

## OBTENCIÓN DE UN ACERO CON COMPORTAMIENTO TRIP A PARTIR DE UN ACERO FERRITO PERLÍTICO (0.3% C, 1.5% Si, 1.5%Mn)

A. Monsalve<sup>1</sup>, D. Cabello<sup>1</sup>, A. Guzmán<sup>1</sup>, A. Artigas<sup>1</sup>, R. Colás<sup>2</sup>, J. Pavez<sup>3</sup>, F. Castro<sup>1</sup>,  
B. Schulz<sup>1</sup>

(1) Dpto. Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, USACH

(2) Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

(3) Dpto. de Química de los Materiales, Fac. de Química y Biología, USACH

E-mail (autor de contacto): [alberto.monsalve@usach.cl](mailto:alberto.monsalve@usach.cl)

### RESUMEN

*Se estudió el tratamiento térmico más apropiado para inducir el comportamiento TRIP (Transformation Induced Plasticity), en un acero con 0,3%C, 1,5% de Mn y 1,5% de Si. Para esto, se fundió y forjó una palanquilla hasta un espesor final de 18 mm, tras lo cual se procedió a laminar en caliente hasta un espesor final de 4,9 mm. Al término de la laminación en caliente a una temperatura de 900°C aproximadamente, el material fue enfriado hasta la temperatura de bobinado, para lo cual se utilizó un horno de sales, a una temperatura aproximada de 650°C por un tiempo de 15 min para lograr la homogeneización térmica de la muestra. Enseguida, el material fue introducido a un horno convencional a la misma temperatura del horno de sales, procediéndose a enfriar la muestra dentro del horno hasta temperatura ambiente, con lo cual se simuló la etapa de enfriamiento de la bobina. Finalmente, se realizó una reducción en frío de 70%, reduciendo el espesor hasta 1,5 mm. Con el fin de determinar el tratamiento térmico apropiado para inducir el comportamiento TRIP, se realizaron tratamientos de recocido intercrítico a diversas temperaturas (750, 775, 800 y 950°C durante 45 min) y tratamientos de recocido isotérmico a 760°C y distintos tiempos, observándose que a medida que aumenta la temperatura de recocido intercrítico, disminuye la cantidad de ferrita. Se realizó la caracterización de las muestras a través de microscopía óptica y electrónica, microscopía de fuerza atómica y medidas de microdureza, encontrándose que es posible diferenciar las fases presentes a través de una combinación de estas técnicas. Además, se han encontrado curvas de tipo sigmoideal para la fracción de las fases transformadas.*

**Tópico 1:** Materiales Metálicos

**Palabras clave:** acero, dual-phase, ferrita, martensita, perlita.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las características de los aceros TRIP es que están constituidos por una mezcla de ferrita, bainita y austenita retenida. Estos aceros presentan alta resistencia y una plasticidad excepcional, debido a una transformación de austenita a martensita (efecto TRIP o Transformation Induced Plasticity). En la figura 1, se muestran las propiedades mecánicas de varios de los aceros desarrollados en los últimos años [1,2]. Como se observa, los aceros TRIP son los que presentan mayores valores de resistencia mecánica y de elongación a rotura. Otros aceros de desarrollo reciente como los IF (Interstitial Free), HSLA (High Strength Low Alloy) y BH (Bake Hardening) no presentan los altos valores de resistencia mecánica que presentan los aceros TRIP, en tanto que

los aceros DP (Dual-phase), o los aceros bainíticos y los martensíticos, si bien presentan altos valores de resistencia mecánica, no son capaces de presentar altos valores de elongación a rotura. Las excelentes características que poseen los aceros TRIP (alta resistencia mecánica y alta ductilidad), los hace idóneos para múltiples aplicaciones, particularmente aquellas relacionadas con piezas que deben absorber altas cantidades de energía [3,4]. No obstante, como es bien sabido, un alto valor de reducción de área o de elongación a rotura no es suficiente para asegurar una buena embutibilidad [5-7]. Por tanto un tema de investigación abierto en este tipo de aceros lo constituye el de la respuesta a embutición, caracterizado por los índices de anisotropía normal y planar y por las componentes de texturas[8,9].

