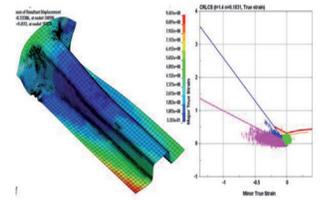


Aceros avanzados: comparación del comportamiento mecánico en el estampado de un travesaño de automóvil



AHSS: A comparison of the mechanical behavior of an automobile floor crossbar during sheet metal forming



Eduardo Aguilera-Gómez, Elías Rigoberto Ledesma-Orozco, Héctor Plascencia-Mora, Pedro Alberto Pérez-Olivas, Juan Francisco Reveles-Arredondo, Ismael Ruiz-López

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8. - 36885 Comunidad de Palo Blanco. Salamanca (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7087> | Recibido: 27/01/2015 • Aceptado: 17/10/2015

ABSTRACT

- One of the fundamental objectives of the automotive industry today is the fuel economy; therefore, reducing vehicle weight has been pushed to the limit especially in the new body designs, without neglecting the passengers passive safety that these structures should provide. Thus, the achievement of these goals is only possible through the implementation of advanced high strength materials along with new design techniques and their associated manufacturing processes. In this investigation, a study of the implementation of three steels, categorized by the AISI, as advanced high strength steels (AHSS) in the manufacture of a cross bar is done. The results obtained are compared each other and with similarly obtained results considering a conventional high-strength steel (CHSS) possessing superior forming properties, but lower resistance properties regarding AHSS considered in this study. To this goal the foundation of the simulation process all necessary operations are presented to perform the sheet forming of a cross car for commercial vehicle floor and a comparative performance takes place between the four selected steels. A safety factor regarding the FLD curve is proposed. The use of appropriate material models of deformation processes involved in forming sheet and the correct definition of the mechanical properties associated with them are essential.
- **Key Words:** AHSS, CHSS, AISI, Stamping, Sheet.

RESUMEN

Uno de los objetivos fundamentales de la industria automotriz hoy en día es el ahorro de combustible; por lo tanto, la reducción de peso vehicular se ha llevado al límite especialmente en los nuevos diseños de carrocerías, sin descuidar la seguridad pasiva que estas estructuras deben ofrecer a los pasajeros. Así pues, el cumplimiento de estos objetivos solamente es posible mediante la aplicación de materiales avanzados de alta resistencia, junto con nuevas técnicas de diseño y sus procesos de manufactura asociados.

En esta investigación se presenta un estudio de la aplicación de tres aceros, clasificados por la AISI como avanzados de alta resistencia (AHSS), en la fabricación de un travesaño de automóvil. Los resultados obtenidos se comparan entre sí junto con resultados obtenidos de manera análoga considerando un acero convencio-

nal de alta resistencia (CHSS) que posee propiedades superiores de conformado pero propiedades inferiores de resistencia respecto a los AHSS considerados en este estudio. Para tal fin se presentan las bases del proceso de simulación de todas las operaciones necesarias para llevar a cabo el conformado en chapa de un travesaño para piso de vehículo comercial y se realiza un comparativo del desempeño durante el proceso, de los cuatro aceros seleccionados. También se propone un factor de seguridad respecto a la curva FLD.

El uso de modelos de material apropiados para los procesos de deformación implicados en el conformado de chapa o lámina y la correcta definición de las propiedades mecánicas asociadas a estos resultan fundamentales.

Palabras Clave: AHSS, CHSS, AISI, Conformado, Chapa, Lámina.

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de la investigación científica y tecnológica de la industria automotriz se concentra en el desarrollo de nuevos materiales, que incluyan algunas ventajas con respecto a los ya existentes, como son, buenas propiedades de conformado, principalmente embutido; al mismo tiempo que se aumenten las resistencias bajo condiciones de carga estática, dinámica y de fatiga. Los aceros denominados TRIP (Transformación Inducida mediante Plasticidad) y los aceros DP (Doble Fase), son aceros que ofrecen una alta resistencia en las condiciones mencionadas, mientras mantienen un alto nivel de ductilidad. [1]

A lo largo del siglo XX la demanda de materiales por parte de los principales sectores industriales, como son: el aeroespacial, automotriz, militar y el de electrodomésticos entre otros, ha sido el principal motor para la investigación y el desarrollo de los materiales metálicos. La mayor parte de los materiales metálicos de carácter avanzado han surgido como respuesta directa a las de nuevas prestaciones demandadas por la industria; por un lado, como materia prima y por otro como producto terminado. Las propiedades que como producto terminado interesan, son generalmente propiedades mecánicas masivas (rigidez, módulo de elasticidad, resistencia mecánica, tenacidad, comportamiento a fatiga, resistencia a fluencia, etc.) y de superficie (comportamiento frente a la oxidación, corrosión, fricción, desgaste, etc.). Por lo que respecta al hierro, en el ámbito de los materiales estructurales, los nuevos aceros y los aceros avanzados se han originado, sobre todo, por exigencias de la industria del transporte terrestre (automotriz y ferrocarril), naval, aeronáutico y aeroespacial, entre otras. [2]

Particularmente, para obtener por conformado de chapa partes de carrocería con buena calidad superficial y regularidad de espesor, se requieren un conjunto de propiedades en la materia prima, tales como: bajos valores del límite elástico, altos valores de los coeficientes de anisotropía plástica o *coeficientes de Lankford*, bajos valores de anisotropía plana (para embutibilidad), altos valores de coeficiente de endurecimiento por deformación o valor "n", altos valores del alargamiento uniforme determinado en la curva real de esfuerzos deformaciones (para tracción), altos valores del alargamiento total a fractura (para ductilidad) y resistencia al envejecimiento, las cuales son propiedades asociadas con materiales metálicos laminados que presentan un buen comportamiento durante los procesos de estampado como los AHSS (Aceros Avanzados de Alta Resistencia). [3]

Un proceso de conformado fiable sólo se puede lograr con la predicción de las deformaciones de la pieza durante la fase de diseño de los herramientas. Aunque en la actualidad existen modelos de materiales complejos que fueron desarrollados y aplicados en los paquetes de elementos finitos, se ha observado que estas predicciones podrían no ser satisfactorias en cuanto a forma para algunas partes industriales fabricados con AHSS al presentarse una posible falla en el material de trabajo. [4]

