

Envío: 24-01-2012

Aceptación: 16-02-2012

Publicación: 02-05-2012

NUEVOS ACEROS TWIP/TRIP EN LOS AUTOMÓVILES DEL FUTURO

NEW STEELS TWIP/TRIP IN FUTURE AUTOMOBILES

Rafael Pla Ferrando¹

Samuel Sánchez Caballero²

Miguel Ángel Sellés Cantó³

José Enrique Crespo Amorós⁴

1. Ingeniero Técnico Industrial en Mecánica y Electricidad. Ingeniero de Organización Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Diseño y Fabricación Sector Automoción.
2. Ingeniero Técnico Industrial en Mecánica. Ingeniero de Organización Industrial. Doctor en Organización Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Diseño y Fabricación Sector Automoción.
3. Ingeniero Técnico Industrial en Electrónica. Ingeniero de Organización Industrial. Doctor Ingeniero en Organización Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología de Materiales.
4. Ingeniero Técnico Industrial en Mecánica. Ingeniero de Materiales. Doctor Ingeniero de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología de Materiales.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto introducir al lector en un grupo de materiales que prometen tener relevancia en la evolución de las estructuras de automóviles, y que probablemente cambien la forma de diseñar elementos resistentes. Se describen las propiedades más relevantes, Se justifican los beneficios medioambientales de su implantación. Finalmente se llega a las conclusiones que justifican su idoneidad para múltiples aplicaciones donde se requiera aumento de seguridad con disminución de peso.

ABSTRACT

This paper aims to introduce the reader to a group of materials that promise to be relevant in the evolution of automotive structures, and probably change the way design elements resistant. It describes the most relevant properties. It justifies the environmental benefits of its implementation.

Finally, conclusions are justifying their suitability for multiple applications requiring enhanced security with reduced weight.

PALABRAS CLAVE

AHSS, TWIP, TRIP, Dual-Phase, automoción.

KEYWORDS

AHSS, TWIP, TRIP, Dual-Phase, automobile.

INTRODUCCIÓN

En 2000, Georg Frommeyer, del Max-Planck-Institut für Iron Research publicó el artículo denominado Supra-Ductile and High-Strength Manganese TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes^[1]. Frommeyer presenta la investigación desarrollada alrededor de aceros con alto contenido de Manganeso (15 a 30%), y cantidades adicionales de Silicio y Aluminio. En 2002 el mismo autor ya es titular de la patente Light constructional steel and the use thereof^[2].

Desde esa fecha ha habido un creciente interés alrededor de estos nuevos materiales. Ello basado en las excelentes propiedades respecto a los materiales actualmente utilizados. Un gráfico con grandes bloques ilustrará el avance en cuanto a propiedades mecánicas de estos nuevos aceros, posicionado con respecto a aceros convencionales y otros de alta resistencia.

El interés suscitado por este material puede apreciarse por la evolución de artículos alrededor de estos materiales, y el número de patentes en los últimos años, hasta el verano de 2010.

