

# Producción de acero de alta resistencia

## High-strength steel production

Juan Haroldo Linares Martínez<sup>1</sup>  
Anthony Francisco Flores Lemus<sup>2</sup>  
Cindy Stphanie Zarceño González<sup>2</sup>

Universidad Católica de El Salvador, El Salvador

**Fecha de recepción:** 10/10/2023

**Fecha de aceptación:** 07/04/2024

### Resumen

La necesidad actual y futura de materiales, en este caso acero, que no se dañen con el paso del tiempo, fenómenos naturales o el accionar humano está en aumento. Si bien la cantidad de procesos para fabricar acero no es precisamente basta, es por medio de cambios en su composición química y cambios experimentales en la temperatura, los cuales permiten la existencia de aleaciones más resistentes.

La fabricación de aceros de alta resistencia no se limita a un área, se extiende al ámbito automotriz, médico e incluso el estructural. Por los variados objetivos que posee el acero, es importante tener en cuenta los diferentes procesos que se utilizan para manipular los tres elementos (Bainítica, ferrita y perlita), con el fin de darle distintas propiedades al acero.

**Palabras clave:** Austenítico, Alta resistencia, Acero, Tratamiento Térmico, Ferrita, Bainita, Perlita, Aleación.

### Abstract

The current and future demand for materials—particularly steel—that can withstand the effects of time, natural phenomena, and human activity is increasing. Although the number of processes for steel production is not extensive, modifications in its chemical composition and experimental variations in temperature allow for the development of more resistant alloys.

The manufacturing of high-strength steels is not limited to a single field; it extends to the automotive, medical, and structural sectors. Given the diverse applications of steel, it is crucial to consider the various processes used to manipulate its three primary phases (bainitic, ferritic, and pearlitic) to achieve specific properties.

**Keywords:** Austenitic, High-Strength, Steel, Heat Treatment, Ferrite, Bainite, Pearlite, Alloy.

1. Ingeniero Civil, Docente hora clase, Facultad de Ingeniería y Arquitectura; email para comunicación: [juan.linares1@catolica.edu.sv](mailto:juan.linares1@catolica.edu.sv); ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7405-879X>
2. Estudiantes de Arquitectura.



# 1. Introducción

**E**n el presente artículo se estudian diferentes variaciones y combinaciones de elementos químicos y factores térmicos en la manufactura del acero, específicamente el de alta resistencia. Entre los tipos de acero se encuentran: los aceros bifásicos o llamados de doble fase, los galvanizados, martensítico o inoxidable y los aceros de bainita. Y aunque los métodos no están exactamente estandarizados, pues este depende del fabricante, se encuentran similitudes según su tipo.

Los elementos mencionados con anterioridad son aceros que son producidos ya sea por medio de métodos que destruyen casi en su totalidad con elementos que debilitan la estructura o bien, que son creados a partir de una base y se refuerzan con elementos que fortalecen al material, como lo hacen el Manganeseo y el Silicio.

Es importante mencionar que ya sea en el área de la construcción, elaboración de herramientas, piezas automotrices, siendo la última la que se encuentran en mayor demanda, etc. Cualquiera sea el propósito, lo que se debe entender es que el acero es un elemento que debe ser estudiado, entendido y mejorado, pues es con este que el ser humano puede construir y fabricar con seguridad una amplia gama de objetos y obras.

## 2. Desarrollo

Para realizar la investigación se estableció la producción de aceros de alta resistencia para abordar un tema amplio, con muchas ramas posibles de desglose para recabar toda la información posible de manera condensada y precisa.

Para la realización de una búsqueda preliminar de información se debe delimitar los contenidos a investigar. Por lo tanto, para la obtención de datos apropiada se fijaron objetivos basados en una lista de preguntas, entre las que más relevancia obtuvo, se encuentran:

- » ¿Qué métodos se utilizan para producir el acero de alta resistencia?
- » ¿Cuáles son los métodos de producción de aceros de alta resistencia?
- » ¿Cómo ha evolucionado la producción de acero?

Para evitar el uso de fuentes no confiables se delimitó la búsqueda a bases de datos con artículos, y en su mayoría tesis de grado universitario o superior. Sin embargo, también se utilizaron fichas técnicas e incluso patentes de ciertos productos para comprender la peculiaridad de los diferentes procesos con los cuales se fabrica el acero. Posteriormente reuniendo e interpretando toda la información posible para obtener una base de datos lo suficientemente basta.