Los primeros intentos de solución para el problema de conformado de chapa metálica, datan de la década de los 60s, en donde se utilizaron aproximaciones numéricas a través del método de diferencias finitas. Un ejemplo típico en donde se emplea esta metodología en el proceso de conformación se aprecia en la Figura 1. [5]

El verdadero avance de la aproximación numérica en los procesos de conformado de chapa metálica fue posible a través de la aplicación del método del elemento finito (MEF). Los estudios pioneros fueron realizados por Gotoh e Ishise [6], así como Wang y Budiansky [7]. En el primer estudio se utilizó un modelo de material elasto-plástico, mientras que en el segundo se empleó un modelo rígido-plástico. Los avances en la simulación mediante el MEF en el conformado de chapa metálica se dieron aproximadamente 5 o 6 años más tarde que el conformado volumétrico. Esto es debido a las diferencias básicas entre dichos procesos, como la geometría. En el caso de la hoja de metal que será conformada para formar la pieza de trabajo, la relación de superficie a volumen es grande, caso distinto ocurre en el conformado volumétrico. Esta es la razón básica para la utilización de elementos de membrana o cascarón (elementos *shell*) en la simulación de chapa metálica mediante el MEF [5].

En esta investigación, se realiza la simulación de un componente automotriz empleando el *software LsDyna*, utilizando

cuatro aceros diferentes, dicha simulación tiene como fin llevar a cabo un análisis comparativo del comportamiento de tres de los parámetros más importantes en el proceso de estampado de chapa metálica: porcentaje de adelgazamiento, recuperación elástica (*springback*) y estampabilidad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES Y PROPIEDADES

Los aceros AHSS son aceros multifase que conjugan su capacidad de resistencia combinada con una buena ductilidad, a diferencia de los aceros convencionales [8] (Figura 2).

Para una mejor aplicación en los componentes de carrocerías de automóviles, es necesario comprender las propiedades de particular interés. En este trabajo, se determinaron las propiedades involucradas para llevar a cabo un análisis mediante el MEF, considerando la información que el modelo de material solicite para dicho análisis.

La investigación implica el análisis de cuatro aceros, un acero de alta resistencia convencional y de alta embutibilidad denominado Acero C-Mn 440 y tres aceros avanzados de alta resistencia: Acero DP-590, Acero TRIP-780 y un Acero TRIP-590.

En todas las simulaciones son necesarias algunas de las propiedades mecánicas del material utilizado. Tal es el caso del modelo de material empleado en este proyecto denominado HILL48 dentro del *software LsDyna*. Dichas propiedades se muestran en la Tabla 1.

El modelo de material HILL48 también requiere la curva de variación del esfuerzo de cedencia debido al endurecimiento por deformación (Figura 3), esta curva es igual a la curva esfuerzo-deformación del material en su zona plástica.

Las propiedades del acero C-Mn440 [8] y del DP 590 [9] se determinaron de pruebas experimentales con equipo de la empresa PEMSA, mientras que las propiedades para los aceros TRIP 590 y TRIP 780 se obtuvieron de [10]. Para estos últimos dos tipos de aceros, se consideró un coeficiente de anisotropía de *Lankford* promedio (valor para r), debido a que no se cuenta con los valores específicos para cada dirección de rolo.

2.2. MÉTODOS

Para tener una mejor idea del comportamiento de la chapa durante el proceso de estampado, se inicia con la puesta a punto del modelo (mallado, declaración de materiales, etc.) y análisis de resultados, se llevaron a cabo en el *software LS-PrePost 4.0* de *LsDyna*. Para modelar la simulación de cada una de las etapas del proceso, se utilizó el módulo para formado de chapa que está incluido en el mismo programa. Este módulo utiliza la fase de solución de *LS-Dyna*, pero contiene herramientas que facilitan el desarrollo de simulaciones para procesos tales como: estampado,

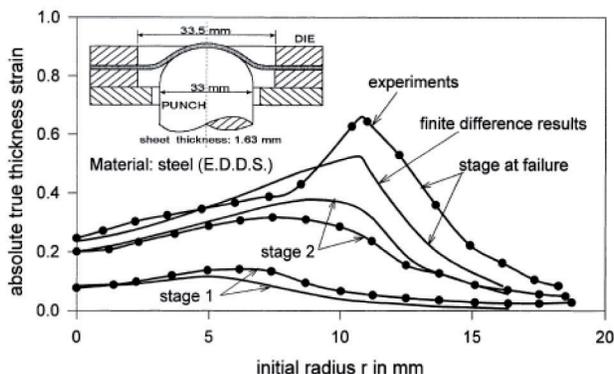


Fig. 1: Esfuerzos generados en el espesor de una chapa o lámina de acero durante el proceso de formado, empleando un modelo rígido-plástico, mediante el método de Diferencias Finitas. [5]

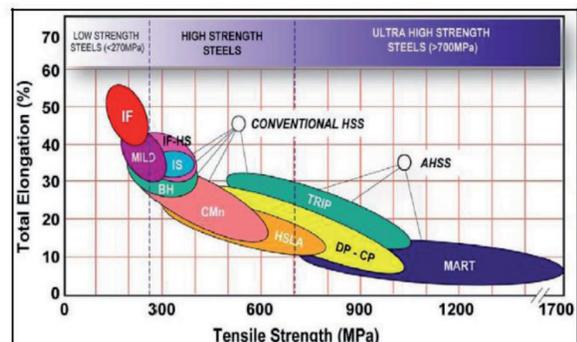


Fig. 2: Categorías de los aceros para procesos de estampado en frío de acuerdo a la American Iron and Steel Institute (AISI)

doblado, corte, recuperación elástica (*springback*), etc. Una ventaja de usar este módulo, es que resulta relativamente sencillo incluir un proceso de remallado, ya que permite que los elementos deformados considerablemente puedan subdividirse en nuevos elementos y así evitar la formación de elementos con modos de deformación extrema y "ruptura" de malla.

Las operaciones necesarias para obtener la pieza en estudio son tres:

- Operación 10. Primera estación de estampado.
- Operación 20. Segunda estación de estampado.
- Operación 30. Operación de corte para obtener la forma final de la pieza.