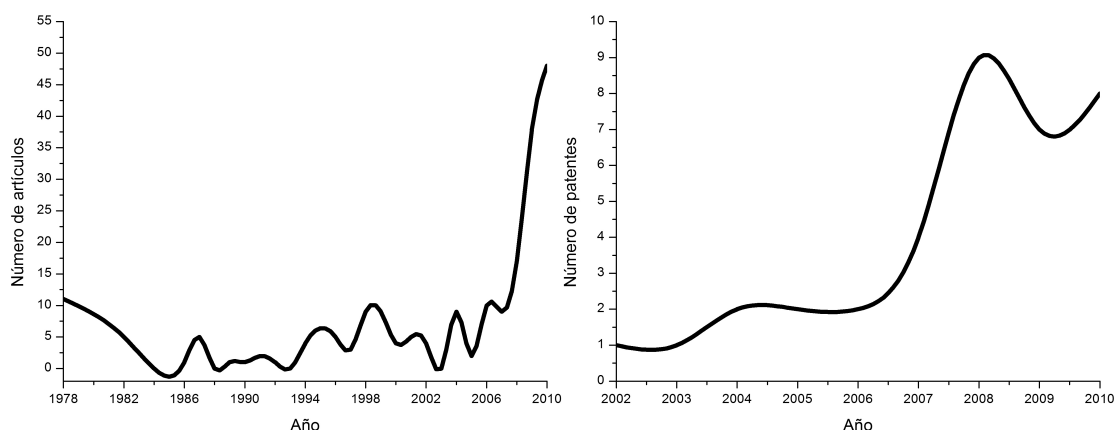


Figura 1. Producción científica relacionada con los aceros TWIP. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo los principales propietarios de las patentes indican la importancia tecnológica del material: Frommeyer, G; Daimler-Chrysler AG (Stuttgart, DE); Thyssenkrupp Stahl AG (Duisburg, DE); Arcelor France; TRW Automotive GmbH; Posco (Pohang, KR); Hyundai Motor Company (Seoul, KR); Dayton Progress Corporation (Dayton, OH, US); Salzgitter Flachstahl GmbH (Salzgitter, DE). Centre de Recherches Metallurgiques asbl (Bruxelles, BE). ILJIN Light Metal Co., LTD. (Anyang-city, KR), KIA Motors Corporation (Seoul, KR). Corus Staal BV (Ijmuiden, NL).

LOS ACEROS EMPLEADOS ACTUALMENTE

Los aceros que actualmente son usados en el sector del automóvil se definen como de alta resistencia HSS (High Strength Steels) los cuales poseen límites elásticos comprendidos entre 210 y 550 MPa y con una tensión de rotura de entre 270 y 700 MPa. Mientras que otros aceros con límites elásticos mayores de 550 MPa y con tensiones de rotura mayor de 700 MPa son los llamados aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High Strength Steels). En la Figura 2 se muestran diferentes tipos de estos aceros.

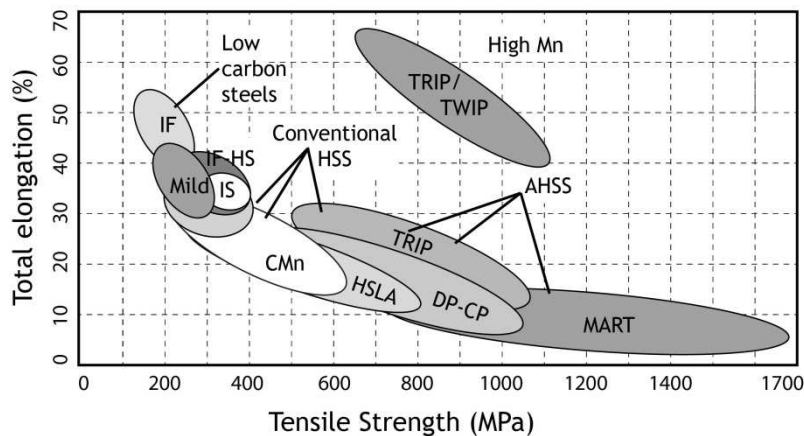


Figura 2. Posicionamiento de los TWIP/TRIP.

La principal diferencia entre los aceros convencionales HSS y los avanzados AHSS es su microestructura. Los HSS son monofásicos con una estructura ferrítica, mientras que los AHSS son de múltiples fases, que pueden contener ferrita, martensita, bainita, y o austenita retenida en cantidades suficientes para producir distintas propiedades mecánicas.

Algunos tipos de AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento dando como unas propiedades resistencia-ductilidad mayor a los aceros convencionales.