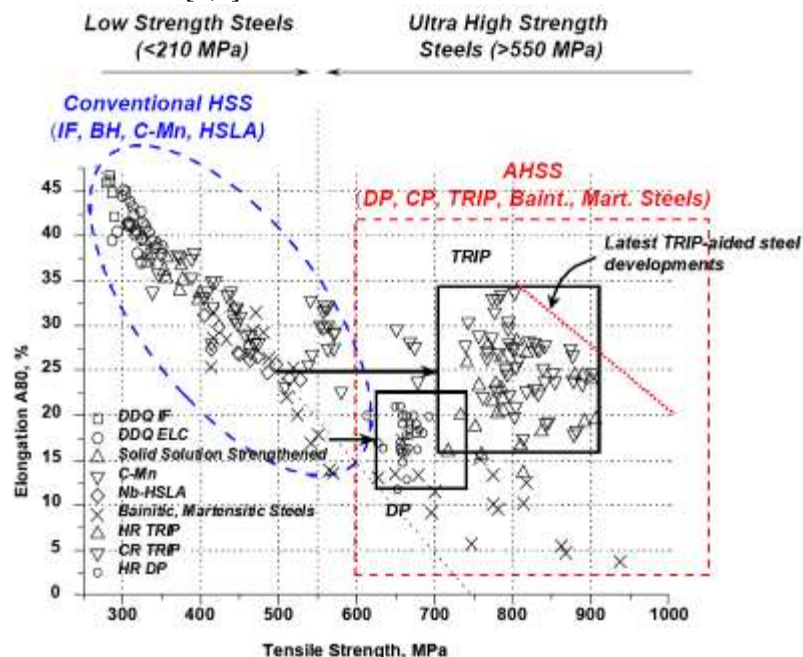


Figura 1.- Propiedades mecánicas de los aceros TRIP comparadas con las de otros aceros.

En el presente trabajo se investiga la forma de producir un acero con comportamiento TRIP a partir de un acero perlítico de composición 0,3%C, 1,5%Si y 1,5%Mn, mediante un tratamiento de recocido intercrítico.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La composición química del acero estudiado es la que se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química del acero estudiado.

	%C	%Si	%Mn	%Cr	%S	%P
Muestra	0,313	1,43	1,42	0,044	0,015	0,023

El material de partida consistió en palanquilla de 100x100x300 mm, que fue forjada a una temperatura de aproximadamente 1.100°C hasta generar un producto de 18 mm de espesor, 140 mm de ancho y 1.500 mm de largo. La primera etapa del proceso consistió en una homogenización a 1.200°C por 20 min, luego de lo cual, las muestras fueron laminadas en caliente. El control de temperatura se llevó a cabo mediante una termocupla tipo K que fue unida a cada probeta, monitoreándose digitalmente la temperatura. Se controló que la temperatura de laminado en caliente no bajara de 850°C, introduciéndose la probeta dentro del horno cada vez que la temperatura caía

por debajo de este valor. Después de laminado en caliente, ver figura 2, el material fue templado en un baño de sales fundidas que se encontraba a la temperatura de bobinado, esto es, alrededor de 650°C. Finalmente, el material se introdujo en un horno a la misma temperatura del horno de sales, procediendo a enfriarse dentro del horno de manera similar a como se enfría en la práctica en la bobina. Enseguida el material así enfriado, fue sometido a una laminación en frío de 70%, quedando con un espesor final de 1,5 mm. Seguidamente, las probetas fueron sometidas a un tratamiento de recocido intercrítico a las temperaturas de 750, 775, 800 y 950°C, durante 45 min. El objetivo de este tratamiento fue el de estudiar la cinética de transformación de perlita a austenita. Para completar el estudio cinético, se realizaron tratamientos isotérmicos a 760°C y tiempos de 10, 20 y 30 segundos. Finalmente, con el fin de precipitar bainita, se realizaron tratamientos térmicos a las temperaturas de 250, 300, 350 y 400°C.

