

DESARROLLOS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Data de aceite: 01/07/2024

Luis Rodrigo Palomera Rodríguez

Gerente de Soporte Técnico México, Tata
Steel Nederland

José Guadalupe Ramírez Vieyra

Técnico Académico Titular A,
Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Facultad de Química, Universidad
Nacional Autónoma de México

RESUMEN: Se describe el desarrollo de aceros en las últimas 7 décadas (1950 - 2020) y su relación intrínseca con los requerimientos de la industria automotriz, discutiendo aceros al carbono (Mild), aceros resistentes a abolladuras (**Bake Harden**), microaleados (**High Strength Low Alloy**), doble fase (**Dual Phase**) y fase compleja/ multifase (**Complex Phase /Multi Phase**), aceros de plasticidad inducida por transformación (**TR**ansformation **I**nduced **P**lasticity), aceros de plasticidad inducida por maclado (**TW**inning **I**nduced **P**lasticity), para finalmente consolidarlos en un diagrama único (banana chart o diagrama de formabilidad). Se discuten brevemente los proyectos **ULSAB (U**ltra **L**ight **S**teel **A**uto**B**ody) y **FSV (F**uture **S**teel **V**ehicle), usando como punto de partida conocimientos básicos de propiedades mecánicas y su relación con el estampado,

ya sea como pieza terminada o como parte de un ensamble.

DISCLAIMER

El contenido de este texto es de autoría propia y se proporciona “tal cual” para fines informativos y educativos. El autor no garantiza la exactitud, integridad o utilidad de la información contenida en este documento. Cualquier acción que usted tome en base a la información presentada es bajo su propia responsabilidad. El autor no será responsable de ninguna pérdida o daño, incluyendo, sin limitación, pérdidas indirectas o consecuentes, o cualquier pérdida o daño que surja de la pérdida de datos o beneficios derivados del uso de este texto.

La reproducción, distribución, o uso de este texto, en parte o en su totalidad, está permitida siempre y cuando se otorgue el crédito adecuado al autor original. No se permite el uso comercial del contenido sin el permiso expreso del autor. Para consultas adicionales o permisos especiales, por favor, póngase en contacto con el autor.

DEFINICIONES

Aceros

Se define como acero cualquier aleación base hierro (Fe), con porcentajes desde un 70% [1] en un acero 316L (inoxidable austenítico) hasta un 99.99% [2] para aceros IF o ULC; los principales elementos aleantes son el carbono (C), el silicio (Si) y el manganeso (Mn). Existen otros elementos aleantes [3] de características especiales como el niobio (Nb/Cb), vanadio (V), titanio (Ti) o molibdeno (Mo), que cumplen con una función particular (refinamiento de grano, atrapamiento de especies libres, etc.) las cuales serán discutidas en la Sección 'Tipos de acero'.

La lámina de acero es muy versátil: tiene buena resistencia y alta rigidez a bajo costo, permitiendo altas velocidades de fabricación. Adicionalmente, tiene alta resistencia a la fatiga, buena resistencia a la corrosión (cuando tiene revestimiento), alta capacidad de absorción de energía, buen coeficiente de trabajo en frío y excelente pintabilidad, todas estas características requeridas en la industria automotriz [4].

Proceso productivo de aceros planos¹ [4], [5], [6], [7], [8]

El primer paso consiste en la reducción del mineral de hierro en arrabio, una aleación eutéctica Fe-C, el primer subproducto (considerado como materia prima) a la salida del alto horno.

El siguiente proceso es la conversión del arrabio en acero para la fabricación de planchones; posterior a la obtención de hierro líquido, se requiere la eliminación de impurezas en el convertidor básico de oxígeno (**BOF**, **B**asic **O**xxygen **F**urnace). En términos generales, se utiliza el oxígeno para convertir el hierro elemental en magnetita, junto con otras especies presentes en el baño metálico (como el Si o el Mn); asimismo, este proceso reduce el contenido de especies no deseables, como el azufre (**S**) o el fósforo (**P**).

El fósforo reacciona con el oxígeno que se inyecta y, dependiendo la basicidad del baño, este se distribuye en la escoria; por otro lado, el azufre reacciona con dos especies: el oxígeno para formar el óxido correspondiente y con el manganeso en el baño para formar un sulfuro que es parcialmente removido en la escoria.

Posteriormente, si el producto requerido es un acero IF (**I**nterstitial **F**ree) o un ULC (**U**ltra **L**ow **C**arbon), el baño caliente pasa por el proceso de desgasificado, que es un requerimiento para aplicaciones automotrices (el cual solicita contenidos de carbono de hasta 0.005%). Otro elemento a remover en este proceso es el hidrógeno: a contenidos mayores a 4 ppm puede generar fracturas en la orilla del planchón. Adicionalmente, altas concentraciones de otras especies (C, N) pueden causar problemas ya sea en la fabricación o en la aplicación del material.

¹ Nota: para una referencia visual del proceso productivo del acero, se recomienda al lector consultar la referencia [6].