METALURGIA DE LOS AHSS

La fabricación de los AHSS es algo más compleja que los aceros convencionales. El control en la fabricación debe ser mayor ya que se basa en los porcentajes de las diferentes fases presentes. Dentro de esta clasificación nos encontramos con los llamados Dual Phase (DP), Transformation-Induced Plasticity (TRIP), Complex Phase (CP), Ferritic-Bainitic (FB), Twinning-Induced Plasticity (TWIP), Hot-Formed (HF), Post-Forming Heat-Treatable (PFHT). Aquí vamos a describirlos algunos tipos para comprender mejor sus capacidades.

TRANSFORMATION-INDUCED PLASTICITY (TRIP)

Como vemos en la figura la microestructura de los aceros TRIP es una formación de distintas fases donde la ferrita y bainita son las que forman la matriz. Las fases bainítica y martensítica serán las encargadas de darle al material una alta resistencia. Poseen una cantidad mínima del 5% de austenita retenida.

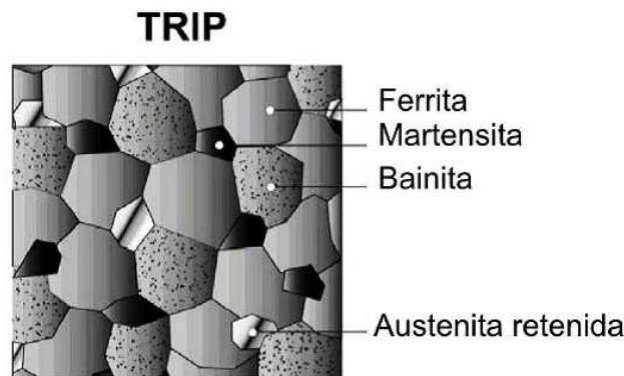


Figura 3. Microestructura de los TRIP. Fuente: International Iron and Steel Institute

Durante la deformación, la aparición de una fase dura entorno a la ferrita crea un endurecimiento por deformación. Sin embargo, en los TRIP la austenita retenida también se transforma progresivamente en martensita con el aumento de la tensión, con lo cual aumenta aún más la dureza. En los TRIP también interviene la velocidad de deformación, factor muy importante para las propiedades que afectan a la resistencia al impacto.

El nivel de austenita retenida que se transforma en martensita dependerá del contenido de carbono. A bajos niveles de carbono, la austenita retenida empezará a transformarse inmediatamente bajo deformaciones. A altos niveles de carbono la austenita retenida será más estable y se transformará con niveles de esfuerzos mayores. Este será la causa de que este material tenga una excelente capacidad para absorción del impacto, e irá aumentando conforme aumente la deformación.

TWINNING-INDUCED PLASTICITY (TWIP)

Los aceros TWIP tienen un alto contenido de manganeso (17-30%), que 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 (valor n) con una microestructura muy fina. Los límites de las maclas resultantes actúan como límites de grano y refuerzan el acero. Los aceros TWIP combinan una resistencia extremadamente alta con una conformabilidad muy elevada. El valor " n " aumenta a un valor de 0,4 con una deformación de ingeniería de aprox. 30% y se mantiene constante hasta una elongación total de alrededor del 50%. La resistencia a la tracción es superior a 1100 MPa, y su capacidad de deformación puede llegar al 95%. De acuerdo con la información suministrada por Arcelor Auto y Thyssen Krupp se puede llegar a una deformación del 35% para una resistencia de 1400 MPa.