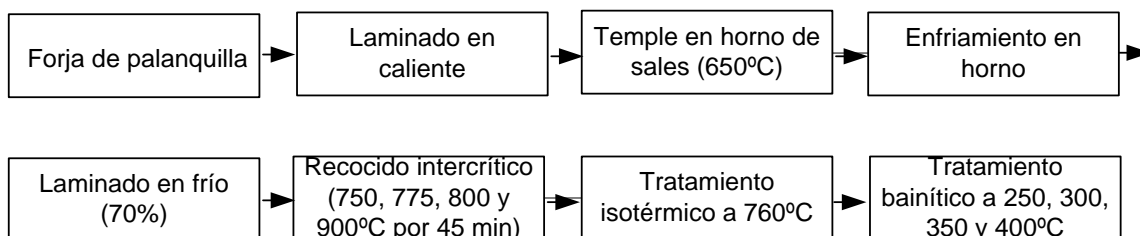
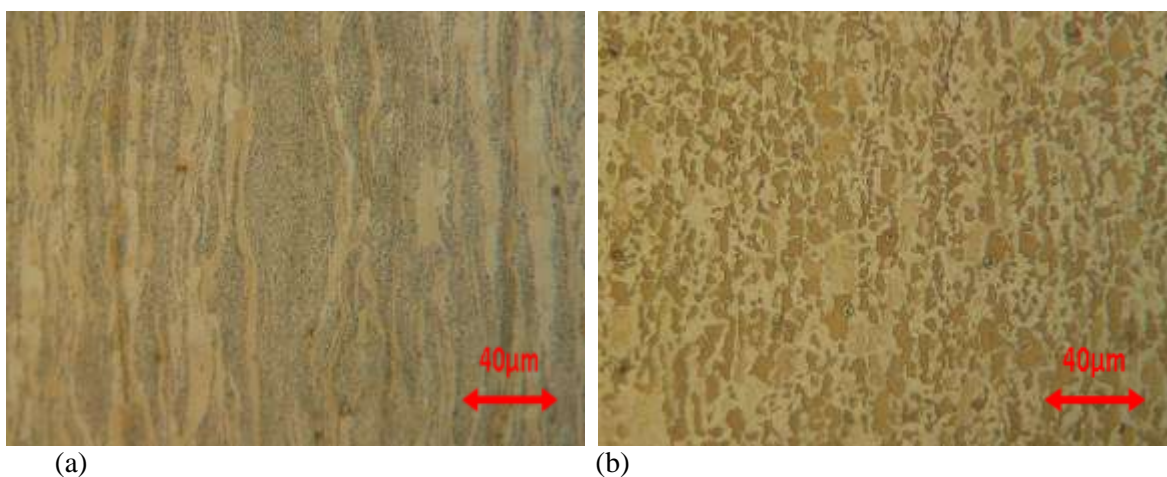


Figura 2.- Esquema del procedimiento experimental utilizado.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer término, se sometieron las probetas a un tratamiento de recocido intercrítico con el objetivo de estudiar la cinética de transformación de perlita en austenita y ferrita. Las microestructuras obtenidas en los tratamientos isotérmicos durante 45 min y distintas temperaturas se muestran en las figuras 3 y 4. El tiempo de 45 min fue tomado debido a que en este tiempo se garantizaba que el material alcanzara las condiciones de equilibrio. La fase clara corresponde a ferrita y la fase oscura a martensita. Como se observa, al aumentar la temperatura de tratamiento, se aumenta la cantidad de martensita obtenida. Se utilizaron dos reactivos: nital para revelar los bordes de grano ferríticos y el reactivo Le Pera, con el fin de revelar la presencia de bainita.

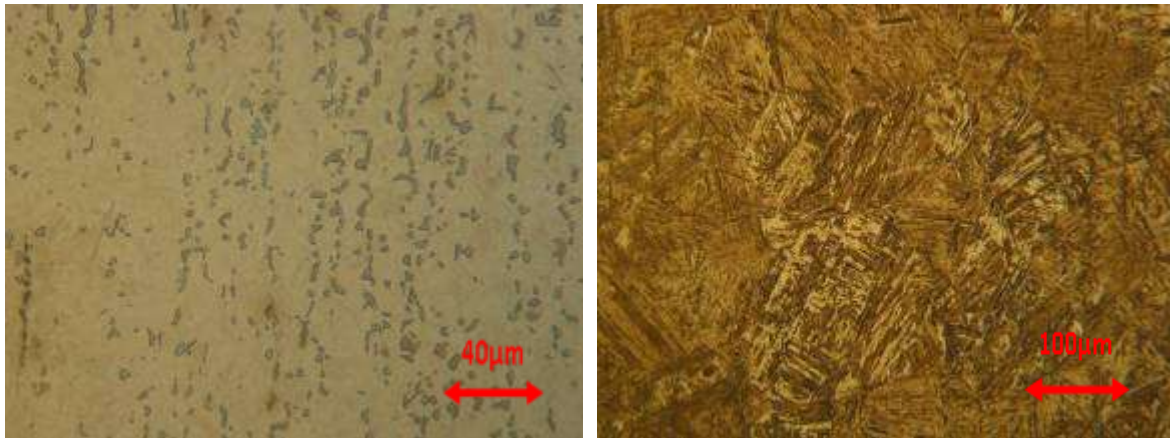


(a)