El desgasificado utilizado para aceros automotrices es el proceso Ruhrstahl Heraeus (RH) [9], que ofrece varias ventajas:

- Ciclos cortos (aprox. 25 min)
- Contenido final de carbono de 0.002%
- No requiere remoción de escoria por 'decantado'
- Alta eficiencia para plantas de alto volumen

El proceso final es la colada continua, donde se vacía el metal líquido desde un distribuidor (**tundish**) a un molde rectangular, agitando el baño mediante campos magnéticos (**EMS, Electro Magnetic Stirrer**), para iniciar la solidificación con niebla + agua (**mist cooling**); de aquí obtenemos un planchón (o **slab**), el cual tiene un espesor habitual de alrededor de 250 mm.

El planchón puede venderse como producto terminado o pasar a posteriores reducciones: de aquí obtenemos el producto rolado en caliente (**Hot Rolled, HR**) y rolado en frío (**Cold Rolled, CR**) los cuales pueden o no llevar algún recubrimiento, ya sea base Zinc (GI, GA), base Al (Usibor ®²) para estampado en caliente o base Zn + Al + Mg (MagiZinc ®, POSMAC ®, Magnelis ®³, etc). A su vez, todos estos productos son utilizados como materia prima para procesos posteriores de estampado.

Microestructuras [10]

A presión atmosférica, existen 3 alótropos del hierro, que dependen de la temperatura: hierro alfa (α -Fe), hierro gamma (γ -Fe) y hierro delta (δ -Fe); estas fases son de suma importancia, ya que su estructura determina la solubilidad del carbono en la estructura cristalina, formando distintas microestructuras y, por consiguiente, diferentes tipos de acero (**Figura 1**).

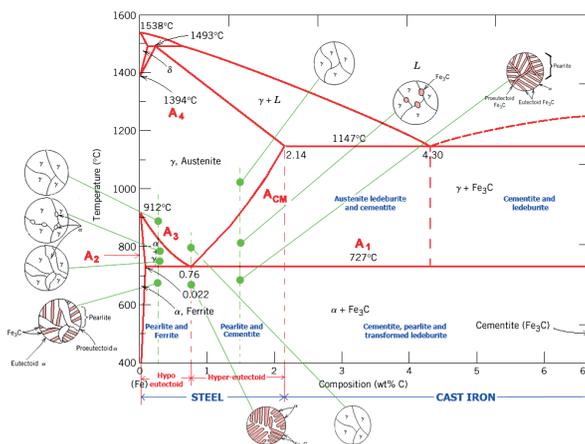


Figura 1. Diagrama Fe-C.

2 Usibor ® es un producto de Arcelor Mittal, diseñado específicamente para el estampado en caliente (**Hot Stamping**).
 3 MagiZinc ® es marca registrada de Tata Steel MLE, POSMAC ® es marca registrada de Posco, Magnelis ® es marca registrada de Arcelor Mittal.

Ferrita (α)

El α -Fe se refiere solo al alótropo de hierro, estable por debajo de los 912 °C; la ferrita es una solución sólida de uno o más elementos en α -Fe. De estructura bcc (**B**ody **C**entered **C**ubic), la solubilidad del carbono depende de la temperatura, alcanzando el máximo a 727 °C. La ferrita es una fase muy suave y dúctil, aunque pierde un poco su tenacidad abajo de una temperatura crítica; esta fase también es magnética a temperaturas abajo de los 768 °C

Austenita (γ)

La austenita es una solución sólida de carbono en γ -Fe, estable a partir de los 727 °C que, debido a su estructura fcc (**F**ace **C**entered **C**ubic), alcanza una solubilidad máxima del 2.14 %C a los 1147 °C. A temperatura ambiente, esta fase no es estable, se requiere modificar la composición química; existen algunos aceros inoxidables (base Cr-Ni) con base austenítica a temperatura ambiente, así como otras aleaciones (aceros Mangalloy) o aceros magnéticos base Fe-Ni. La austenita es una fase suave y dúctil, pero con alta respuesta al tratamiento térmico, lo cual la convierte en la 'fase madre' para los grados de acero que requieren una transformación microestructural; la austenita es no-magnética.

Ferrita delta (δ)

Esta microestructura (también fcc) no es observable de manera frecuente en productos planos, pero juega un papel importante en fundiciones de acero inoxidable austenítico, donde contribuye a evitar el fenómeno de fractura a alta temperatura (**hot cracking**).

Cementita

Es un compuesto intersticial metaestable de hierro y carbono, con fórmula Fe_3C y estructura cristalina ortorrómbica; contiene un 6.7 %C, aunque en ocasiones este átomo puede ir acompañado de otros elementos, como Mn o Cr.

La cementita es de alta dureza, aumentando la resistencia del acero, con un valor de 800 HV y hasta 1400 HV en carburos de alta aleación.

Perlita

Es una mezcla entre ferrita y cementita en un arreglo laminar (similar a una huella digital), la cual es formada durante la reacción eutectoide (reacción trifásica en la que un sólido, al enfriarse, se transforma en 2 sólidos adicionales, $S_1 \rightarrow S_2 + S_3$). Esta estructura puede modificarse, esferoidizado la cementita mediante tratamiento térmico, por consiguiente cambiando las propiedades mecánicas del acero (en general, baja la resistencia y aumenta la ductilidad); el cambio y su efecto final lo determina el %C del grado de acero bajo estudio.