Además de obtener las simulaciones de cada una de estas etapas conviene también analizar el "springback" resultante de cada operación, siendo el más importante el que se presenta en la pieza final una vez cortada.

El proceso para la simulación de todas las operaciones presenta un reto importante, ya que es necesario realizar la simulación de la Operación 10 que incluye un análisis del efecto de la gravedad, y así obtener de ella la lámina deformada junto con sus esfuerzos y deformaciones residuales para exportarlos a la simulación de la

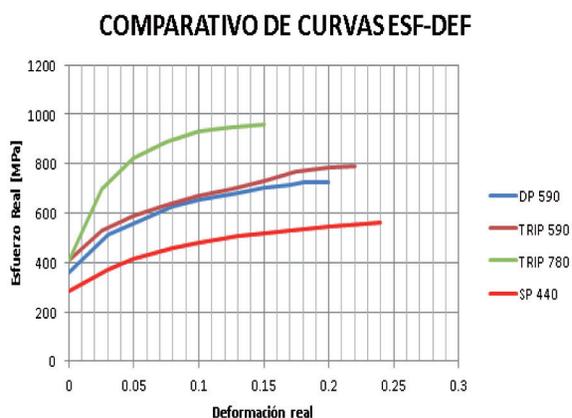


Fig. 3: Curva esfuerzo-deformación en la zona plástica para los cuatro materiales

Operación 20. Finalmente, la chapa obtenida se debe cortar para obtener su forma final en la operación 30.

En todas las simulaciones, el modelo de elemento finito se presenta solo con las superficies de interés y se omiten detalles de las geometrías sólidas como barrenos, chaflanes y redondeos, siempre y cuando no afecten a la simulación. Aunque el modelo no es simétrico, se consideró de este modo, para reducir el tiempo de cómputo, tomándose la sección que presenta deformaciones más severas en la chapa.

El modelo de material utilizado es el HILL48, que de acuerdo con [11] es el modelo más adecuado para la simulación de este proceso cuando se trabaja con aceros.

El modelo de material Hill 48 (Material transversalmente anisotrópico elástico plástico)

Para la modelación de este proceso, es posible aplicar un modelo de elementos finitos considerando la geometría, cinemática y condiciones de materiales que permita obtener resultados fiables.

El modelo de material Hill 48 incluye el criterio de fluencia en conjunto con la regla de endurecimiento isotrópico [12-14]. Este es uno de los modelos más utilizados para la simulación, la función de la cedencia viene dado por la expresión:

$$\phi = \frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 3L\tau_{zx}^2 + 3M\tau_{yz}^2 + 3N\tau_{xy}^2}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Donde en la ecuación (1), $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ y τ_{xz} son los esfuerzos en un punto específico de la superficie de la lámina con referencia al sistema de coordenadas establecido para el análisis; y además los coeficientes F, G, H, L, M y N están dados por:

$$F = \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_{90}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_N}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_0}\right)^2 \quad (2)$$

$$G = \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_0}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_{90}}\right)^2 \quad (3)$$

$$H = \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_{90}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{AV}}{\sigma_N}\right)^2 \quad (4)$$

$$L = M = 2 \quad (5)$$

Parámetro	Símbolo	Valores para Ls Dyna			
		C-Mn 440	DP-590	TRIP-590	TRIP-780
Densidad (ton/mm ³)	ρ	7.800E-9	7.850E-9	7.850E-9	7.850E-9
Módulo de Young (N/mm ²)	E	2.00E+5	2.0170E+5	2.747E+5	2.747E+5
Razón de Poisson	ν	0.26	0.27	0.27	0.27
Esfuerzo a la cedencia (N/mm ²)		285.0	360	412.0	412.0
Deformación en la cedencia		0.00142	0.0018	0.0015	0.0015
Coefficiente de resistencia para regla de endurecimiento exponencial. (N/mm ²)	K	890.0	988.32	-	-
Exponente para regla de endurecimiento exponencial.	n	0.755312	0.1831	-	-
Coefficiente Lankford a 0°	r_0	0.890	0.898	-	-
Coefficiente Lankford a 45°	r_{45}	1.820	1.078	-	-
Coefficiente Lankford a 90°	r_{90}	1.350	1.584	-	-
Anisotropía Promedio	R_{prom}			1.1595	1.1595

Tabla 1: Propiedades Mecánicas empleadas en el análisis para los cuatro aceros de alta resistencia

$$N = \frac{2}{\sqrt{\frac{3}{2r_{45}+1}}} \quad (6)$$

Los valores σ_{0° , σ_{45° , σ_{90° en las expresiones (2), (3) y (4), hacen referencia a los valores verdaderos de deformación para la cedencia a 0°, 45° y a 90° correspondientes a cada dirección de rolado de la lámina, estos valores son obtenidos de pruebas que se basan en el estándar establecido por la norma ASTM E8M, mientras que el σ_{AV} que está en función de estas variables, se define por:

$$\sigma_{AV} = \frac{\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}}{4} \quad (6)$$

Y σ_N está dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_N = \sigma_0 \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{r_0+r_{90}}} \quad (7)$$

Donde r_{0° , r_{45° y r_{90° son los índices de anisotropía plástica a 0°, 45° y 90° con respecto a las tres diferentes direcciones de rolado obtenidas de pruebas experimentales basadas en el estándar de la norma ASTM E517.

ESTAMPADO DE LA PIEZA OPERACIÓN 10

Análisis por Gravedad

En las simulaciones desarrolladas para la Operación 10, se usó el mallado obtenido a partir de un archivo generado en ANSYS®. Buscando desarrollar una simulación más apegada a la realidad, se realiza primero un análisis por gravedad en la chapa, para que se coloque de acuerdo a su propio peso en la matriz tal y como sucede en el proceso real. Esta parte de la simulación solo necesita de la matriz y la chapa.