(b)

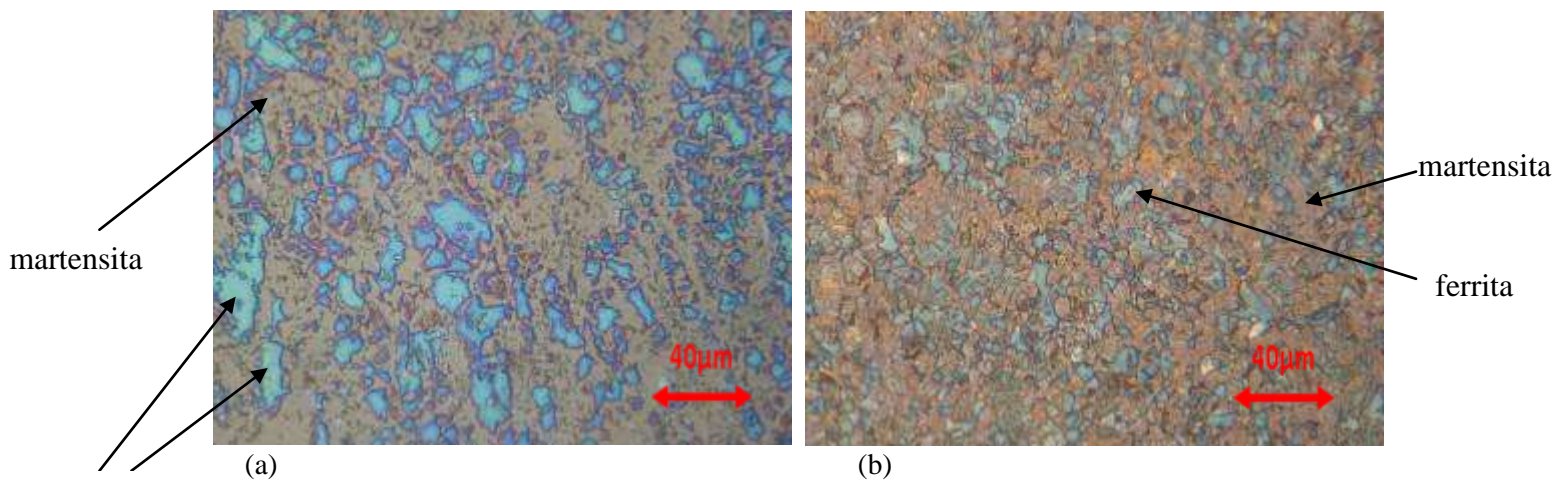
Figura 3.- Microestructura del acero recocido por 45 min (a) a 750 °C, la fase oscura corresponde a perlita (257 Vickers); la fase clara corresponde a ferrita (205 Vickers); (b) a 775°C (atacado con reactivo Lepera); (b) 775°C. La fase clara corresponde a martensita (814 Vickers); la fase oscura corresponde a ferrita (253 Vickers).

Dado que los aceros con comportamiento TRIP presentan contenidos de austenita del orden de 20%, se deben encontrar las condiciones de tratamiento de recocido que generen una cantidad de austenita de este orden. Este es el objetivo final de conocer la cinética de transformación perlita-austenita. Claramente, un tratamiento de recocido capaz de generar baja cantidad de austenita, debe ser hecho a baja temperatura (sobre  $A_1$ ). Por esta razón, después de realizar tratamientos isotérmicos a un mismo tiempo, se realizó un tratamiento a diversos tiempos a la temperatura de  $760^{\circ}\text{C}$ , estudiándose las transformaciones que ocurren a medida que el material es sometido a dicho tratamiento.