Mecánicamente, la perlita tiene características intermedias entre la ferrita y la cementita; el refinado de la estructura laminar incrementa tanto la resistencia como la resiliencia (absorción de energía durante la deformación plástica). Dependiendo de la distancia interlaminar, la dureza de la perlita va desde 250 HV hasta 400 HV.

Bainita

La bainita es un microconstituyente metaestable de ferrita y cementita que se forma a temperaturas menores a las de formación de perlita. La apariencia de este microconstituyente al microscopio cambia con la temperatura de transformación: a altas temperaturas, tiene un aspecto de ‘plumas’, la cual es tradicionalmente conocida como bainita superior; en contraste, a bajas temperaturas el aspecto es ‘acicular’ (en forma de aguja), conocido también como bainita inferior.

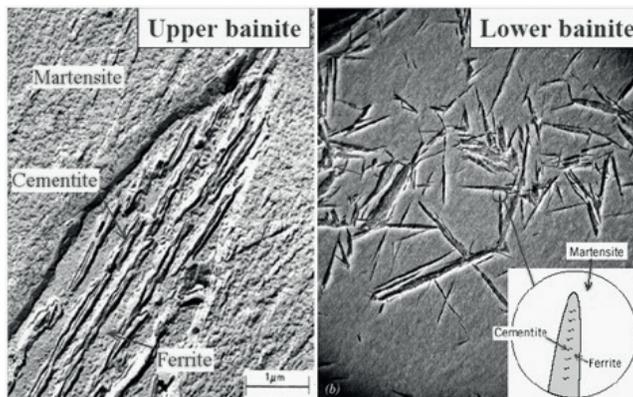


Figura 2. Bainita superior e inferior [10].

Martensita

La martensita se forma cuando la velocidad de enfriamiento de la austenita es suficientemente alta (en función de la sección transversal, la templabilidad y el medio de enfriamiento); los átomos de carbono ocupan los espacios intersticiales dentro de la estructura cristalina del hierro en una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (**B**ody **C**entered **T**etragonal), produciendo muy alta templabilidad e incrementando significativamente la fragilidad. El %C influye en su morfología: a bajos contenidos, se presenta la martensita de listón (lath), en contenidos más altos se presenta una estructura de tipo acicular/aguja (plate/ acicular martensite).

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO

La mayoría de las propiedades mecánicas del acero se obtienen a partir del estudio de la curva esfuerzo-deformación, realizando un ensayo de tracción a una probeta de geometría determinada. Como resultado del ensayo, se obtiene una curva similar a la mostrada en la Figura 3.

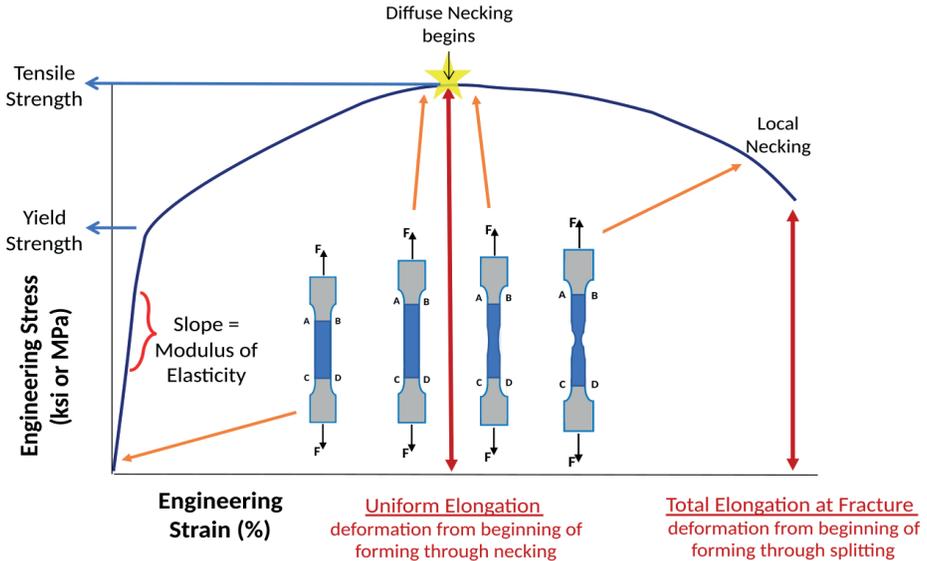


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación.

A partir de esta curva se definen varios valores:

Punto de fluencia/ Yield Strength (YP o $R_{p0.2}$)

Punto de transición entre la zona elástica y plástica de un material. Macroscópicamente, es el valor a partir del cual la deformación de un material se hace permanente, aun cuando se remueva la carga (por ejemplo, durante el estampado). En el caso de algunos aceros, se presenta un fenómeno llamado Fluencia Discontinua (YPE, **Yield Point Elongation**) [11], donde el valor puntual del YP se ve sustituido por un intervalo de valores entre un máximo (**Upper Yield Strength**) y un mínimo (**Lower Yield Strength**), como se muestra en la Figura 4.