Con una base de datos amplia, fue posible seleccionar las aleaciones que poseían más relevancia dentro de la investigación. Descubriendo en el proceso similitudes en diferentes fuentes en cuanto a los procesos de fabricación.

Para finalizar, con los temas escogidos y desglosados se inició una purga de información, descartando elementos innecesarios o repetitivos. Se priorizaron datos relevantes frente a cuestiones superficiales.

### a. Producción de aceros de alta resistencia

El crecimiento poblacional, el avance tecnológico y la constante necesidad humana, ha provocado un cambio en cuanto a seguridad y aplicaciones en el ámbito de la ingeniería. Es por esto que se necesita un avance y producción de variaciones

y alternativas para materiales que son esenciales en cualquier área, en este caso la producción de aceros de alta resistencia. Estos requieren procedimientos físicos (templados) o químicos (aleaciones).

#### **b. Producción de acero de doble fase-bifásicos**

Los aceros ferrítico-martensíticos, también conocidos como aceros bifásicos, son un nuevo tipo de acero que se caracteriza por su alta resistencia, y al mismo tiempo su baja aleación, así como por poseer una microestructura combinada, de dispersión de las partículas duras de la martensita en una blanda y dúctil matriz ferrítica. Sus características son una alta ductilidad, fuerte resistencia a la tracción, cedencia continua y al experimentar una deformación esta se efectúa con una gran velocidad. Para su formación se utilizan aceros con bajo carbono que se somete a recocidos, homogeneiza o calienta mediante un enfriamiento controlado. Esto facilita la formación de ferrita y regiones austeníticas donde la fase austenítica metaestable puede transformarse en martensita después del enfriamiento posterior. El tratamiento térmico de recocido asociado es el principal método de tratamiento térmico para obtener acero bifásico, que consiste en calentar a una temperatura entre  $Ac_1$  y  $Ac_3$  para lograr una austenización parcial. Para el tratamiento térmico Inter crítico las micro aleaciones con bajo contenido de carbono se alean con elementos como manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y el níquel generalmente se somete a una temperatura crítica. (Villarreal-Rodríguez Luz María, 2022)

#### **c. Producción industrial de aceros bifásicos**

##### **• Laminación fría**

Se aplica un recocido inter crítico, el cual implica cambios de fase, como el calentamiento en el campo de fase de ferrita y ausentita, llegando a la transformación de la ausentita a martensita durante el enfriamiento posterior (Madias, 2013). La cantidad de ausentita a la temperatura de recocido aumenta y el contenido de carbono. Este proceso logra presentar mejores superficies y más acabadas con tolerancias más reducidas.

##### **• Laminación caliente**

El acero de doble pase se puede producir por un tratamiento térmico de calor adecuado, esto se puede lograr gracias a la aplicación de un temple Inter crítico desde el área de coexistencia bifásica; A grosso modo se conoce que el temple de un acero consiste en el calentamiento de una temperatura de 300 a 500 °C, por encima del punto crítico superior de este, para posteriormente realizar un proceso de enfriamiento rápido logrando el resultado que se busca (Madias, 2013).

En la elaboración del acero de doble fase existen dos técnicas las cuales son: Temple continuo y Temple al horno. El Temple continuo consiste en calentar el acero, trabajando por medio de tiempo cortos (aproximadamente dos minutos), lo que da como resultado una elaboración dentro del rango de la temperatura inter crítica, dando lugar a la formación de la mezcla de ferrita-austenita. En el temple al horno el tiempo de la permanencia de la región de coexistencia bifásica es de un valor mayor (3 horas aproximadamente) y la velocidad de enfriamiento es mucho más lenta, siendo esta última de 20 °C por hora aproximadamente.

- **Influencia de los elementos de aislación**

De manera general los elementos de aislación se utilizan en el acero con el fin de mejorar sus propiedades, y a la vez la influencia que estos ejercen puede ser de carácter muy variado, por lo que resulta de suma importancia conocer de qué manera afectan a estos durante el temple y el recocido inter crítico.

- **Elementos de aleación que se encuentran disueltos en la ferrita**

Estos elementos tienen diferentes propiedades porque cuando se exponen a la ferrita, algunos de estos elementos tienden a disolverse mientras que otros se convierten en carburos. Aunque el comportamiento y tendencia de solubilidad de cada elemento es único, cuando esos elementos tienen muy poco carbono, todos tienden a disolverse completamente en ferrita. Sin embargo, a pesar de que muchos elementos son solubles en la ferrita, los principales son el níquel, el silicio, el aluminio, el cobre, el cobalto y el fósforo, que se caracteriza por ser soluble en ella y no combinarse entre sí, por lo que no se mezcla con carbono y, por lo tanto, no da lugar a la formación de carburos.

