

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS DE INGENIERÍA 9

***LOS NUEVOS ACEROS PARA LA INDUSTRIA
AUTOMOTRIZ***



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2009

LOS NUEVOS ACEROS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

RESUMEN

En décadas recientes se han desarrollado distintos tipos de aceros para la industria automotriz. Proporcionando progresos significativos en seguridad, ahorro de combustible, resistencia a la abolladura y confort. Estos aceros proporcionan muchas ventajas a la industria ya que tienen propiedades excepcionales (buena ductilidad, resistencia mecánica y facilidad de conformado). Este trabajo muestra los principios de la metalurgia y procesamiento de los grados más utilizados de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)

Palabras clave: tratamiento térmico, propiedades mecánicas, resistencia máxima, endurecimiento por deformación, austenita.

INTRODUCCIÓN

Actualmente para la fabricación de carrocerías y bastidores, la industria automotriz utiliza distintos tipos de acero, siendo los más importantes los siguientes:

- *Aceros de bajo carbono (mild steels)*
- *Aceros endurecibles por recocido (Bake hardening, BH)*
- *Aceros reforzados por solución sólida (Solid Solution Strengthened, SSS)*
- *Aceros Alta Resistencia, Baja Aleación (High Strength Low Alloy, HSLA)*

La presión sobre los fabricantes de automóviles por mejorar de manera continua la seguridad y la economía en el consumo de combustible, buscando al mismo tiempo reducir los costos y el impacto ambiental, tales factores afectan dramáticamente el diseño del vehículo y la selección de elementos constitutivos para el mismo. Por lo tanto, lograr dichas metas requiere de la combinación de materiales de alta tecnología, de diseños

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

innovadores, de procesos de manufactura avanzados y de una buena comunicación entre los ingenieros de diseño, los ingenieros de manufactura y los ingenieros en materiales

Si se recuerda que actualmente el peso de la carrocería en un vehículo normal de pasajeros resulta aproximadamente la quinta parte del peso total del coche. Le sigue motor y transmisión que contribuyen, aproximadamente, con 18% al peso total. El chasis, los parachoques y la suspensión representan el 12% [1]. Pueden usarse nuevos materiales tales como los aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steels, AHSS) para reducir en gran medida el peso de muchas de las partes anteriores.

Estos aceros son el producto de los proyectos ULSAB (UltraLight Steel Auto Body, Carrocerías para Automóvil Ultraligeras de Acero) y AVC (Advanced Vehicules Concepts, Conceptos avanzados para vehículos) que son auspiciados por 35 empresas fabricantes de acero a nivel mundial y que enfocan su atención en los avances en los conceptos de diseño de bajo peso y el uso extensivo de los aceros AHSS son la clave que permite el diseño de componentes de menor peso [2].

DESARROLLO

Los aceros avanzados de alta resistencia (aceros AHSS) son aceros con una resistencia máxima de al menos 500 MPa. Son aceros multifásicos que pueden contener ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas excepcionales (dadas por un endurecimiento por transformación). Estos aceros muestran una excelente combinación de buena resistencia mecánica y una excelente facilidad de conformado que es el resultado de sus excelentes características de endurecimiento por deformación. Estos aceros son especialmente promisorios en la fabricación de carrocerías para automóvil resistentes al choque, donde se requiere rigidez, resistencia y absorción de energía en cada una de las partes que la conforman.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

Dentro de estos aceros de reciente desarrollo se pueden mencionar a las siguientes familias principales:

- *Aceros de Fase Dual (Dual Phase, DP)*
- *Aceros de Transformación Inducida por Plasticidad (Transformation-Induced Plasticity, TRIP)*
- *Aceros de Fase Compleja (Complex Phase, CP)*
- *Aceros Martensíticos (Martensitic, MS)*
- *Aceros de Transformación Inducida por Maclaje (aceros TWIP)*

Aceros de fase dual (aceros DP)

Estos aceros fueron desarrollados en 1975 cuando un estudio mostró que el recocido continuo en el rango de temperatura crítica da como resultado un acero con microestructura de ferrita y martensita con una ductilidad mayor que la que poseen los aceros HSLA endurecidos por precipitación o por solución sólida.

Como ya se mencionó, la microestructura de los aceros de fase dual (aceros DP) está constituida por una matriz de ferrita más martensita (que es una fase de alta dureza) que se encuentra en forma de islas, figura 1. Incrementando la cantidad de martensita, generalmente aumenta también la resistencia del acero.