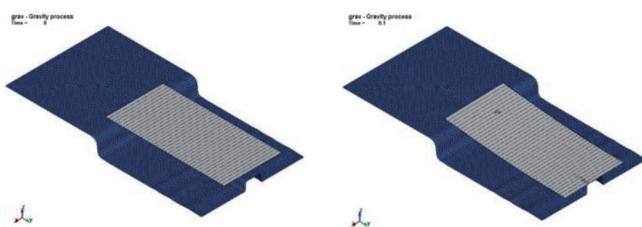


Fig. 4: Acomodo de la chapa sobre la matriz por causa de la gravedad

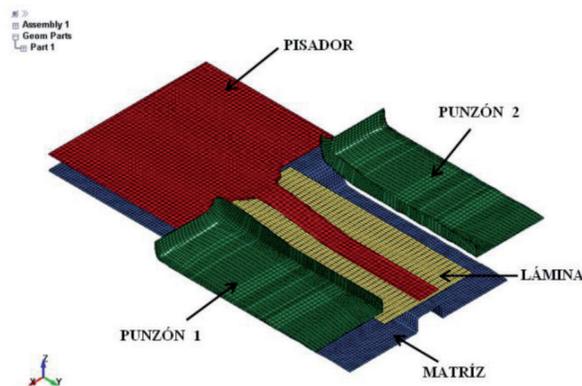


Fig. 5: Disposición de los elementos para la operación 10

En la Figura 4, se observa el acomodo de la chapa después del análisis por gravedad. Esta chapa deformada junto con sus esfuerzos y deformaciones, es guardada dentro de un archivo llamado "dinain.k", la ventaja de contar con este archivo, es que permite exportar la chapa resultante para análisis posteriores.

Simulación de la Operación 10

Para desarrollar esta simulación se utiliza la misma malla usada para los herramientas en la operación de Análisis por Gravedad, pero considerando ahora el pisador y punzones. Esto se logra importando el archivo "dinain.k" generado en el paso anterior (Figura 5).

Uno de los principales problemas para llevar a cabo esta simulación es el hecho de que el recorrido durante el proceso real de los punzones no es vertical sino en diagonal a 45°. Para poder generar este movimiento, fue necesario declarar sistemas coordenados locales, estos se muestran en la Figura 6. Los sistemas coordenados tienen su dirección en el eje Z a 45° como es requerido, al momento de indicar el movimiento de cada punzón, se hace con respecto a la dirección en Z de estos sistemas coordenados locales. Se aplican desplazamientos sobre punzones y pisadores, se busca que los herramientas se desplacen lo suficiente hasta dejar un espacio igual al espesor de la chapa entre la superficie de la matriz y los punzones.

SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN 20

La Operación 20 es una segunda estación de estampado. La geometría del dado para esta operación se obtuvo a partir de un archivo con formato ".IGES" proporcionado por la empresa PEMSA. En esta operación, la disposición del herramental es distinta a la de la Operación 10, ya que la chapa se acomoda dentro del dado

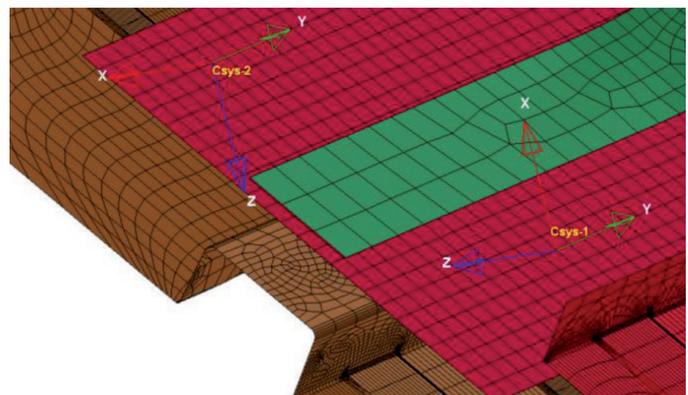


Fig. 6: Declaración de sistemas coordenadas locales

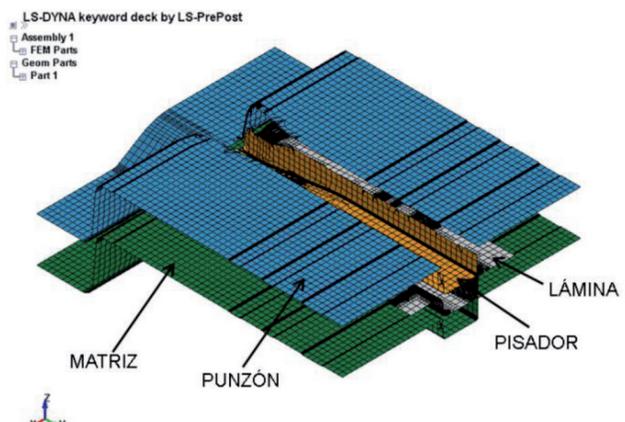


Fig. 7: Disposición de los elementos para la operación 20

con ayuda del pisador, después, el dado sube junto con el pisador y la chapa hasta encontrarse con el punzón (Figura 7).

La simulación de la operación 20, requiere importar la chapa deformada de la Operación 10 y que ésta contenga los esfuerzos y deformaciones residuales. Para hacer la simulación más apegada a la realidad se importó la chapa deformada del análisis de springback derivado de la Operación 10.

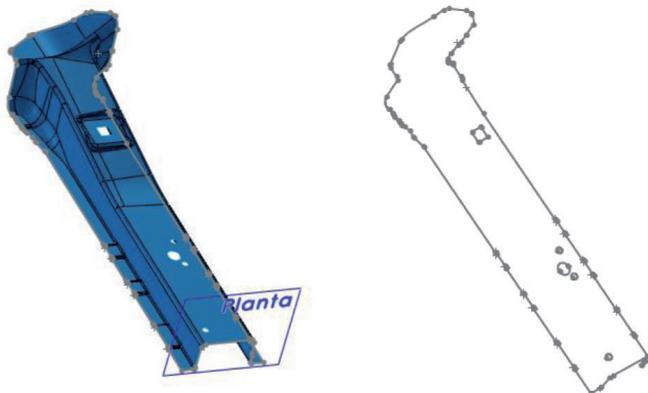


Fig. 8: Curva de corte obtenida a partir de la geometría final de la pieza

Simulación de la Operación 30

La operación 30, es una operación de corte que lleva la pieza a su forma final. Para desarrollar la simulación de esta operación, es necesario contar con la curva de corte para dicha pieza y esta debe coincidir con la pieza que será cortada. La curva de corte se extrajo de la geometría final requerida; en la Figura 8 se aprecia un esquema para la obtención de esta curva.