- **Elementos de aleación que se encuentran formando carburos**

Los carburos metálicos están hechos de metales de transición como el tungsteno o el titanio. No suelen tener una estequiometría específica, esto se debe a que el carbono ocupa los sitios tetraédricos libres en la estructura metálica. Las sustancias resultantes tienen una alta resistencia mecánica y térmica, un punto de fusión de unos 3000 a 4000 °C, y se utilizan para la fabricación de herramientas cerámicas, piezas de máquinas y herramientas de trabajo rápido, y para el procesamiento de piezas de gran tamaño.

Estos son algunos de los elementos que son capaces de formar carburos cuando hay suficiente carbono presente, sin embargo, cuando el acero tiene un contenido de carbono muy bajo, tiende a disolverse bien en ferrita. Los carburos formados por estos elementos no son sencillos porque en muchos casos suelen estar asociados a carburos de hierro, y en ocasiones los carburos pueden formarse de forma más compleja porque este último está formado por múltiples más de un elemento.

#### **d. Producción de acero martensítico**

El acero martensítico o acero inoxidable es una aleación de hierro, cromo y carbono en proporciones aproximadas del 0.10% en carbono y entre el 12 -14% de cromo. Uno de los métodos para producir o fabricar un acero martensítico o inoxidable se inicia preparando una composición química tomando en cuenta que las impurezas de P (Fósforo) y S (Azufre) no superen el máximo expuesto con anterioridad, especialmente el azufre el cual es un elemento químico que genera fragilidad, menor tenacidad, genera zonas débiles y en cantidades superiores puede provocar grietas y fisuras. El propósito de la existencia de azufre en el acero es crear tensión, de esta manera obtener una mecanización simplificada, pues es con este agregado que la viruta que él mismo produce se rompe con mayor facilidad. Es importante agregar que el azufre agregado al acero se origina del afino arrabio que se obtiene de un alto horno, y que por consecuencia es en forma de sulfuro de hierro y de sulfuro de manganeso (Matsumi, 2002).

#### **e. Producción de acero bainita**

Para la producción de acero Bainita se utiliza un tratamiento termo mecánico.

Esta combinación de tratamientos y deformaciones plásticas permiten que los elementos se transformen a una fase dentro de un proceso de deformación en caliente, entre algunos de estos existen la extrusión, el rolado, el forjado, etc. (Cornide, 2012).

El acero bainítico posee una amplia gama de variedades en el mercado, por lo tanto, se observan aceros bainíticos ultra-altos

en carbono que son altamente soldables, y de gran resistencia comparables incluso con los aceros martensíticos los cuales son templados y revenidos. En la actualidad se puede decir que un acero bainítico es incluso mejor que un martensítico, pues estos requieren de mucho menos tiempo y por ende menos procesamiento en su fabricación.