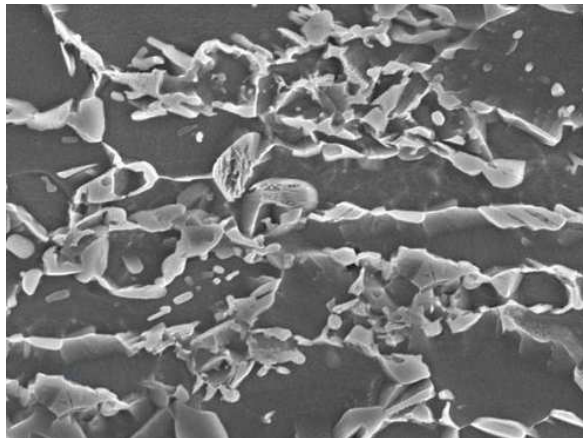


Figura 1. Estructura de ferrita más martensita de un acero de fase dual [3]

A velocidades de enfriamiento prácticas el carbono permite la formación martensita en los aceros DP ya que incrementa la templabilidad del acero. Otros elementos como el Mn, Cr, Mo, V y Ni en forma individual o en conjunto también incrementan en forma sustancial la templabilidad del acero. El carbono también endurece a la martensita como un endurecedor de fase sólida de la ferrita, como lo hace el silicio y el fósforo.

Los aceros DP laminados en caliente se producen mediante un enfriamiento controlado desde la zona austenítica, figura 2, o desde la zona bifásica de austenita más ferrita para aceros laminados en frío con la finalidad de tener ferrita antes de que un rápido enfriamiento transforme la austenita restante en martensita. Dependiendo de la composición y el proceso específico, los aceros DP laminados en caliente que requieren capacidades óptimas de punzonado pueden contener cantidades significativas de bainita.

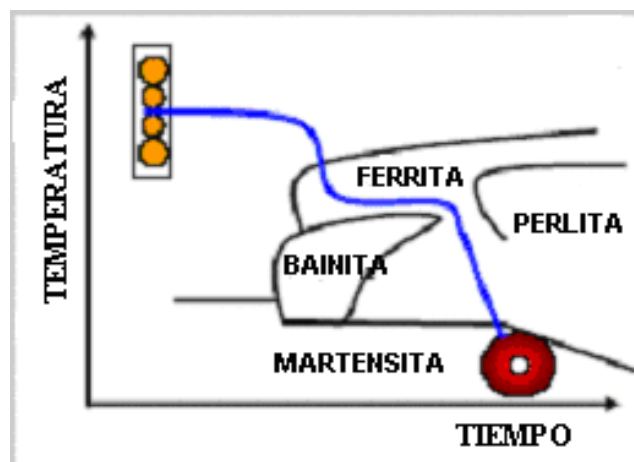


Figura 2. Diagrama esquemático tiempo-temperatura que muestra las etapas necesarias para un obtener un acero DP laminado en caliente [4]

La rapidez de endurecimiento por trabajo y una excelente ductilidad proporcionan a los aceros DP una resistencia máxima mucho mayor que la que tienen los aceros convencionales con una resistencia a la fluencia similar. La figura 3 muestra el diagrama esfuerzo-deformación de ingeniería para un acero DP y un acero HSLA de similar resistencia a la fluencia y donde se puede apreciar que el acero DP exhibe una

rapidez de endurecimiento por deformación más grande, y una mayor resistencia a la fluencia y resistencia máxima.

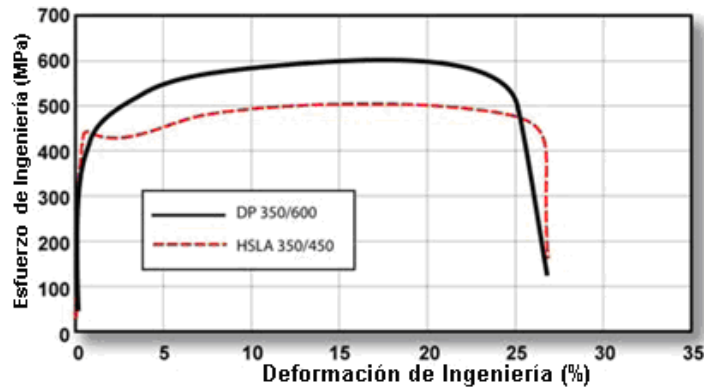


Figura 3. Diagrama esfuerzo-deformación de Ingeniería para un acero DP y un acero HSLA [5]