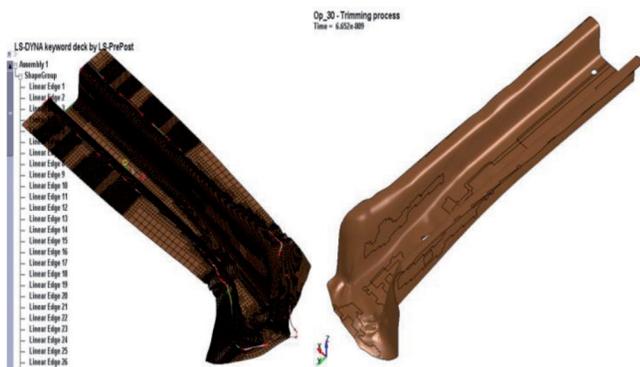


Fig. 9: Pieza final obtenida después del corte

La curva se traslada a la pieza resultante de la operación 20 y se ensamblan ambas en la localización adecuada y se procede con la operación de corte, de esta manera se obtiene el travesaño (Figura 9).

3. RESULTADOS

Esta investigación consiste en hacer un análisis comparativo derivado del estampado de un componente automotriz con diversos aceros. Por ello en cada una de las operaciones se muestran los valores obtenidos de los principales parámetros que influyen en el estampado de este componente.

OPERACIÓN 10 Adelgazamientos

Un resultado determinante en los análisis de procesos de estampado, es el porcentaje de reducción en el espesor; de acuerdo

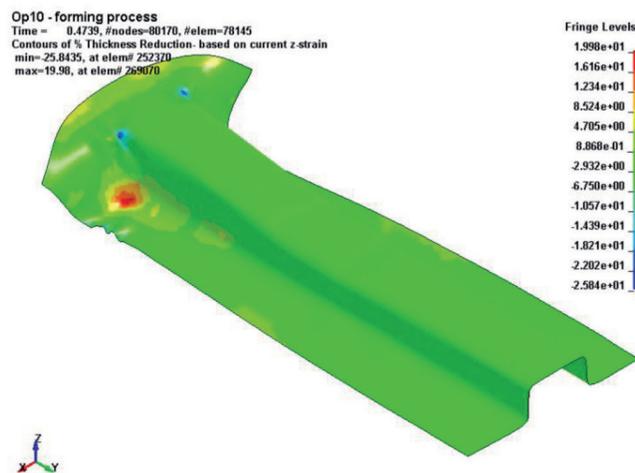


Fig. 10: Reducción de espesor en la Operación 10 acero C-Mn440

a la empresa, si esta reducción es inferior al 25% se considera como aceptable. En la Figura 10, se muestra un esquema de la forma en que se obtiene este parámetro para el acero C-Mn440, obteniéndose de la misma forma para los otros tres aceros sujetos a estudio.

Los valores de los resultados de la simulación en el caso de reducción de espesor máxima para la operación 10 se pueden resumir en la Tabla 2.

REDUCCIÓN DE ESPESOR (OPERACIÓN 10)	
C-Mn 440	19.98 %
DP 590	23.8 %
TRIP 590	22.71%
TRIP 780	20.50%

Tabla 2: Porcentaje de adelgazamientos obtenidos

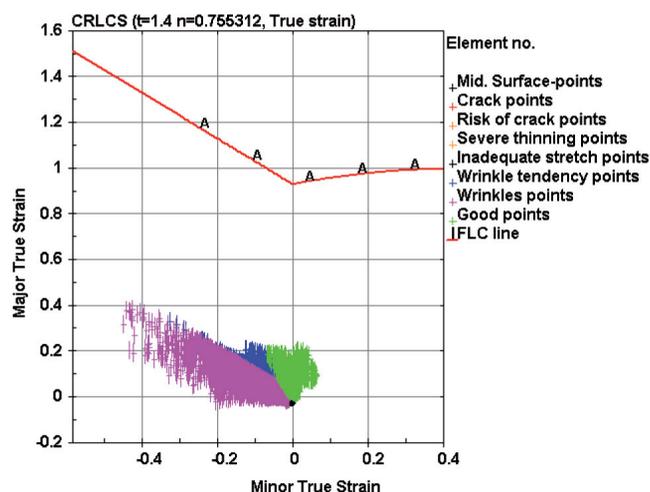


Fig. 11: Análisis FLD para acero C-Mn 44, Operación 10

Análisis FLD (Estampabilidad)

Otro análisis que se considera en los procesos de estampado es el análisis por FLD (*Forming Limit Diagram*). En la Figura 11, se pueden observar los puntos de la lámina que se encuentran en la

zona segura, los que tienen tendencia a arrugas, así como los que sufren adelgazamiento excesivo o ruptura.

Este análisis no tiene la misma relevancia que la reducción de espesor ya que esta curva se calcula teóricamente por el programa, pero es un buen indicador para el proceso.

Se definió una variable del proceso que se nombró como "factor de seguridad" con respecto a la curva FLD. Se propone para evaluar este parámetro que se proceda de la manera siguiente en forma general: calcular la distancia vertical desde el punto más crítico (el más alejado para los puntos que están sobre la curva FLD considerada negativa o la más cercana para los puntos que estén bajo la curva, considerada positiva) hasta la curva FLD; es posible también encontrar el punto que equivale al valor límite y medir su distancia vertical a la curva FLD.

El factor de seguridad será la razón entre la distancia del valor límite a la distancia al valor crítico. Este parámetro, es de utilidad para determinar la posibilidad de falla desde un punto de vista cuantitativo.

De gráficas como la de la Figura 11 para cada acero, se calcula el factor de seguridad en la pieza (Tabla 3).