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS AHSS

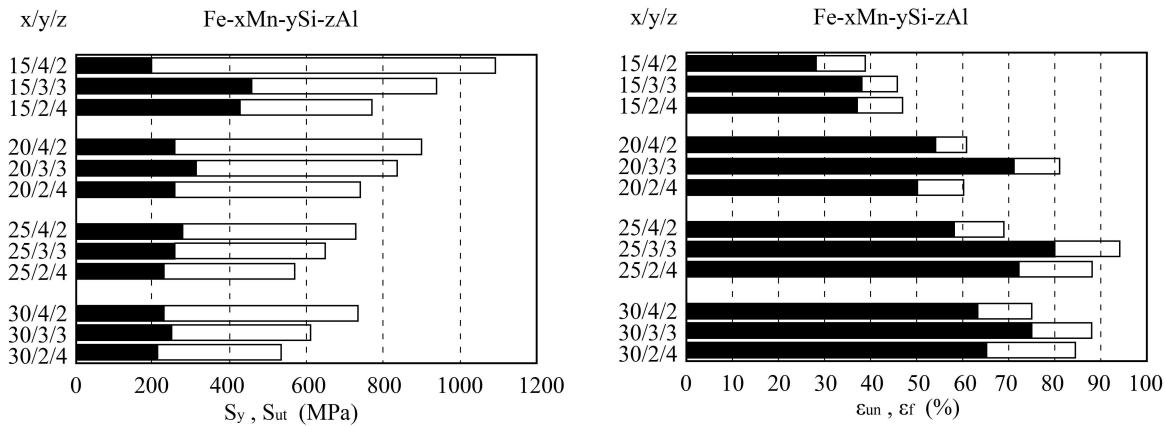
A fecha de hoy ya existe un conocimiento importante sobre las propiedades mecánicas de los aceros avanzados de alta resistencia. El conjunto de los aceros TRIP/TWIP merecen un tratamiento diferenciado del resto de aceros, más conocidos. La siguiente tabla muestra los datos suministrados por Frommeyer^[1] en su primer artículo:

	Mn [peso%]	Si [peso%]	Al [peso%]	Cppm	Fe
Fe-15Mn-4Si-2Al	16,2	4	1,8	200	resto
Fe-15Mn-3Si-3Al	17,9	3,2	2,9	200	resto
Fe-15Mn-2Si-4Al	15,9	1,9	3,5	100	resto
Fe-20Mn-4Si-2Al	18,2	4,3	1,8	600	resto
Fe-20Mn-3Si-3Al	20,1	2,8	2,9	400	resto
Fe-20Mn-2Si-4Al	18,1	1,8	3,5	300	resto
Fe-25Mn-4Si-2Al	25,5	3,9	1,8	300	resto
Fe-25Mn-3Si-3Al	26,5	3	2,8	300	resto
Fe-25Mn-2Si-4Al	25,6	2	3,8	300	resto
Fe-30Mn-4Si-2Al	28,7	4	2	200	resto
Fe-30Mn-3Si-3Al	29,2	3	2,8	200	resto
Fe-30Mn-2Si-4Al	30,6	2	3,9	100	resto

Tabla 1. Composición de los aceros Fe-Mn-Si-Al investigados por Frommeyer.
Fuente: Elaboración propia.

Las dos figuras siguientes indican valores de Resistencia y Deformación relativa en función de la variación de la composición^[1].

Figura 4. Resistencia y deformación relativa en función de la composición



No obstante, dentro de esta gama, algunos grados pueden ser TRIP (la austenita cambia a martensita en la deformación) o TWIP^[3] (la austenita es permanente).

	Mn [wt%]	Si [wt%]	Al [wt%]	C ppm	N ppm	Fe	Fases anteriores al ensayo de tracción	Fases tras la deformación
Fe-15Mn-3Si- 3Al(TRIP-steel)	15.8	3.0	2.9	200	<30	resto	$\gamma_{fcc} + \alpha_{ferr}^{bce} + \epsilon_{hep}^{Ms}$	$\gamma_{fcc} + \alpha_{ferr}^{bce} + \epsilon_{hep}^{Ms}$
Fe-20Mn-3Si- 3Al(TRIP/TWIP- steel)	20.1	2.8	2.9	400	<30	resto	$\gamma_{fcc} + \epsilon_{hep}^{Ms}$	$\gamma_{fcc} + \epsilon_{hep}^{Ms} + \alpha_{bce}^{Ms}$
Fe-25Mn-3Si- 3Al(TWIP-steel)	25.6	3.0	2.8	300	<30	resto	γ_{fcc}	γ_{fcc}