(a) (b)  
Figura 4.- Microestructura del acero recocido por 45 min (a) a  $800^{\circ}\text{C}$ ; (b) a  $950^{\circ}\text{C}$  (atacado con reactivo LePera). Matriz martensítica (782 Vickers).

La fracción de martensita encontrada en el caso de



(a) (b)  
Figura 5.- Microestructura del acero recocido a  $760^{\circ}\text{C}$  por (a) 20 min; (b) 40 min (atacado con reactivo LePera).

En la figura 5 se muestra la microestructura del acero tras ser sometido a un tratamiento de recocido a  $760^{\circ}\text{C}$  por 20 y 40 min, pudiendo observarse la presencia de ferrita y martensita. En el caso de la muestra recocida por 20 min, la dureza de la ferrita fue de 223 Vickers en tanto que la de la martensita alcanzó 772 Vickers. Los porcentajes de fases son 56% de ferrita y 44 % de martensita.

En el caso del material recocido por 40 min, las durezas correspondientes a cada una de estas fases son 253 HV para la ferrita y 742 HV para la martensita. Los porcentajes de fases son 48% de ferrita y 52 % de martensita. Como se aprecia, con un tratamiento a 760°C durante un tiempo superior a 20 min, es posible generar una estructura casi 50% martensita, 50% ferrita, lo que constituye el punto de partida para la fabricación de aceros TRIP. El siguiente paso lo constituye la realización de tratamientos bainíticos a temperaturas intermedias.

Se realizó finalmente un tratamiento isotérmico a las temperaturas de 300, 350 y 400°C, con el fin de inducir la precipitación de bainita. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 6 y 7, pudiendo observarse que en ambos casos, se produce un incremento en la cantidad de bainita a medida que aumenta el tiempo del tratamiento. Sin embargo, también se observa que en el caso del tratamiento a 350°C, este aumento en la cantidad de bainita es más significativo que en el caso del tratamiento a 400°C, lo que puede deberse a que 400°C se ubica por encima del tiempo mínimo de transformación bainítica (curva "C").



bainita ferrita martensita

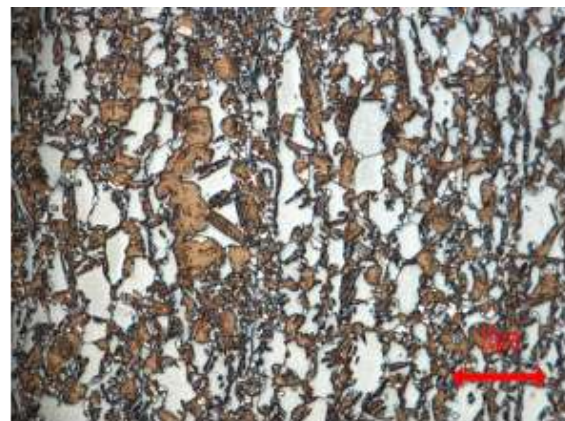
(a) 350°C por 1 min



(b) 350°C por 5 min

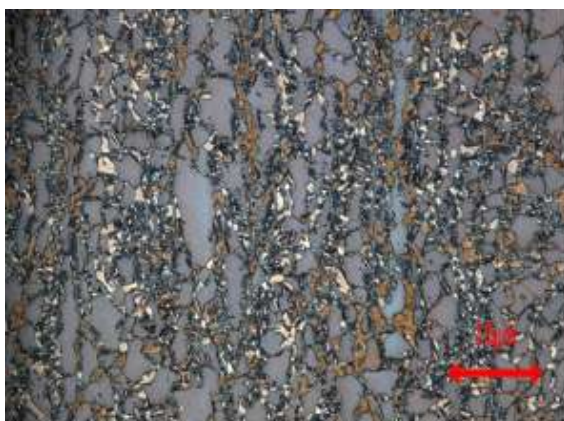


(c) 350°C por 10 min;