FACTOR DE SEGURIDAD (OPERACIÓN 10)	
C-Mn 440	4.71
DP 590	1.36
TRIP 590	1.50
TRIP 780	1.67

Tabla 3: Factor de seguridad obtenido de los diagramas FLD, Operación 10

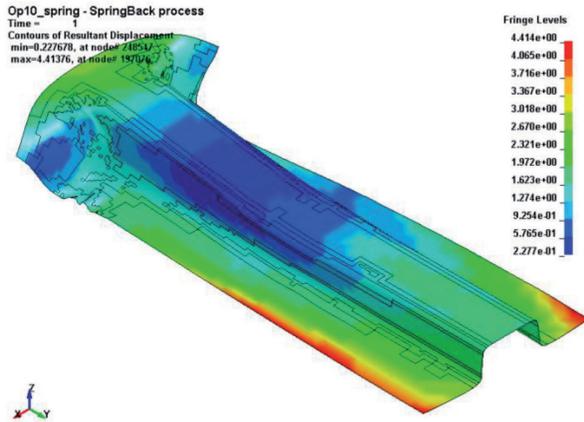


Fig. 12: Springback" resultante después de la Operación 10, acero C-Mn 440

Recuperación elástica (Springback)

El otro parámetro importante para analizar es la recuperación elástica. En la Figura 12 se muestra un ejemplo los desplazamientos de la chapa debido a este fenómeno.

En la Tabla 4, se presentan los valores numéricos del desplazamiento máximo debidos a la recuperación elástica.

"SPRINGBACK" (OPERACIÓN 10)	
C-Mn 440	4.41 mm
DP 590	9.45 mm
TRIP 590	5.76 mm
TRIP 780	9.35 mm

Tabla 4: Springback resultante para cada acero en la operación 10

OPERACIÓN 20

Para la operación 20, que es una operación de planchado, se calcularon los adelgazamientos, considerando los resultados obtenidos de la operación 10. El porcentaje de adelgazamiento para uno de los casos, se presenta en la Figura 13.

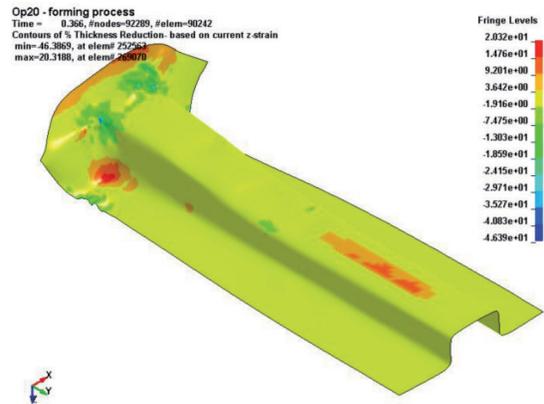


Fig. 13: Reducción de espesor en la Operación 20 acero C-Mn440

Adelgazamientos

En la Tabla 5, se muestran los valores de adelgazamiento máximo obtenidos para la operación 20 en cada acero.

REDUCCIÓN DE ESPESOR (OPERACIÓN 20)	
C-Mn 440	20.32 %
DP 590	37.17 %
TRIP 590	23.18%
TRIP 780	46.06%

Tabla 5: Porcentaje de adelgazamientos obtenidos operación 20

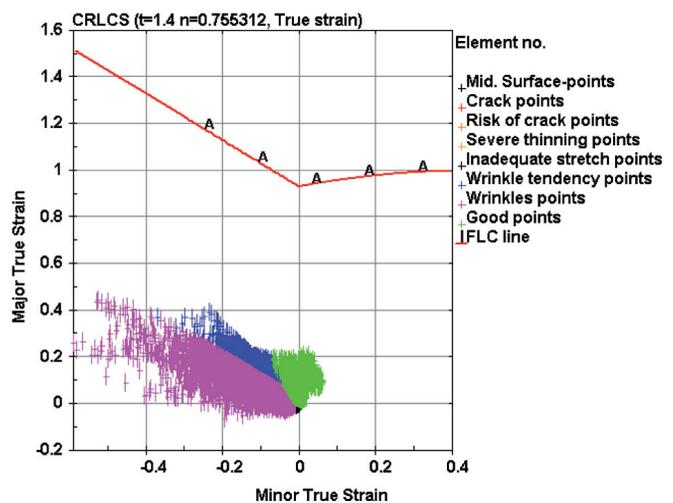


Fig. 14: Análisis FLD para acero C-Mn 44, Operación 20

Análisis FLD (Estampabilidad)

En la Figura 14, se muestra un diagrama FLD, en donde todos los puntos mostrados en dicho diagrama, están dentro del rango seguro en la operación 20.

El factor de seguridad definido anteriormente, se muestra en la Tabla 6 para los diferentes aceros. Un valor mayor que 1, significa que el estampado de la pieza es factible, valores menores a la unidad, indican que el estampado no es posible.

FACTOR DE SEGURIDAD (OPERACIÓN 20)	
C-Mn 440	2.53
DP 590	0.61
TRIP 590	1.44
TRIP 780	1.67

Tabla 6: Factor de seguridad obtenido de los diagramas FLD, Operación 20

Después de llevar a cabo el planchado, la operación 20, se completa analizando el comportamiento del material al separar el dado y el punzón, dejando que la chapa se deforme libremente.

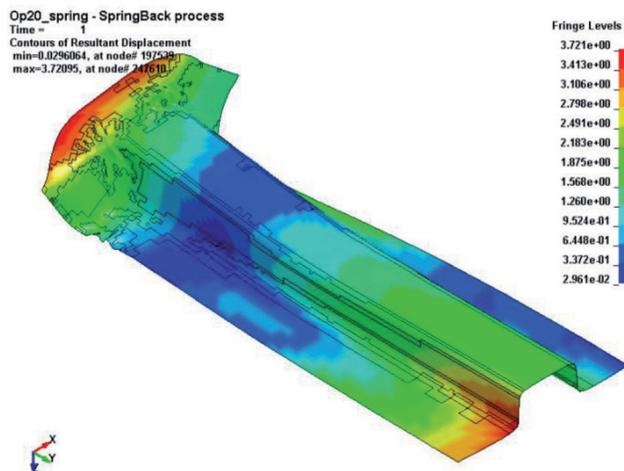


Fig. 15: Springback" resultante después de la Operación 20, acero C-Mn 440

Recuperación elástica (Springback)

En la Figura 15, se muestra una gráfica de la simulación de la recuperación elástica al terminar la operación 20.