Tabla 2. Composición de los aceros TRIP y TWIP. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo para poder situar las ventajas de este nuevo material respecto a otros conocidos, se presentan la Figura 5 obtenidos de Arcelor, donde se comparta tensión verdadera frente a deformación verdadera para el X-IP1000(TWIP), con un acero micro-aleado, Dual-Phase y acero TRIP . Así mismo se presenta la velocidad de endurecimiento instantáneo (coeficiente n).

La capacidad de deformación del TWIP supera ampliamente el 15%. Esto lo hace adecuado para conformado de piezas complejas; donde impera más la deformación biaxial que la flexión. Así mismo la elevada capacidad deformación permite una gran absorción de energía. Este hecho le hace de gran utilidad en elementos de amortiguación frente a impacto, actuando como un fusible; tales como las cajas de impacto en automóviles.

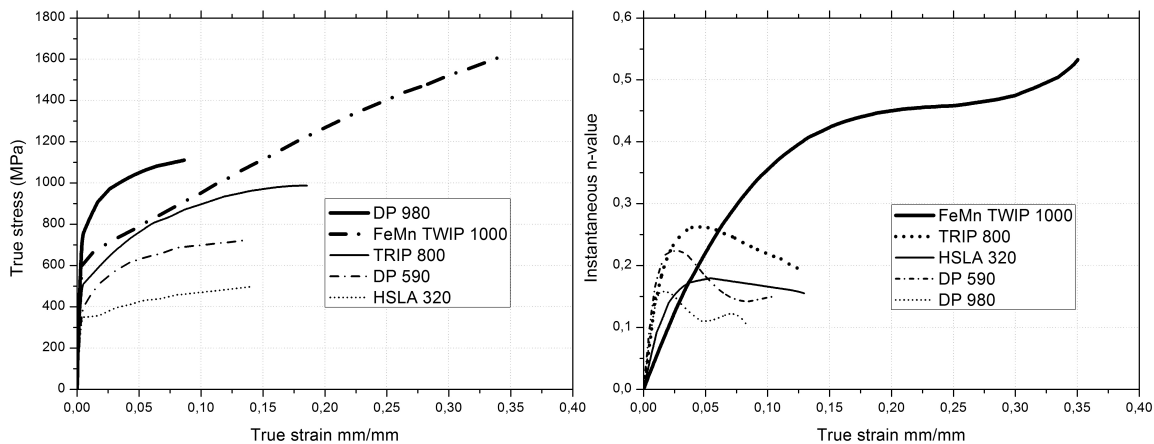


Figura 5. Curvas de tracción de los aceros TRIP y TWIP. Fuente Arcelor.

En los TWIP, el coeficiente “n” aumenta hasta un valor de 0,4 con una deformación de ingeniería de aprox. 15% y se mantiene constante hasta una elongación total de alrededor del 25%. En donde otros aceros sufren estricción, n llega a valores excepcionales de 0,45. Este elevado y constante comportamiento del exponente n garantiza, para las zonas con sobrecargas puntuales, una mejor distribución de las tensiones, y una protección contra la estricción local.



Figura 6. Deformación de un soporte fabricado con TWIP. Fuente: Arcelor.

El comportamiento en condiciones normales de fatiga de los TRIP/TWIP, con un límite de fatiga de alrededor de 400MPa para 2.106 ciclos, los coloca algo por encima de los inoxidables AISI 316LN y ^[4,5] 301L.

FABRICACIÓN DE LOS AHSS (TRIP/TWIP)

El X-IP1000 es el nombre comercial de los TWIP que comercializan Arcelor y TKS. Otros fabricantes están en el mercado, tal como deducirse de la relación de patentes que se han reseñado el comienzo de este trabajo.