Los aceros DP y otros aceros AHSS muestran también un endurecimiento por recocido [2] que es un importante beneficio con respecto a los aceros convencionales. Este efecto es muy importante ya que se obtiene un aumento en la resistencia a la fluencia cuando el acero se calienta en los hornos de secado de pintura, después de haberse sometido a operaciones de deformación plástica como el estampado u otros procesos. Este efecto en los aceros AHSS depende de la composición química específica y el historial térmico del acero.

Composiciones típicas para aceros DP laminados en frío son: 0.08-0.18%C, 1.6-2.2%Mn, 0.4%Cr+Mo. Y para aceros DP laminados en caliente: 0.05%C 1%Si, 1.5%Mn, 0.6%Cr y 0.4%Mo [6]

Aceros de Transformación Inducida mediante Plasticidad (aceros TRIP)

La microestructura de los aceros de Transformación Inducida mediante Plasticidad (aceros TRIP) está constituida básicamente por cantidades variables de austenita en una matriz de ferrita; además de un mínimo de 5% en volumen de austenita retenida, están presentes fases de alta dureza, como la bainita y la martensita en cantidades variables, mostrándose esta estructura en forma esquemática en la figura 4.

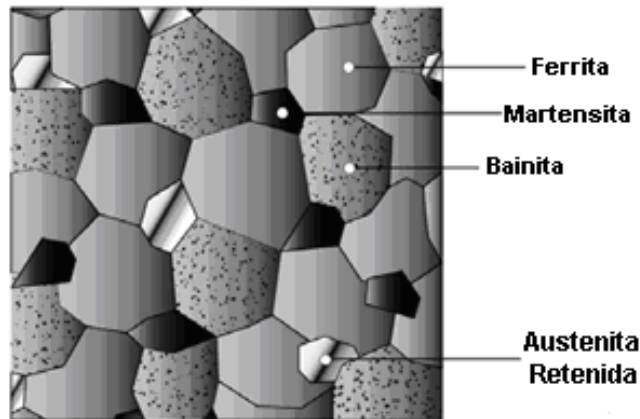


Figura 4. Representación esquemática de la microestructura de un acero TRIP [2]

Los aceros TRIP requieren de manera general de una permanencia isotérmica a temperaturas intermedias lo cual produce algo de bainita, también el contenido relativamente elevado de silicio y carbono da como resultado cantidades significativas de austenita retenida, como se muestra en la figura 5.

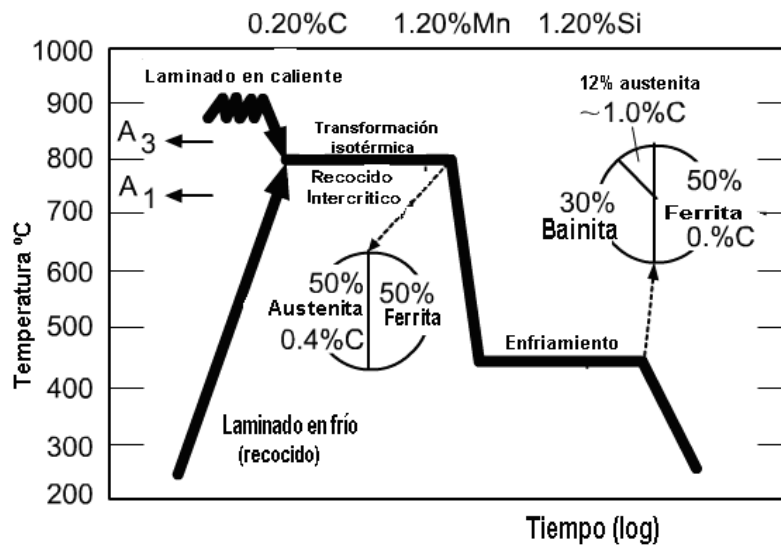


Figura 5. Procesamiento de fleje y lámina de un acero con efecto TRIP [7]

Durante la deformación plástica, la dispersión de la austenita y la bainita crea una alta velocidad de endurecimiento por deformación tal y como sucede en los aceros DP, sin embargo, en los aceros TRIP al deformar plásticamente al acero, la austenita retenida se transforma progresivamente en martensita aumentando aún más la velocidad de endurecimiento por deformación y llevando a niveles superiores la resistencia del acero, en consecuencia, estos aceros son más fácilmente conformables que los aceros de fase dual, especialmente a altas coeficientes de deformación (valores de $n > 0.2$) con una resistencia mecánica similar, esto se ilustra en la figura 6 donde se muestra el diagrama esfuerzo deformación de ingeniería para diferentes tipos de acero con una resistencia a la fluencia similar.