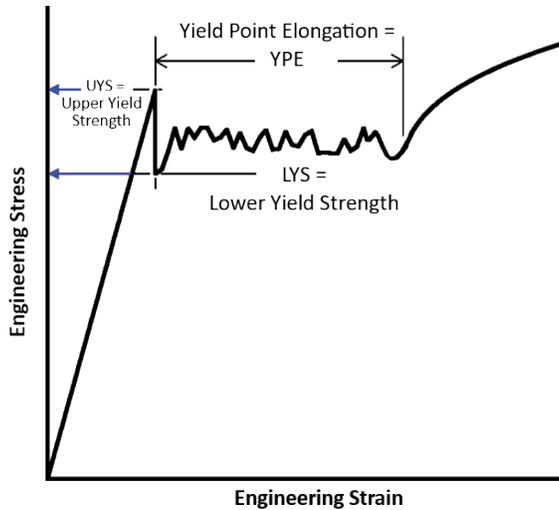


Figura 4. Fenómeno de Fluência Descontínua

Esfuerzo de tracción/ Tensile Strength (TS o R_m)

Se define como el esfuerzo máximo que soporta el material, a partir del cual el esfuerzo comienza a disminuir como resultado de la formación de una estricción o cuello que hace que el área transversal disminuya rápidamente y, finalmente, ocurra la fractura en esa zona (Figura 3). Dentro de un contexto metalmeccánico, esta fractura es en ocasiones deseada, por ejemplo, al cortar el material, ya sea como cinta o platina; o en la herramienta durante el proceso de estampado.

Elongación (%el uniforme y total)

Tomando como partida la Figura 3, se define como elongación uniforme el valor de deformación en la parte más alta de la curva; la elongación total es el valor a la fractura (punto final de la curva).

Coefficiente de trabajado en frío o valor n

Todos los metales endurecen cuando son deformados, lo que resulta en la forma parabólica tradicional de la curva esfuerzo-deformación, la cual se observa entre los valores de YP y TS.

Este comportamiento se puede aproximar con la ecuación de Hollomon:

$$\sigma = k\epsilon^n \quad \text{Ecuación (1)}$$

De esta ecuación se define el valor n , o coeficiente de trabajado en frío. Este parámetro adimensional se encuentra numéricamente entre 0 y 1.0, donde 0 representa un material perfectamente plástico y 1.0 representa un material perfectamente elástico; la mayoría de metales tienen valores de n entre 0.1 y 0.5.

Su efecto se puede visualizar comparando el desempeño del material en una sección estampada (deformada): sin trabajado en frío, esta zona adelgaza conforme el material se estira, aumentando el área de contacto; en contraste, con trabajado en frío ocurre lo contrario. El metal se fortalece en la zona con mayor deformación y así reduce la tendencia de adelgazamiento localizado.

Es importante mencionar que, aun cuando el YP, el TS, YP/TS y el %El son útiles para evaluar la formabilidad del material, el valor n y el espesor del material determinan la posición de la curva de formabilidad (FLC) en el diagrama de formabilidad⁴ (FLD) [12].

Valor r o coeficiente de Lankford

Este valor es una medida de la anisotropía del acero, definido como el cociente de la deformación en espesor entre la deformación en el ancho de la probeta:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \left\{ \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \right\} \quad \text{Ecuación (2)}$$

En el estampado, el incremento en valor r del material mejora su comportamiento en el embutido profundo (Figura 5, [13])

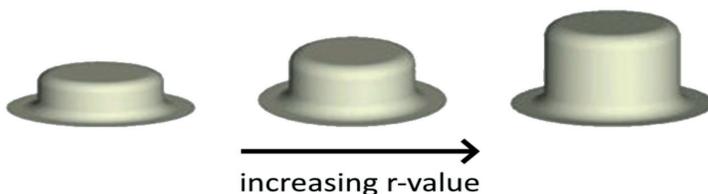


Figura 5. Influencia del valor r en el embutido profundo

Valor m [14]

El valor m se define de manera similar al valor n ; éste indica la sensibilidad del material a la velocidad de deformación,

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^n \cdot \epsilon^m \quad \text{Ecuación (3)}$$

⁴ Se recomienda al lector consultar la referencia [15] para una discusión a detalle de FLC y FLD

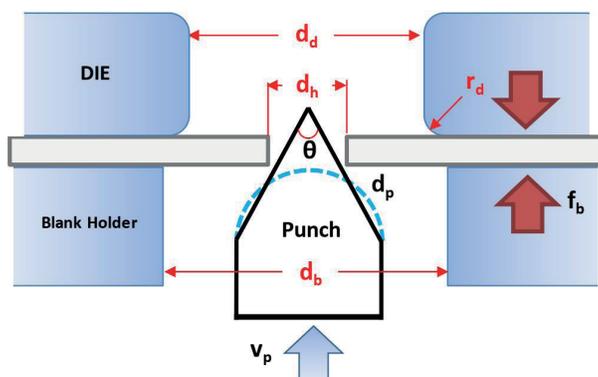
Experimentalmente, este valor se determina corriendo ensayos de tracción con velocidades de deformación desde 10^{-3} s^{-1} hasta 10^3 s^{-1} . Como referencia, la velocidad aproximada durante un proceso de estampado es de 10 s^{-1} ; de aquí, es natural observar un incremento en YP y TS de entre 15 - 20 MPa.