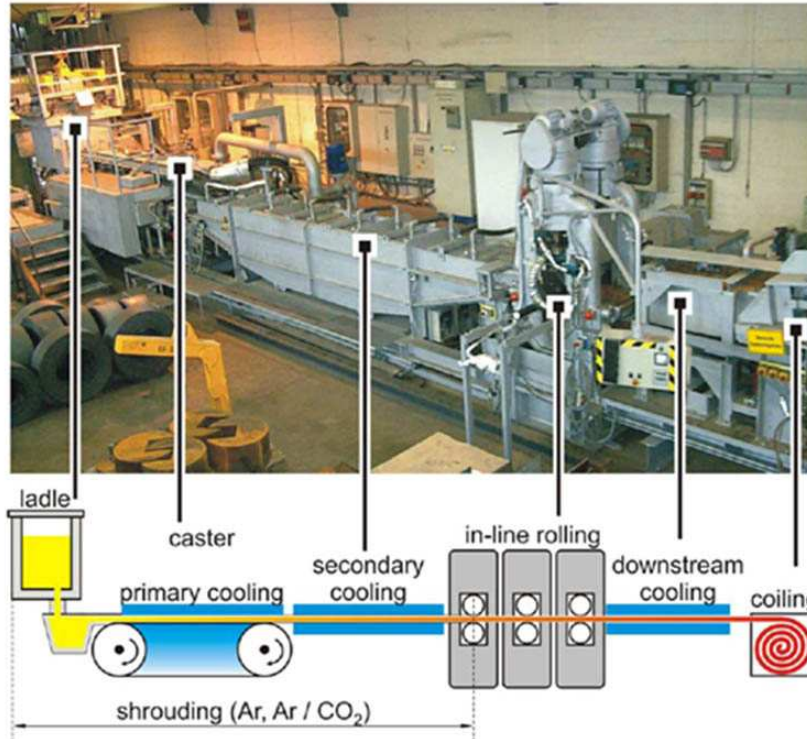


Figura 7. Planta de producción de TWIP. Fuente: Arcelor.

Empresas como Salzgitter AG Y Mannesmann-Demag AG Metallurgy, Thyssen-Krupp Stahl AG y MEFOS han desarrollado plantas piloto para la investigación y desarrollo del proceso productivo. Pro-ceso que seguramente será mejorado en los próximos años, dada la apuesta hecha por este tipo de acero.

El procedimiento de fabricación es en continuo, sistema DSC, una cinta transportadora arrastra el líquido en una atmósfera inerte, produciéndose el primer enfriamiento, tras lo cual, se enfría hasta la temperatura de laminado, llegando mediante un sistema de transporte a un sistema de laminación, y acabando en bobinas con espesores de chapa de 10 a 15 mm.

Este sistema se caracteriza por hacerse un solo calentamiento, el de la colada. La obtención de aceros el tipo TRIP o TWIP, y sus elevadas propiedades mecánicas, depende de la composición y del control del proceso.

LOS TRIP/TWIP Y EL MEDIO AMBIENTE

Si se considera únicamente el impacto del proceso, la información disponible indica que la longitud del tren de fabricación se reduce a 100m, frente a los 600 m totales del sistema tradicional CSC (Con calentamientos sucesivos). Así mismo el procedimiento DSC significa un enfriamiento rápido del acero líquido bajo atmósfera protectora, sin rozamientos, sin tensiones de flexión (el moldeo se hace en posición horizontal), sin agua pulverizada para el enfriamiento ni emisión polvos de desmoldeo. Y lo que es muy importante, ahorros de energía térmica muy superiores al 60%.

Por otra parte, consideremos el foco principal de estos materiales, al menos de momento: los automóviles.

En los últimos 30 años, vehículos como el Astra, han pasado de pesar alrededor de 8000N en 1970, a 11500 N en 2002, y un Golf de VolksWagen ha pasado de un peso parecido al del Astra, a pesar unos 13500 N en el mismo período, y 15900 N en 2010.