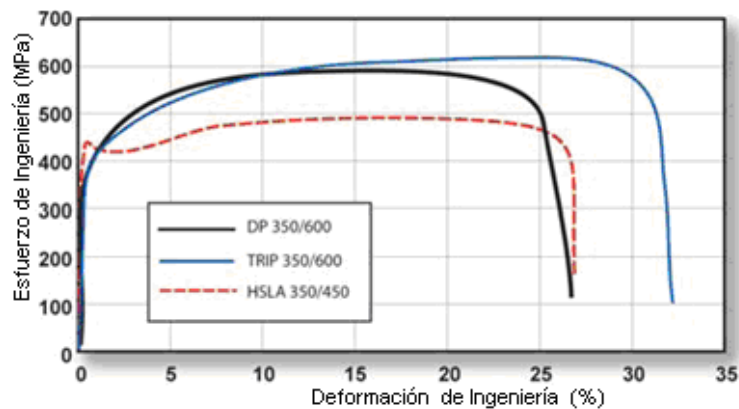


Figura 6. Diagrama esfuerzo – deformación de ingeniería que muestra las propiedades superiores de un acero TRIP

La cantidad de deformación a la cual inicia la transformación de la austenita en martensita puede ajustarse mediante el contenido de carbono. Con poco carbono, la austenita inicia su transformación inmediatamente después de la deformación, incrementando la velocidad de endurecimiento por deformación y la facilidad de conformado durante el proceso de estampado. Con contenidos mayores de carbono, la austenita retenida es más estable transformándose solamente a niveles de deformación más allá que los producidos durante su conformado. Esto es, la austenita aún existe en la parte ya terminada, pudiéndose transformar a martensita durante una deformación subsecuente, como un choque.

Los aceros TRIP necesitan un contenido mayor de Si y/o Al y/o fósforo que los aceros de fase dual y son relativamente difíciles de producir.

Aceros de Fase Compleja (acero CP)

Estos aceros ejemplifican la transición a los aceros con resistencias máximas muy elevadas. La microestructura de los aceros CP contiene pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita con una matriz de ferrita/bainita, utilizando para ello un proceso como el que se muestra en la figura 7.

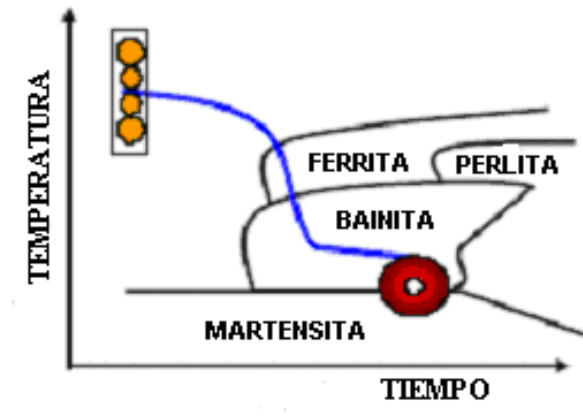


Figura 7. Diagrama esquemático tiempo-temperatura que muestra las etapas necesarias para un obtener un acero CP [4]

Se obtiene un grano extremadamente fino mediante recristalización retardada o la precipitación de elementos microaleantes como el titanio o el columbio. En comparación con los aceros DP estos aceros ofrecen una resistencia a la fluencia significativamente mayor con resistencias máximas de hasta 800MPa y aún mayores. También se caracterizan por una alta absorción de energía y una capacidad de deformación residual elevada.

Aceros martensíticos (aceros MS)

Estos aceros ofrecen algunas de las resistencias más elevadas disponibles en el mercado, además ofrecen relaciones resistencia/peso mucho mas altas que los aceros convencionales rolados en frío y kilogramo por kilogramo son mucho más económicos que otros metales o plásticos.

