnAl tratadas térmicamente presentan mejor comportamiento al desgaste que el acero ASTM A240. La aleación AF_2 obtiene un incremento de dureza después de ser tratada térmicamente y eso incrementa su resistencia al desgaste notablemente, se puede deber por la mayor cantidad de elementos aleantes que endurecen la aleación por solución sólida sustitucional. Solo la aleación AF_1 obtiene mejor resistencia al desgaste a 300 °C que a 25 °C. Debido a mayor presencia de manganeso, característica de este tipo de aleaciones (Ipaz y col., 2013)

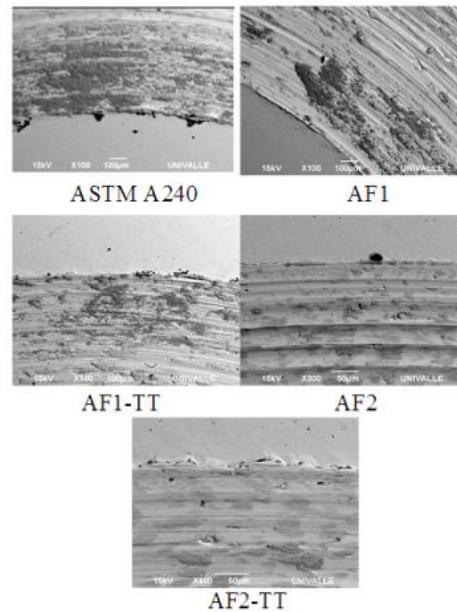


Figura 9. Morfología de huellas de desgaste ensayadas a temperatura ambiente.

Fuente:(Ipaz y col., 2013).

5. Conclusión.

El acero es primordial en construcción y por ello su proceso de obtención se ha innovado acorde al avance tecnológico de la sociedad, es uno de los materiales que se encuentra en constante estudio con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, para que sean adecuadas a futuras aplicaciones.

Al ser tratado térmicamente el acero dentro del rango de temperaturas intercríticas, las cuales se encuentran entre las líneas Ac_1 y Ac_3 del diagrama hierro- carbón, se obtiene la transformación de la microestructura del acero base a un acero de doble fase, ferrita- martensita, dependiendo el porcentaje de las fases de las variables de tiempo de permanencia, temperatura y medio de enfriamiento para la realización del tratamiento, lo que accede a grandes posibilidades de rutas de obtención.

Para entender los parámetros en la respuesta de los materiales bajo desgaste se realiza un estudio tribológico con la finalidad de mejorar la resistencia al desgaste y corrosión, mostrando que dependiendo de los elementos de aleación y el

tratamiento al cual sea sometido el material, serán los factores primordiales para mejorar esta propiedad en el material de estudio.

6. Agradecimiento.

Los autores agradecen al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Coahuila, por su apoyo en la realización de este artículo de divulgación que es parte del proyecto de tesis: “Efecto del tratamiento térmico de recocido intercrítico sobre la microestructura y su resistencia a corrosión y desgaste de un acero grado PJ55”. A la empresa AHMSAB de CV por la aportación de los materiales.

7. Referencias.

- Alibeyki, M., Mirzadeh, H., y Najafi, M. (2018). Fine-grained dual phase steel via intercritical annealing of cold-rolled martensite. *Vacuum*, 155, 147–152. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2018.06.003>
- Barajas Aguilar, N. C., García Lara, A. M., Camporredondo Saucedo, J. E., Equihua Guillén, F., y Castruita Ávila, L. (2016). Tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz. *CienciaCierta*, 12.
- Beltrán, S. (2016). *Manual de construcción en Acero. Diseño por esfuerzos permisibles* (p. 454).
- Bohórquez, C. A. (2012). *Influencia Del Tratamiento Térmico Desde Temperaturas Intercríticas En Las Propiedades Mecánicas Del Acero Sae 1045*. XXXI, 3577–3587. <http://www.amcaonline.org.ar>
- Carrasquero, E. J., Rico O., Y., y Minchala, J. (2019). Evaluación de propiedades mecánicas en recubrimientos galvanizados por doble inmersión en caliente sobre acero al carbono. *Ingenius*, 22, 80–89. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.08>

- Castillo, D. E., Angarita Moncaleano, I. I., y Rodríguez Baracaldo, R. (2018). Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(3), 430–439. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000300430>
- Colao, D. P. (2017). *Influencia de los tratamientos térmicos en resistencia a la corrosión en medios salinos de uniones soldadas de aleación de magnesio AZ31B*. 102. http://oa.upm.es/47846/1/TFG_DAVID_PALOMO_COLAO.pdf
- González, C. (2019). *Desarrollo de un acero de medio Mn con adiciones de B y V para aplicaciones automotrices*.
- Ipaz, L., Aperador, W., y Esguerra Arce, A. (2013). Influencia de un tratamiento térmico en el comportamiento tribológico de aceros Fe-Mn-Al. *Revista Mexicana de Física*, 59, 322–327.
- López, J. (2017). *Acero USLAB para mejorar la resistencia mecánica del chasis*. (p. 12).
- Petite, M. M., Monsalve, A., Gutiérrez, I., Zaitegui, J., y Larburu, J. I. (1998). Modelización de la evolución microestructural durante el recocido continuo de chapas de acero bajo en carbono. Predicción de las propiedades mecánicas. *Revista de Metalurgia*, 34(EXTRA), 333–337. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iextra.765>
- Rodríguez, M. (2017). *Obtención y caracterización microestructural de un acero doble fase*.
- Shaanxi World Iron & Steel Co., L. (2018). Una breve introducción de API 5L, API 5B, API 5CT y API 5D. En *World Iron & Steel* (pp. 1–10).
- Soria, Ma de Jesús, Carrillo, F. (2015). Efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero para tubería API 5CT J55 Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a API 5CT J55 Pipeline Steel. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 539–550. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.006>

Vásquez, M. F. (2019). *Estudio y caracterización del acero A36 tartado termicamente como sustituto para la fabricacion de tanques mezcladores de hormigon.* 157.

<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/786%0Ahttps://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/786/1/CD-1222.pdf>

Will, G., y Mugas, Q. (2020). *Tr atamiento Térmico de Recocido Intercrítico de Aceros Re sistentes al Desgaste con Boro de Bajo Impacto Medioambiental .*