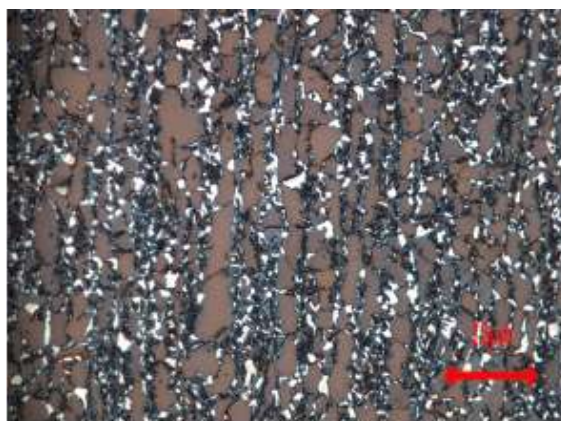


(d) 350°C por 20 min

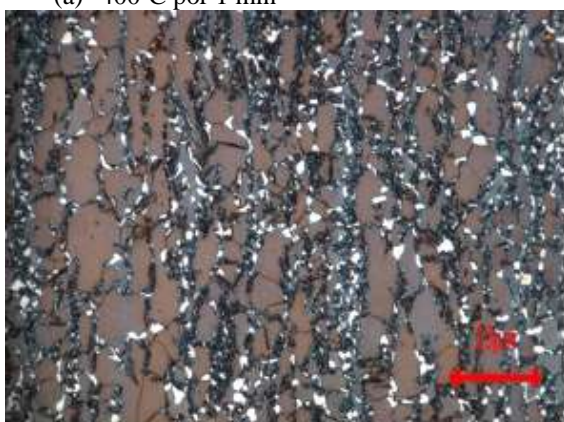
Figura 6.- Microestructura del acero deformado en frío, tratado isotérmicamente a 760°C y tratado térmicamente a 350°C.



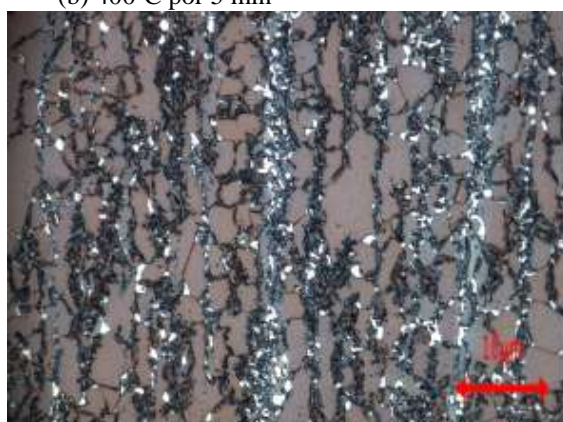
(a) 400°C por 1 min



(b) 400°C por 5 min



(c) 400°C por 10 min;



(d) 400°C por 20 min

Figura 7.- Microestructura del acero deformado en frío, tratado isotérmicamente a 760°C y tratado térmicamente a 400°C.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha determinado la cinética de transformación de perlita en austenita, durante tratamientos de recocido isotérmico.

Se ha logrado inducir, mediante un tratamiento apropiado, una estructura bifásica con 50% de martensita y 50% de ferrita.

Se ha obtenido una estructura consistente en una mezcla de ferrita, martensita y bainita a partir de un tratamiento isotérmico en la región bainítica.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al proyecto FONDECYT N°1090311 y a la DICYT-USACH por el apoyo dado a la presente investigación.

## 6. REFERENCIAS

1. Petrov R., Kestens L., Houbaert Y., Recrystallization of a cold rolled trip-assisted steel during reheating for intercritical annealing, *ISIJ Int.*, 2001; Vol. 41, N°8, 883-890.
2. S.K. Liu and J.Zhang: The influence of the Si and Mn concentrations on the kinetics of the bainite transformation in Fe-C-Si-Mn alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1990, 21 A (6): 1517 – 1525.
3. V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr The enhancement of ductility on High-Strength Steels. *Trans. ASM*, 1967, 60:252-259.
4. Hassani, F. and Yue, S. 41st Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceedings, Iron and Steel Society/AIME, USA, 37 (1999) 493.
5. O. Matsumura, Y. Sakuma, and H. Takechi, Enhancement of elongation by retained austenite in intercritical annealed 0.4C-1.5Si-0.8Mn steel. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1987. 27: pp. 570-579.
6. B. De Cooman, Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite, *Solid State and Materials Science*, 2004, Vol. 8, 285-303.
7. A.J Trowsdale & S.B. Pritchard, Fasteners without heat treatment Technical Report CORUS 2002.
8. E. Girault, P. Jacques: Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels, *Materials Characterization*, February 1998, pp. 111-118.
9. H. K. D. H. Bhadeshia: *Bainite, Steels Microstructure and Properties*, Third edition, 2006.