El carbono es un elemento básico en los aceros MS ya que proporciona templabilidad y endurece a la martensita, utilizándose también, Mn, Si, Cr, Mo, B, V y Ni para incrementar la templabilidad del acero.

Para producir estos aceros, la austenita que existe durante el laminado en caliente o durante el recocido se transforma en su mayor parte en martensita, figura 8, en el tren de laminado o en la sección de enfriamiento de la línea de recocido continuo.

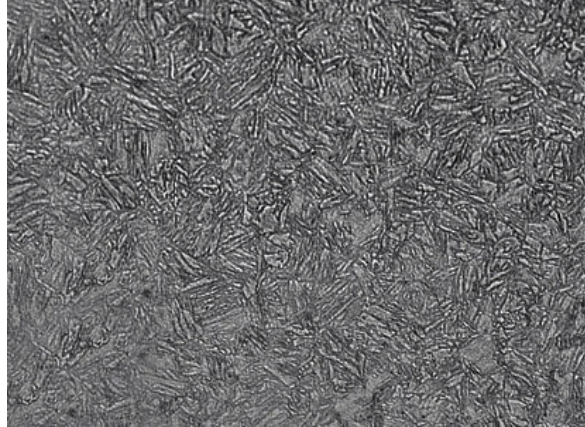


Figura 8. Microestructura de un acero MS comercializado por Mittal Steel (MARTINSITE® M130) según referencia [3]

Los aceros MS pueden contener pequeñas cantidades de ferrita y/o bainita y dentro de los aceros multifásicos muestran las resistencias máximas más elevadas, las cuales pueden ser de hasta 1700 MPa . Frecuentemente, también se someten a revenido para mejorar su ductilidad y puedan proporcionar adecuada formabilidad aún a elevadas resistencias.

Aceros de transformación inducida mediante maclaje (aceros TWIP)

Los dos principales siderurgistas suministradores de acero en la industria automotriz europea presentaron en el primer trimestre del año 2005 un acero totalmente austenítico con un contenido de manganeso en el rango de 17 al 24 % y carbono en el rango del 0.5 a 0.7% conociéndose de manera general como aceros TWIP (twinning induced plasticity) [8]

Como la solubilidad del carbono es mucho más alta en la austenita que en la ferrita puede usarse sin problemas tanto para estabilizar a la austenita como para endurecer a la matriz mediante solución sólida. Se optimiza la composición química para ofrecer la mejor formabilidad a cualquier nivel de resistencia

Una característica muy importante de los aceros TWIP es su modo de deformación: en forma adicional al mecanismo clásico de deslizamiento de dislocaciones, estos aceros también se deforman mediante el mecanismo de maclaje [9,10] como se muestra en la figura 9, Las fronteras de la macla se comportan como obstáculos al movimiento de las dislocaciones, de manera similar a los límites de grano. Mientras se deforma, la densidad de límites de macla se incrementa. El coeficiente de endurecimiento instantáneo n se mantiene a un nivel elevado ($n > 0.45$) y la estructura es más y más fina y consecuentemente la formación de cuello se relega a una mayor cantidad de deformación.

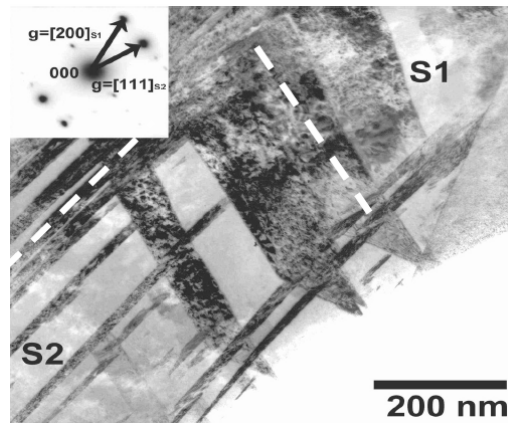


Figura 9. Micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) de una muestra de acero TWIP deformada a temperatura ambiente. Micromaclas aparecen oscuras y dos sistemas de maclaje (representadas con líneas de trazos cortos) según referencia [9]

Los aceros TWIP tienen una capacidad de alargamiento excepcional que puede, por ejemplo, alcanzar el 50% para una resistencia mecánica de 1000 MPa o incluso el 35% para 1400 MPa. Es la primera vez que un acero ofrece propiedades tan extremas. Este material está especialmente adaptado para aligerar las piezas de estructura automóvil y así contribuir a la reducción de los gases de efecto invernadero