Este valor toma relevancia en pruebas de desempeño durante el impacto.

Valor λ o HEC (Hole Expansion Coefficient) [16], [17], [18]

Este valor determina experimentalmente la ductilidad de borde en un material estampado (Figura 6, [17]); particularmente en AHSS, uno de los principales retos es evitar las grietas de borde, donde la calidad de corte es un punto de control esencial (Figura 7, [18]). El cálculo del mismo es relativamente simple:

$$HEC = \frac{d}{d_h} - 1 \quad \text{Ecuación (4)}$$



- v_p =punch velocity f_b =blankholder force
- θ =punch angle (conical) d_d =diameter of the die
- d_b =diameter of blankholder r_d =die radius
- d_h =diameter of pierced hole in the blank
- d_p =punch diameter (hemispherical)

Figura 6. Arreglo experimental para la medición de HEC [17]

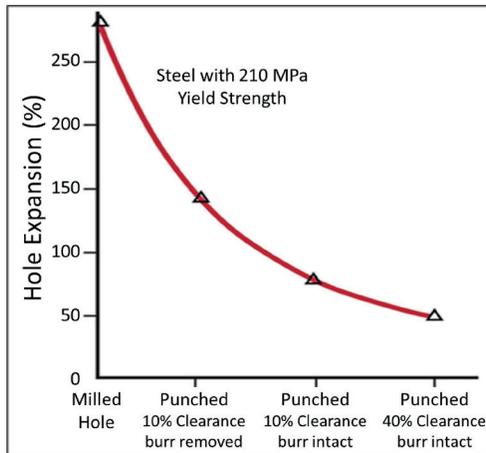


Figura 7. Influência de la calidad de corte en el valor HEC [18]

De esta breve explicación, se puede concluir que las propiedades mecánicas del material tienen marcada influencia durante su uso en la producción de partes terminadas, dependiendo no solo del grado de acero sino también de las condiciones de proceso; En la Tabla 1 se resume la influencia de las propiedades mecánicas en los tipos de estampado.

Tipo de estampado ⁵	TS	%EI	n	r	λ
Deep Draw			↑↑	↑↑↑	
Stretch form	↑	↑↑	↑↑↑	↑	
Stretch flange	↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑↑
Bending	↑	↑↑	↑		↑↑

Tabla 1. Influencia de las propiedades mecánicas en el tipo de estampado⁶

TIPOS DE ACERO

En general, la industria automotriz clasifica los aceros según su microestructura; a continuación se ofrece un breve resumen de los tipos más utilizados.

⁵ Un mayor detalle de las operaciones de estampado se puede consultar en la referencia [21].

⁶ Leyenda: el número de flechas (↑) es relativo al nivel de influencia.

Acero al carbón (mild steel) [19]

Cuentan con una cantidad limitada de elementos aleantes, tienen un YP relativamente bajo (<270MPa) y contenidos de carbono menores al 0.1%. Con una microestructura predominante de ferrita, en ocasiones se cuenta con perlita también, dependiendo siempre de la cantidad de carbono: a más %C, mayor cantidad de este microconstituyente. Los aceros ULC (**Ultra Low Carbon**) también se consideran dentro de esta clasificación, con valores bajos de YP y alta ductilidad.

Existen varias especificaciones para cada armadora/OEM (**Original Equipment Manufacturer**) con características específicas; Algunos ejemplos, con el material típicamente clasificado en orden incremental de YP, son :

- ASTM 1008M: CS, DS, DDS, EDSS
- EN 10130: DC01, DC03, DC04, DC05, DC06
- VDA 239-100: CR1, CR2, CR3, CR4, CR5

Aceros Bake Hardening [20]

Aceros de alta resistencia que presentan un incremento en el YP al ser estampados a temperatura ambiente y sometidos posteriormente a un ciclo térmico similar a la ventana de curado de pintura automotriz, aproximadamente 170 °C durante 20 min.

Estos aceros tienen un rango de YP de 180 a 300MPa al embarque; los valores más bajos suelen ser utilizados para aplicaciones expuestas (páneles exteriores, de vista en el vehículo) y en áreas que requieren resistencia a la abolladura. El incremento observado después del ciclo térmico suele ser de +30 MPa en YP.

Algunos ejemplos de estos aceros son:

- ASTM 1008M: BHS 26, BHS 31, BHS 35, BHS 41, BHS 44
- EN 10268: HC180B, HC220B, HC260B
- VDA 239-100: CR180BH, CR210BH, CR240BH, CR270BH

Aceros HSLA (High Strength Low Alloy) [22]

En contraste con aceros al manganeso u otros aleados con Cr (que incrementan el costo base del material), los aceros microaleados o HSLA contienen cantidades pequeñas (0.05% a 0.1%) de elementos como V, Mo y Nb. Los grados actuales llegan a niveles de YP >800MPa, utilizando mecanismos de precipitación de carburos en borde de grano, incremento de resistencia por mecanismos intersticiales y sustitucionales y refinamiento de grano.