En la Tabla 7, se muestran los valores de deformación máxima para cada acero debido a la recuperación elástica de la operación 20.

"SPRINGBACK" (OPERACIÓN 20)	
C-Mn 440	3.72 mm
DP 590	6.12 mm
TRIP 590	4.03 mm
TRIP 780	3.94 mm

Tabla 7: Springback resultante para cada acero en la operación 20



Fig. 16: Pieza final obtenida después del corte

OPERACIÓN 30

La operación 30, es una operación de corte que lleva la pieza a su forma final. Los resultados para esta parte de la simulación, se obtienen a partir de los resultados generados en las dos operaciones anteriores. La Figura 16 muestra la geometría del travesaño obtenida después del corte.

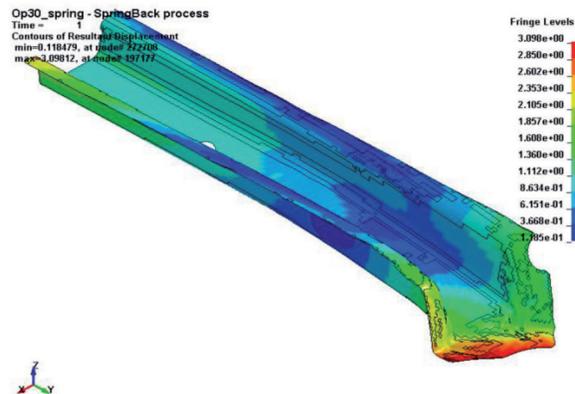


Fig. 17: Springback" resultante después de la Operación 30, acero C-Mn 440

Para llevar a cabo la operación 30, se rigidiza la chapa y luego se corta, debido a esto, es necesario hacer la simulación de la recuperación elástica. En el caso del corte, es necesario definir un nodo base, a partir del cual ocurren todas las deformaciones.

La pieza final se aprecia en la Figura 17, incluyendo los efectos de la recuperación elástica y los resultados para los valores de deformación máximos en los cuatro diferentes aceros se muestran en la Tabla 8.

"SPRINGBACK" (OPERACIÓN 30)	
C-Mn 440	3.10 mm
DP 590	2.49 mm
TRIP 590	2.96 mm
TRIP 780	2.77 mm

Tabla 8: Springback resultante para cada acero en la operación 30



Fig. 18: Estampado de la pieza (operación 10)

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la validación de los resultados obtenidos en la simulación, se realizaron una serie de pruebas del estampado de la pieza con

acero DP 590 en la empresa PEMSA. La Figura 18, muestra dicho estampado en su operación 10 de pre-planchado y en la Figura 20 se muestra la operación 30 de corte para el travesaño. de la el sistema comercial para la adquisición de imágenes ARAMIS desarrollado por GOM.

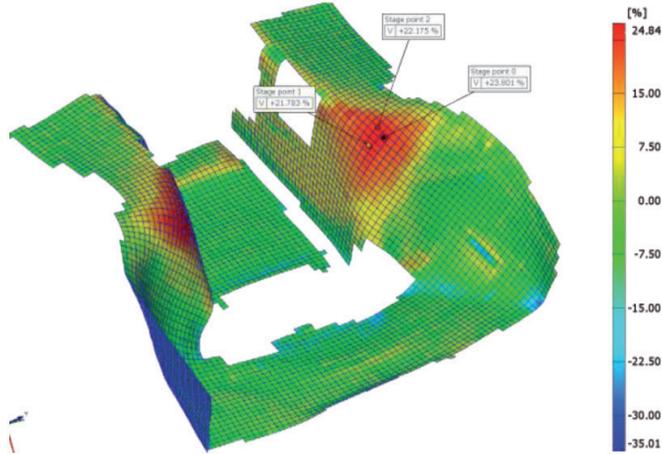


Fig. 19: Procesamiento de imágenes para determinar el porcentaje de adelgazamiento en zonas críticas del travesaño



Fig. 20: Imagen del travesaño después de la operación de corte (operación 30)

Así mismo, para corroborar los resultados en los porcentajes de adelgazamiento, se empleó un comercial para la adquisición de imágenes ARAMIS®.

Mediante el procesamiento de datos con ayuda del sistema ARAMIS® es posible definir en el espécimen puntos arbitrarios y darle seguimiento a los valores de adelgazamientos durante toda la prueba. La Figura 19 muestra un sumario de estos resultados en la zona del travesaño donde tiende a haber una concentración de adelgazamiento tal y como lo muestra la simulación, esto se hace evidente en el resultado experimental mostrado en la Figura 18 y en la en los resultados numéricos mostrados en la Figura 10.

La Figura 19 muestra los valores obtenidos mediante el procesamiento de imágenes. Dicho valor es inferior al 25% que se asemeja al 22.71% obtenido como resultado numérico producto de la simulación y que son mostrados en la Tabla 2.

La Figura 20, muestra el travesaño posterior al corte (operación 30), observándose que no hubo fallas en las zonas críticas del estampado.

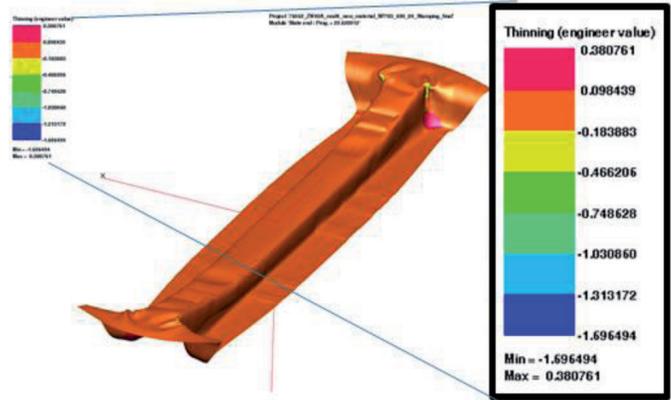


Fig. 18: Adelgazamientos obtenidos en PAMSTAMP®

4. DISCUSIÓN

Resultados a partir del software para propósitos especiales de simulación de estampado PAMSTAMP®, en el caso de la operación 20, muestran que la reducción de espesor para un acero DP 590 es de 38.07%, los resultados obtenidos en este trabajo indican un valor de 37.17% en LsDyna®, por lo que se observa que ambos resultados están en el mismo rango de reducción de espesor. En la Figura 18, se muestra el resultado del porcentaje de reducción con el paquete de propósitos especiales.