**Tabla 1**

*Tipos de acero bainita*

| Tipo de acero                                                               | Especificaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Bainita Inferior</b>                                                     | La bainita inferior es formada por transformación isotérmica, es decir a una temperatura constante, entre 250 y 350°C debido a que la difusión de carbono es baja durante este tiempo de temperatura, el cementita precipita en el interior placa de ferrita                                                                                        |
| <b>Bainita Superior</b>                                                     | La bainita superior está formada entre 350 y 550°C, en ella el cementita está en forma de barras y no en placas. La temperatura reduce la concentración de carbono. (Guerrero, 2009)                                                                                                                                                                |
| <b>Aceros avanzados con efecto TRIP "Transformation induced plasticity"</b> | Es a través de un control de temperatura que es posible la prevención en la acumulación de carburos en la bainita y la adición de aluminio, carbono y silicio al acero, resulta en austenita retenida en la microestructura de los aceros TRIP. El acero TRIP se produce bajo condiciones de laminación en frío, caliente o galvanizados:           |
| <b>Laminación en frío Aceros TRIP</b>                                       | Se evita la formación de perlita laminando en frío realizando un recocido intercrítico y la transformación de la bainita isotérmicamente. Es crucial no aumentar la temperatura del horno a más de 500°C (Madías, 2014)                                                                                                                             |
| <b>Laminación en Caliente Aceros TRIP</b>                                   | Al inicio se transforma por medio de una temperatura intermedia la austenita a ferrita, luego a una temperatura menor de 500°C se transforma isotérmicamente la bainita en el bobinado. A partir de este proceso se consigue una microestructura equipada, libre de carburos y el 10% de austenita se retiene. (Madías, 2014)                       |
| <b>Galvanización de aceros TRIP</b>                                         | Se lamina en frío para compatibilizar la temperatura del baño con la del tratamiento. De otra manera, elementos con una fuerte afinidad con el oxígeno el Silicio y el Manganeso segregaran a la superficie y oxidaran en forma de capas delgadas.                                                                                                  |
| <b>Aceros avanzados con efecto TWIP "Twinning-Induced Plasticity"</b>       | Su alto contenido de magnesio determina que el acero sea completamente austenítico a temperatura ambiente. Esto hace que el principal modo de deformación sea el maclado dentro de los granos. El maclado causa un alto valor de velocidad de endurecimiento instantáneo con una microestructura muy fina. (Bordone, Perez Ipiña, & Monsalve, 2020) |
| <b>Aceros Bainíticos Libres de carburos</b>                                 | Se expulsa carbono provocado por la formación de ferrita bainítica que enriquece la austenita, como resultado se obtienen placas finas de ferrita bainítica separadas por austenita enriquecida en partículas de carbono.                                                                                                                           |
| <b>Acero Bainítico Aleado con Boro</b>                                      | Para esta aleación se agrega boro y este actúa como refinador, lo cual permite la formación de bainita. Este proceso se lleva a cabo por medio de fundición en vacío así se disminuye la porosidad, aumenta el oxígeno y aumenta la resistencia del producto final (Rodríguez-Baracald, 2012).                                                      |

#### f. Aceros aleados mecánicamente con nb

En este caso, se añaden pequeñas cantidades de V, Nb y Ti (Vanadio, Niobio, Titanio), para luego tratarlos termodinámicamente significa que existe la capacidad de controlar el tamaño del grano austenítico y ferrítico, disminuyendo en gran medida el nivel de carbono. (Fuentes Pacheco, 2012)

En el caso estudiado de las aleaciones realizadas con Niobio, se observa que es con este elemento con el que se obtienen mejores resultados con respecto al tamaño del grano que se puede obtener en aceros sinterizados. En el caso de utilizar titanio, se debe conocer que a pesar de que el elemento es más estable en comparación, posee una tendencia a la oxidación. Y en el caso de utilizar vanadio, este elemento fomenta propiedades menos estables.

- **Sinterización Convencional**

Se realiza un recocido de los polvos después de la molienda, debido a su endurecimiento después del proceso, y se compactan en frío en una prensa uniaxial, se calienta durante aproximadamente media hora para luego oscilar entre el recalentado y el enfriamiento. (Fuentes Pacheco, 2012)

- **Prensado en Caliente**

Placas de grafito dentro de un molde de grafito se utilizan para ejercer presión y obtener productos con una densidad mayor en menos tiempo. Todo el proceso finaliza en dos fases, la primera se lleva a cabo al presionar y calentar el molde a una temperatura de 900° C para luego enfriarlo a temperatura ambiente aun dentro del molde.

- **Sintonización por chispa de plasma o SPS**

Se realiza después de la molienda, aplicando presión y aumentando la temperatura a través del efecto Joule por medio del material hasta la matriz a realizar el sinterizado. El uso de sinterizado propicia que el grano obtenido para realizar este acero sea más fino, con propiedades mecánicas que pueden mejorar dependiendo del tiempo dedicado a moler los elementos utilizados para obtener mejores resultados.

## 3. Conclusiones

A partir del análisis precedente, es importante saber sobre estos tipos de acero porque cada uno muestra propiedades y usos diferentes que se pueden aplicar en diferentes necesidades, ya sea en una construcción o una industria automotriz.

Para obtener el acero bainita existen formas muy variadas y que no están sujetas a un solo proceso industrial, y se realiza el más conveniente con los elementos disponibles. Además, es muy importante tomar en cuenta los elementos de aleación en el acero que se trabaja como una forma de cambiar su estado y mejorarlo sin dejar de lado los procesos de templados y recocidos mencionados en dicha investigación.

El acero inoxidable estudiado, es el resultado de la mezcla de hierro, cromo y carbono en proporciones matemáticamente exactas, a diferencia del antes mencionado que solo es recubierto por cinc, de esta manera se puede resaltar la diversidad de procesos y sub procesos que existen para el acero, así como sus variantes de acuerdo al resultado que se busca obtener y los elementos necesarios para la mezcla de los mismo.