Algunas normas que describen estos aceros son:

- ASTM A1008M: HSLAS 45, 50, 55, 60, 65, 70
- EN 10268: HC260LA, HC300LA, HC340LA, HC380LA, HC420LA, HC500LA
- VDA 239-100: CR210LA, CR240LA, CR300LA, CR340LA, CR380LA, CR420LA

Aceros Doble Fase (Dual Phase) [23]

Estos aceros se caracterizan por una microestructura primordialmente formada por ferrita y martensita, de ahí su denominación. La fase ferrítica funge como matriz, dando buena ductilidad a este tipo de aceros, comparados con un HSLA por ejemplo.

En estos grados, existe una diferencia relevante entre las composiciones químicas para HR y CR: dado que el material rolado en caliente no cuenta con un proceso posterior de recocido, la microestructura apropiada se logra mediante enfriamiento controlado en la mesa (**Run Out Table**) a la salida de los bancos de reducción del molino y antes del enrollado. Este nivel de control requiere mayor cantidad de elementos aleantes, lo cual necesariamente impacta en los métodos de soldadura durante procesos posteriores.

Los aceros DP de primera generación son descritos por varias normas, algunos ejemplos son:

- ASTM A1088: DP 440T/250Y, 490T/290Y, 590T/340Y, 780T/420Y, 980T/550Y
- EN 10338: HCT450X, HCT490X, HCT590X, HCT780X, HCT980X, HCT1180X
- VDA 239-100: CR330Y590T-DP, CR440Y780T-DP, CR590Y980T-DP

Aceros Fase Compleja o Multifase (Complex Phase, MultiPhase) [24]

Los aceros multifase combinan alta resistencia con una ductilidad mayor a la de un HSLA del mismo YP. Como el nombre lo indica, estos materiales contienen varias fases y microconstituyentes, entre ellas martensita, austenita retenida y perlita en una matriz de ferrita/bainita. El contenido de Ti y Nb, junto con un ciclo térmico que promueve la precipitación de carburos y nitruros, generan una refinación de grano muy alta.

Los aceros DP y TRIP no usan la precipitación en borde de grano como un mecanismo para incrementar la resistencia, por lo que la fase ferrítica presente en su microestructura suele ser suave y dúctil; en contraste, en los aceros CP/MP la precipitación de carburo y nitruros fortalecen la ferrita.

Este comportamiento explica por qué el YP suele ser mayor en un CP/MP cuando se compara contra un DP con el mismo valor de TS.

Algunos ejemplos:

- ASTM A1088: CP600T/350Y, 780T/500Y, 980T/700Y
- EN 10338: HCT600C, HCT780C, HCT980C
- VDA 239-100: CR570Y780T-CP, CR780Y980T-CP, CR900Y1180T-CP

ACEROS TRIP/TWIP (Transformation Induced Plasticity/ Twinning Induced Plasticity) [25], [26]

La microestructura de un acero TRIP cuenta con una matriz ferrítica, con austenita retenida, martensita y bainita; todas estas fases y microconstituyentes se encuentran en cantidades específicas para cada grado. Durante la deformación, las fases secundarias dispersas en la ferrita suelen ser más duras, creando un alto coeficiente de trabajado en frío, comportamiento análogo al de un acero DP. Adicionalmente, la austenita retenida en la microestructura se transforma progresivamente en martensita, incrementando aún más este valor: este efecto es el que da el nombre al material (**TRIP effect**). Desde el punto de vista químico, se necesitan valores más altos de carbono para poder estabilizar la austenita; valores más altos de Si y Al aceleran la formación de la matriz ferrita/bainita, auxiliando en mantener la concentración necesaria de carbono libre para fomentar la existencia de austenita.

Los aceros TWIP tienen la mejor combinación entre resistencia (hasta 1400 MPa) y elongación (hasta 55%). Con un contenido de entre 12% y 30% de Mn, la microestructura es austenítica a temperatura ambiente; otros elementos aleantes son el Si (<3%), Al (<3%) y C (<1%).

El nombre del material viene por el fenómeno de maclado o twinning, lo que genera refinación microestructural, aumentando el valor n del material. Para entender las prestaciones de este tipo de aceros, se puede hacer una comparativa con materiales Intersticial Free o **ULC** (anteriormente descritos): tradicionalmente considerados los aceros más formables, tienen un rango de valores de 150 MPa en YP, 300 MPa en TS, 22-25 % E_{u} y 45-50 % E_{total} . En contraste, un acero TWIP está en un rango de 500 MPa YP, 1000 MPa TS, 55% E_{u} y 60 % E_{total} .

Estos grados se han adoptado en cantidades limitadas: un ejemplo reciente es el cambio del ensamble de la defensa del Fiat Panda 2011, donde sustituyó a un acero de estampado caliente + DP600 de 1.5mm por un TWIP 1000 de 1.4mm, generando una reducción de peso del 28% y una reducción de costo del 22%.