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

Los aceros TWIP permitirán probablemente ganar más del 15% sobre el peso de funciones optimizadas más avanzadas en relación con la oferta actual de acero. Así para un refuerzo delantero, se puede contemplar una reducción de 2 a 4 kilos por vehículo [8]

Sistema de designación para los aceros AHSS

Es importante entender como se identifican estos nuevos aceros. Debido a que los métodos utilizados para la identificación de los aceros varían considerablemente en todo el mundo, la industria del acero en forma global, recomendó un sistema de clasificación que defina su resistencia a la fluencia y la resistencia máxima a la tensión para todos los grados del acero. Bajo esta nomenclatura, los aceros son identificados como “XX aaa/bbb,” donde:

XX = Tipo de acero

aaa = Resistencia a la fluencia mínima en MPa

bbb = resistencia máxima mínima en MPa.

Por ejemplo, en este sistema de clasificación, DP 500/800 se refiere a un acero de fase doble con una resistencia a la fluencia mínima de 500 MPa y de una resistencia máxima de al menos 800 Mpa. Versiones abreviadas de este sistema se enfocan en la resistencia máxima, por ejemplo – DP 800.

La Tabla 1 muestra las propiedades mecánicas típicas que ilustran el amplio rango de grados de los AHSS que pueden estar disponibles en el mercado hoy en día. Asegúrese de comunicarse directamente con las compañías acereras en forma individual para que pueda determinar:

- *Los rangos y las propiedades mecánicas:*
- *Capacidades en grosor y anchura;*
- *Disponibilidad de producto rolado en frío, rolado en caliente y según la disponibilidad de recubrimientos*
- *Especificaciones sobre la composición química.*
- *Marca específica que otorga el fabricante*

Tabla 1. Propiedades mecánicas típicas de los principales grados de acero AHSS

<i>GRADO DE ACERO</i>	<i>Resistencia a la fluencia (MPa)</i>	<i>Resistencia Máxima (MPa)</i>	<i>(%)De elongación</i>	<i>Coefficiente n</i>
<i>BH 210/340</i>	<i>210</i>	<i>340</i>	<i>34-39</i>	<i>0.18</i>
<i>BH 260/370</i>	<i>260</i>	<i>370</i>	<i>29-34</i>	<i>0.13</i>
<i>DP 280/600</i>	<i>280</i>	<i>600</i>	<i>30-34</i>	<i>0.21</i>
<i>DP 300/500</i>	<i>300</i>	<i>500</i>	<i>30-34</i>	<i>0.16</i>
<i>HSLA 350/450</i>	<i>350</i>	<i>450</i>	<i>23-27</i>	<i>0.14</i>
<i>DP 350/600</i>	<i>350</i>	<i>600</i>	<i>24-30</i>	<i>0.14</i>
<i>DP 400/700</i>	<i>400</i>	<i>700</i>	<i>19-25</i>	<i>0.14</i>
<i>TRIP 450/800</i>	<i>450</i>	<i>800</i>	<i>26-32</i>	<i>0.24</i>
<i>DP 500/800</i>	<i>500</i>	<i>800</i>	<i>14-20</i>	<i>0.14</i>
<i>CP 700/800</i>	<i>700</i>	<i>800</i>	<i>10-15</i>	<i>0.13</i>
<i>DP 700/1000</i>	<i>700</i>	<i>1000</i>	<i>12-17</i>	<i>0.09</i>
<i>Mart 950/1200</i>	<i>950</i>	<i>1200</i>	<i>5-7</i>	<i>0.07</i>
<i>Mart 1250/1520</i>	<i>1250</i>	<i>1520</i>	<i>4-6</i>	<i>0.065</i>
<i>X-IP™</i>	<i>599</i>	<i>1162</i>	<i>52.8</i>	<i>0.36</i>

X-IP™ es una marca depositada para un acero TWIP, propiedad conjunta de Arcelor y TKS

APLICACIONES

Los aceros avanzados de alta resistencia crean nuevas oportunidades para el diseño y la fabricación de componentes críticos, logrando que puedan soportar altas cargas y, a la vez, puedan ser producidos de una forma más simple y barata. Cambiar a aceros de alta

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

resistencia puede generar grandes ahorros en costes de producción, ofreciendo al diseñador la libertad de hacer componentes de un modo más sencillo y con menos refuerzos.