Como se observa, existen dos tipos de laminados, los cuales son en frío y en caliente, ambos son diferentes y se usan para resultados distintos. El laminado en frío aumenta la resistencia y dureza del acero

y disminuye su ductilidad, mientras que el laminado en caliente se contrae, haciendo que su tamaño y forma final sean menos predecibles que los del laminado en frío.

## 4. Referencias

- ACNIS international. (2017, 14 de agosto). *AISI 420B 1.4028*. ACNIS international. <https://acnis-titanium.com/es/produit/aisi-420b-1-4028-2/>
- Barahona-Castillo, L. N. (2013). *Mejora del proceso de galvanizado en una empresa manufacturera de alambres de acero aplicando la metodología Lean Six Sigma*. [Tesis de Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4925>
- Biltra (2022, 19 de octubre). *Influencia del azufre sobre las propiedades del acero*. Tratamientos termicos Biltra. <https://www.biltra.com/4-temple-influencia-del-azufre/>
- Bordone, M.; Perez-Ipiña, J. E. & Monsalve, A. (2020). Caracterización de material y determinación de propiedades de fractura de un acero TWIP. *Respositorio Institucional CONICET*, 35(23), 25-39. <http://ri.conicet.gov.ar/>: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/162312>
- Camila, R. B. (2017). *Obtención y caracterización microestructural de un acero doble fase*. [Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Libre]. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10582/TRABAJO%20DE%20GRADO%20MARIA%20CAMILA%20RODRIGUEZ%20BARRERO%20OBTENCI%C3%93N%20Y%20CARACTERIZACI%C3%93N%20MICROESTRUCTURAL%20DE%20UN%20ACERO%20DOBLE%20FASE%20CORRE~1.pdf?sequence=1>
- Cornide, J. (2012). *Aceros bainíticos avanzados: mecanismos de transformación y propiedades mecánicas* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid] <https://digital.csic.es/handle/10261/75132>
- Docol. (2018). *Fase dual con alta capacidad de conformado/ductilidad para una embutición profunda en frío sin grietas*. <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/dual-phase-steel/high-formability>
- Fuentes-Pacheco, M. L. (2012). *Desarrollo de nuevos aceros sinterizados de alta resistencia aleados mecánicamente con Nb*. [Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/16184>

- Guerrero, I. S. (2009). *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo [PROCESAMIENTO Y FABRICACIÓN DE ACEROS BAINÍTICOS DE PROCESAMIENTO Y FABRICACIÓN DE ACEROS BAINÍTICOS DE ALTA RESISTENCIA]*. [Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB\\_UMICH/5113/1/IIMM-M-2009-0068.pdf](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/5113/1/IIMM-M-2009-0068.pdf)
- Madias, J. (2013). Avances en la producción y aplicación de acero bifásico. *Actualización Tecnológica*. [https://www.researchgate.net/publication/262729018\\_Avances\\_en\\_la\\_produccion\\_y\\_aplicacion\\_de\\_aceros\\_bifasicos](https://www.researchgate.net/publication/262729018_Avances_en_la_produccion_y_aplicacion_de_aceros_bifasicos)
- Madías, J. (2014). Aceros avanzados de alta resistencia. *Dossier Tecnológico*. [https://www.researchgate.net/publication/261525083\\_Aceros\\_planos\\_avanzados\\_de\\_alta\\_resistencia](https://www.researchgate.net/publication/261525083_Aceros_planos_avanzados_de_alta_resistencia)
- Matsumi, T. (2002, 12 de abril). *Metodo para fabricar un acero inoxidable martensítico*. <https://patents.google.com/patent/MXPA04010008A/es>
- Rodríguez-Baracald, M. A. (2012). Obtención y caracterización mecánica de un acero bainítico aleado con boro (10 y 20 ppm). *Respuestas UFPS*, 17(1), 59-65. <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/413/438>
- Trenado, G. P. (2016). *Producción de aceros doble fase*. [Tesis de Ingeniería Metalúrgica, Instituto Politécnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/16302?show=full>
- Zarza-Díaz, R. E. (Octubre de 2020). *Diagnóstico al proceso continuo de galvanizado por inmersión en caliente en una*. Recuperado el 30 de Abril de 2023, de Somin: [http://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A2\\_2.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A2_2.pdf)