La asociación World AutoSteel representa la mayoría de grados (e indirectamente, la historia del acero) en un diagrama global de formabilidad, o GFD (**G**lobal **F**ormability **D**igram, Figura 8); asimismo, indica las áreas actuales de desarrollo para nuevos aceros.

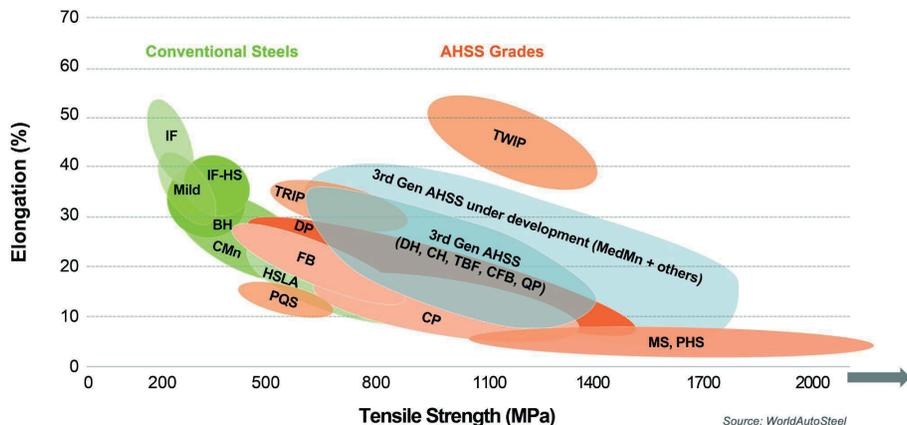


Figura 8. Diagrama Global de Formabilidad (cortesía de World AutoSteel)

PROYECTOS INTERDISCIPLINARIOS

ULSAB - Ultra Light Steel Auto Body (1995 - 1998) [27]

ULSAB fue un proyecto multicompañía organizado por el **American Iron and Steel Institute (AISI)**, con la participación de 35 acereras a nivel mundial, junto con **Porsche Engineering Services**; tuvo como objetivo demostrar la capacidad del acero de reducir el peso de la carrocería (BIW, **Body In White**) y, al mismo tiempo, garantizar la seguridad, incrementando el confort y la experiencia de manejo, a un precio razonable⁷, Figura 9.

El proyecto inició con una comparativa (benchmarking) entre sedanes medianos de varias marcas a nivel mundial. Después de consultar con expertos en manufactura, diseño y selección de materiales, PES desarrolló objetivos de reducción de masa y desempeño. En Sept. 1995 se anuncian los resultados de la Fase 1 (Concepto), con un potencial 36% de ahorro en masa y una marcada mejora en el rendimiento, comparado con los vehículos disponibles en el mercado de aquel entonces.

Durante la Fase 2 (Validación), se refinó la ingeniería y el diseño de la estructura ULSAB, junto con la aprobación de un presupuesto de US \$20 M para iniciar la Fase 3 (Construcción).

En marzo de 1998, los resultados de esta última fase se anuncian a nivel mundial:

- Peso total del BIW de 203 kg, 25% menor contra vehículos de mercado
- Incremento del 80% en rigidez torsional
- Incremento del 52% en rigidez de flexión
- Incremento del 58% en primer modo de flexión⁸

⁷ Se recomienda al lector consultar el 'Ultra Light Steel Autobody Final Report' disponible en <https://www.sae.org/>

⁸ **First bending mode**: se define como la frecuencia más baja a la cual se presenta deformación en una estructura

Pruebas adicionales muestran que esta estructura cumple con los requerimientos de seguridad de impacto a velocidades aún mayores a las requeridas en algunas pruebas, todo esto sin un incremento de costo.

Este proyecto requirió el diseño de procesos de manufactura considerados únicos en aquel entonces, todos ellos patentables. Se decide que los resultados del proyecto, así como las tecnologías desarrolladas durante el mismo, sean de libre uso para los participantes y para el público en general, clasificando la información de libre acceso.



Figura 9. BIW obtenido como resultado del proyecto ULSAB

FSV - Future Steel Vehicle (2010 - 2103) [28]

FSV tuvo como objetivo crear diseños completos para vehículos con tren motriz eléctrico, priorizando la reducción de emisión de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de vida del vehículo⁹, Figura 10.

Con una duración de tres años, Se obtuvieron los siguientes siete logros clave:

- Se optimiza el uso del acero dentro del BIW usando simulaciones para determinar el grado y espesor ideales en la estructura. Por consiguiente, los vehículos diseñados son ligeros y de alta eficiencia.
- Se logra una reducción en masa del BIW del 35% comparado con vehículos clase A (mini) y clase B (pequeños)¹⁰; de 290 kg en un vehículo de mercado, se obtuvo una estructura de 230 kg.
- Se usa un 97% de aceros clasificados como HSS y UHSS (**H**igh y **U**ltra **H**igh **S**trength **S**teel), dentro de los que se incluyen grados DP, CP, TRIP, TWIP y martensíticos; dentro de la selección de material se incluyen 20 grados nuevos de acero; estos fueron puestos disponibles comercialmente a partir del 2015 y hasta el 2020.