El uso de aceros de AHSS es muy diverso y se concentra en aplicaciones basadas en requerimientos funcionales como componentes estructurales que deben poseer la capacidad de absorber elevadas energías de impacto. También se incluyen aplicaciones externas en las que la apariencia se establece como parámetro característico.

A continuación se expone una clasificación de las diferentes aplicaciones de los aceros de última generación en los vehículos [11,12]:

Paneles interiores

La clave en la intensificación de esfuerzos por una sustitución de paneles interiores en aceros AHSS radica en las mejoras que ofrece en cuanto a reducción de peso y mantenimiento de la seguridad integral

Paneles externos.

Puertas, cofres, maleteros son elementos que pueden fabricarse con estos aceros según el proyecto ULSAB_ULSAC

Carrocería

Debido a la elevada resistencia que presentan estos aceros son empleados en componentes de la carrocería como barras de seguridad, bastidores y en general en cualquier componente que forme parte de la carrocería del vehículo. Pr ejemplo, el ahorro de peso estimado en un bastidor si se utilizan aceros AHSS respecto a si se hace de acero convencional es de 13%. En general, en la carrocería es donde se espera que estos aceros experimenten un crecimiento mayor en comparación con el aluminio, como la carrocería que se muestra en la figura 10



Figura 10. Carrocería para automóvil fabricada con diferentes grados de acero AHSS

CONCLUSIONES

- 1. Los fabricantes de acero han reconocido la competencia creciente del aluminio y materiales recientes como el magnesio y plásticos. Para permanecer en el mercado, su acero debe ser mas ligero, resistente y mas estable que los productos de sus competidores. La demanda de seguridad y estabilidad en colisiones también esta creciendo y esta posicionando a los aceros AHSS*
- 2. Los aceros AHSS presentan una resistencia máxima muy elevada lo cual permite un dimensionado menor para unos mismos requerimientos de seguridad, lo cual se traduce en una reducción del peso del componente a diseñar y el consiguiente ahorro de combustible.*
- 3. Debido a sus velocidades más altas de endurecimiento por deformación , los grados de AHSS, por lo general absorben mayores cantidades de energía en colisiones que la absorbida por aceros convencionales. Esto permite a los diseñadores de vehículos mantener o ampliar la resistencia al impacto en colisiones, reduciendo al mismo tiempo la masa del vehículo al disminuir el grado.*

BIBLIOGRAFÍA

1. *Schaeffler J. Daniel, Introduction to Advanced High Strength Steels Part I: Grade Overview Thefabricator.Com® August 9, 2005*
2. *Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines Version 3. International Iron and Steel Institute, Committee on Automotive Applications. September 2006*
3. *<http://www.mittalsteel.com/Products/Automotive+Applications/>*
4. *Woestmann, H. Moderne Stahlfeinbleche für den Automobilleichtbau "Aktueller Stand und Ausblick in die Zukunft" ThyssenKrupp Stahl AG Erfahrungsaustauschgruppe PZS-Werkzeuge Lüdenscheid, 18.04.2005*
5. *A. Konieczny, "Advanced High Strength Steels - Formability," Great Designs in Steel Seminar, American Iron and Steel Institute, February 2003*
6. *Centi Mirko – Saliceti Stefano Tampere Transformation Induced Plasticity (TRIP), Twinning Induced Plasticity (TWIP) and Dual-Phase (DP) Steels. Tampere University of Technology. Department of Materials Science*
7. *Pfestorf, Markus The application of multiphase steel in the Body-in-White BMW AG*
8. *ARCELOR Newsletter La actualidad del acero en el automóvil N° 10 - Junio 2005*

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

9. *P.Cugy, A. Hildebrand, M. Bouzekri, D.Cornette, S.Göklü Hoffmann. A super High Strnght Fe-Mn-C austenitic steel with excellent formability for automobile applications. Arcelor Research S.A y ThyssenKrupp Stahl AG*

10. *Smith, William F. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Mc. Graw Hill. Segunda edición. España.1992. Pag. 300*

11. *Informe Técnico sobre nuevos materiales aplicados a componentes del sector de la automoción. Fundación ASCAMM. Marzo 2003.*

12. *ARCELOR AUTO Newsletter La actualidad del acero en el automóvil N° 11 - Septiembre 2005*

13.*<http://www.steeluniversity.org/content/html/spa/default.asp?catid=139&pageid=208127>
1364*