El aumento de peso se justifica con el incremento de la seguridad y el confort: aire acondicionado, sistemas de control de la adherencia del vehículo, airbag, vehículos híbridos, un promedio de 20 motores, otros sistemas de control, etc. Nos encontramos con dos exigencias antagónicas, por una parte el aumento de confort y seguridad, y por otra la disminución de emisiones y la sostenibilidad. Para poder conjugarlas, se ha de buscar que los elementos constitutivos de los vehículos tengan menor peso y mayores prestaciones y por ende menor consumo. Y esto obligado no solo por la competencia, sino por las legislaciones europeas tales como la NCAP de seguridad, la Euro5 de emisiones diesel la New Vehicle target 130 gr/km CO₂ para 2012-2015 y para el 2015 ELVD “95% per vehicle mass reused/ recovered, 85% per vehicle mass reused/recycled”.

Aproximadamente el 20% del peso del vehículo es el chasis, las puertas, capó, puerta trasera, elementos de suspensión y otros accesorios, adjudican alrededor del 60% del peso de un vehículo a elementos de acero, y esto prácticamente para el 99% de los automóviles fabricados en el Mundo. Utilizar materiales de mayor resistencia, y al mismo tiempo mayor tenacidad, permitirán reducir el peso del vehículo allá donde pueda hacerse.

En estos momentos los aceros de alta resistencia han ido desplazando a los aceros convencionales (suaves) que ahora representan alrededor del 75% de acero, por otros de segunda y tercera generación (Aceros avanzados de alta resistencia) (Fuente: AISI). De entre estos los TWIP/TRIP van a tener un papel relevante en elementos de responsabilidad en cuanto a la seguridad contra el impacto.

La Comisión Europea ha realizado un estudio sobre la integración del uso de aceros de alta resistencia en el diseño de automóviles y las tecnologías de laminado y plegado, llegándose a una metodología que incorpora tanto las propiedades mecánicas, coste de los materiales y aumento de la seguridad. En este estudio se justifica la implantación de aceros cada vez más resistentes, con reserva de su conformabilidad; contemplando simultáneamente su coste. Pude traslucirse de este estudio una implantación cada vez mayor de los TWIP, dado que el aumento de producción siempre lleva anejo la bajada de costes.

CONCLUSIONES

Los aceros al Fe-Mn-Al presentan una elevada resistencia mecánica frente a una extraordinaria capacidad de absorción de energía. Así mismo presentan muy buena conformabilidad.

El proceso de producción de los TRIP/TWIP es muy eficiente desde un punto de vista energético.

El uso de estos materiales redundará en la disminución de peso de los vehículos, junto a un aumento simultáneo de la seguridad contra impacto.

Parece razonable prever que en los próximos años se dé un aumento de producción, con la disminución de costes por las economías de escala, y la rápida aplicación a otros sectores donde sea necesaria la elevada tenacidad con una disminución de peso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un proyecto subvencionado por la Universitat Politècnica de València (PAID-06-10-003-305).

REFERENCIAS

- [1] **Grässel, O., et al.**, *High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development -- properties -- application*. International Journal of Plasticity, 2000. 16(10-11): p. 1391-1409.
- [2] **Frommeyer, G.E., DE, Grässel, Oliver** (4700 Krefeld, DE), *Light constructional steel and the use thereof*. 2002: United States.
- [3] **Georg Frommeyer**, *Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes*. ISIJ International, 2003. 43(3).
- [4] **Hamada, A.S., et al.**, *Fatigue Behavior of Four High-Mn Twinning Induced Plasticity Effect Steels*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010.
- [5] **Hamada, A.S., L.P. Karjalainen, and J. Puustinen**, *Fatigue behavior of high-Mn TWIP steels*. Materials Science and Engineering: A, 2009. 517(1-2): p. 68-77.