⁹ Se recomienda al lector consultar el sitio web para mas detalle <https://www.worldautosteel.org/downloads/futuresteel-vehicle-results-and-reports/>

¹⁰ Una clasificación general de vehículos por tamaño se encuentra en https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_size_class

- La estructura incluye el uso de aceros de TS > 1.0GPa (TRIP, TWIP, CP) y formados en caliente, todas tecnologías de punta en aquel entonces. Estos grados responden al requerimiento de la industria de aceros (alta resistencia + alta formabilidad), para cumplir requerimientos de seguridad cada vez más severos.
- Este proyecto, al ser evaluado durante pruebas de impacto, logra una calificación de 5/5 estrellas según EuroNCAP, sobrepasando el requerimiento de mercado.
- El uso de aceros AHSS y un tren motriz eléctrico reduce las emisiones de gases de invernadero en un 56%. En regiones con red eléctrica más eficiente, como Europa, la reducción llega al 70%.
- Estas reducciones de masa y emisiones **no** afectan el costo de producción: el costo estimado de la estructura es de US\$1,115.



Figura 10. Render final del proyecto FSV

REFERENCIAS

1. ThyssenKrupp UK. (n.d.). *Stainless Steel 316L - 1.4404 Data Sheet*. thyssenkrupp Materials (UK). Consultado el 1 de Junio de 2022. <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316l-14404.html>.
2. World AutoSteel. (n.d.). *Ultra-Low Carbon (DDS – EDDS) - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 1 de Junio de 2022. <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/lower-strength-steels/ultra-low-carbon-dds-edds-2/>.
3. World AutoSteel. (n.d.). *High Strength Low Alloy Steel - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 1 de Junio de 2022. <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/high-strength-low-alloy-steel/>.
4. Palomera, L. R. (2016). *Estudio de formabilidad en aceros planos*. <http://132.248.9.195/ptd2016/septiembre/0750396/Index.html>.
5. Hosford, W. (2011). *Metal Forming, Metallics and Metallurgy*. Cambridge University Press.
6. AIST. (2015). *Association for Iron and Steel Technology*. AIST Steel Wheel. Consultado el 8 de Junio de 2022, <http://apps.aist.org/SteelWheel/index.html>.

7. Nippon Steel. (n.d.). *Manufacturing Process | Steel sheets | Products | Nippon Steel Corporation*. www.nipponsteel.com. Consultado el 6 de Junio, 2024, de <https://www.nipponsteel.com/en/product/sheet/process/>.
8. Sarna, K. (n.d.). *Ispat Guru*. Consultado el 8 de Junio, 2022, de <http://ispatguru.com>.
9. Second Wiki. (n.d.). *Ruhrstahl-Heraeus process*. Second.wiki. Consultado el 8 de Junio de 2022, <https://second.wiki/wiki/ruhrstahl-heraeus-verfahren>.
10. Sarna, S. (2014, March 20). *Microstructures of Iron and Steels – IspatGuru*. Consultado el 13 de Junio de 2022, <https://www.ispatguru.com/microstructures-of-iron-and-steels/>.
11. Instron. (n.d.). *Yield Point Elongation*. Instron. Consultado el 13 de Junio de 2022, <https://www.instron.com/en/our-company/library/glossary/y/yield-point-elongation>.
12. World AutoSteel. (n.d.). *N-Value - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 13 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/n-value/>.
13. World AutoSteel. (n.d.). *R-Value - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, de <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/r-value/>.
14. World AutoSteel. (n.d.). *M-Value - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/strain-rate/>.
15. World AutoSteel. (n.d.). *Forming Limit Curves (FLC) - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/formability/forming-limit-curves-flc/>.
16. ZwickRoell. (n.d.). *Hole expansion test*. ZwickRoell. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/sheet-metal-forming/hole-expansion-test/>.
17. Altan, T. (n.d.). *Schematics of Hole Expansion Test* [Cross section view of HEC testing including jig] [Image]. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/hole-expansion-testing/>.
18. World AutoSteel. (n.d.). *Hole Expansion Testing - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/hole-expansion-testing/>.
19. World AutoSteel. (n.d.). *Mild Steels - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/lower-strength-steels/mild-steels/>.
20. World AutoSteel. (n.d.). *Bake Hardenable - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/bake-hardenable-steel/>.
21. Schuler GmbH. (1998). *Metal Forming Handbook* (H. Hoffman & Schuler GmbH., Eds.). Springer-Verlag.
22. World AutoSteel. (n.d.). *High Strength Low Alloy Steel - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 1 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/high-strength-low-alloy-steel/>.

23. World AutoSteel. (n.d.). *Dual Phase - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>.
24. World AutoSteel. (n.d.). *Complex Phase - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel/>.
25. World AutoSteel. (n.d.). *Transformation Induced Plasticity (TRIP) - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/>.
26. World AutoSteel. (n.d.). *Twinning Induced Plasticity - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/>.
27. World AutoSteel. (n.d.). *ULSAB*. WorldAutoSteel. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/>.
28. World AutoSteel. (n.d.). *FutureSteelVehicle*. WorldAutoSteel. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/>.