En este trabajo se llevó a cabo el modelado del proceso de estampado de un travesaño de automóvil, considerando los efectos residuales del proceso de manufactura previo, lo cual acerca el modelado al proceso real del estampado industrial. Esta modelación se realizó para cuatro aceros de alta resistencia, encontrándose que en todos los casos el porcentaje de reducción máxima se localizó en la misma zona situada en una esquina del travesaño.

Se definió un factor de seguridad con el cual se pueden comparar numéricamente los resultados obtenidos en cada etapa del proceso mediante la curva FLD, lo cual es complejo si solo se atiende a la interpretación del diagrama, ya que este cambia para cada tipo de acero y para cada etapa del proceso.

Utilizando este factor, se observa que la operación 10, se puede llevar a cabo para todos los aceros, mientras que para la operación 20, aprecia que el acero DP 590 presenta un factor de seguridad de 0.61, por lo cual esta operación no se puede realizar.

En función de que el porcentaje de reducción máximo permitido es de 25%, se determinó que la operación 10 puede ser efectuada con todos los aceros. Sin embargo, la operación 20, solo se puede realizar con el acero convencional C-Mn 440 y con el TRIP590.

Finalmente, el análisis para la recuperación elástica, muestra nuevamente mejores resultados en los aceros C-Mn 440 y con el TRIP590, en la operación 10. Mientras que en la operación 20, los mejores resultados son para el acero C-Mn 440 y TRIP780. En la operación de corte, la recuperación elástica menor, se observa en el DP-590 y en el TRIP780. Dichos resultados son validados experimentalmente, mediante el estampado de la pieza.

Derivado de los resultados anteriores, se determina que el acero C-Mn se puede formar cumpliendo los requisitos especificados en la industria. En el caso del DP-590, es necesario hacer un cambio en los herramientas de la operación 20, específicamente en las esquinas. Para el TRIP590, este acero cumple con la posibilidad de formado, aunque su recuperación elástica es mayor. En lo que respecta al TRIP780, este presenta una reducción de espesor mayor que la permitida en la operación 20, por lo que es necesario modificar los herramientas.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio muestran lineamientos generales para simular procesos de conformado metálico complejos con un software de propósitos generales comúnmente disponible en Universidades como es LS-Dyna® y la validación de dichos resultados versus los obtenidos por un software de propósitos especiales de conformado de lámina ampliamente usado y verificado en la industria del estampado como es PAMSTAMP®.

Por otro parte, los resultados de simulación muestran que la fabricación es factible con los herramientas y procesos analizados solo para el acero C-Mn 440; para el TRIP590 es imperativo considerar una estrategia de compensación de superficies en el modelo empleado en simulación que reduzca hasta valores aceptables, por diseño, las desviaciones inducidas por la recuperación elástica. Además se propone modificar las herramientas de la operación 20 para lograr el formado del travesaño con los aceros DP 590 y TRIP780.

Adicionalmente este trabajo introduce como novedad el concepto de factor de seguridad que aunado a los resultados de adelgazamiento indican la ocurrencia de una falla por fractura en la operación 20 de los materiales DP 590 y TRIP 780; esto ayuda a explicar que, además de presentarse una mayor tendencia al adelgazamiento en estos materiales los límites de embutido determinados por las FLD's también tienden a ser inferiores y por lo tanto el material tolera en menor medida las deformaciones inducidas por el proceso.

Se realizaron análisis de recuperación elástica después de cada etapa para los cuatro aceros.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I.B. Timokhina, P.D. Hodgson, and E.V. Pereloma. "Transmission Electron Microscopy Characterization of the Bake-Hardening Behavior of Transformation-Induced Plasticity and Dual-phase Steels". The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-007-9258-7>. Metallurgical and Materials Transactions A 2454 - 38A, October 2007.
- [2] José Antonio Pero-Sanz Elorz. "Los aceros, un reto para el siglo XXI". Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Madrid. Conferencia inaugural de las Jornadas de Siderurgia (Arceralia - Universidad de Oviedo), el 30 de mayo de 2001. DYNA Tecnología, NOVIEMBRE 2001.
- [3] Martínez, Verdeja, Pero-Sanz. "Interstitial Free Steel: influence of the alpha phase hot rolling and cold rolling reduction to obtain extra deep drawing quality. Materials Characterization, Vol 46, 1, pp 45 y sig, 2001.
- [4] Du C., Chen X. M., Lim T., Chang T., Xiao P., and Liu S. D. Correlation of FEA prediction and experiments on dual-phase Steel automotive rails. AIP Conference Proceedings, 908 (1), 2007, pp 943-948. Doi: <http://dx.doi.org/10.101063/1.2740932>
- [5] Erman Tekkaya, "State-of-the-art of simulation of sheet metal forming", Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) 14-22.
- [6] M. Gotoh, F. Ishise, "A finite element analysis of rigid-plastic deformation of the flange in a deep-drawing process based on a fourth-degree yield function", Int. J. Mech. Sci. 20 (1978) 423-435.
- [7] N.-M. Wang, B. Budiansky, "Analysis of sheet metal stamping by a finite-element method", Trans. ASME. J. Appl. Mech. 45 (1978) 73-82.
- [8] P.J. Jacques. "Transformation-induced plasticity for high strength formable steels". Département des Sciences des Matériaux et des Procédés, Université catholique de Louvain, IMAP, Place Sainte Barbe 2, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium. Current Opinion in Solid State and Materials Science 8 (2004) 259-265.
- [9] Aguilera G. Eduardo, Plascencia M. Héctor, Ledesma O. Elías R., Ruiz L. Ismael, Caciq B. Sergio L., Capilla G. Gustavo. Mechanical Characterization of a Dual-Phase Steel for Stamping Using the Simulation of a Spherical Stamping Process. Proceedings of the 2nd International Conference Innovative Manufacturing Technology, The Institute of Advanced Manufacturing Technology (IOS); Krakow Poland, 6 and 7 december 2012; pp 651- 660.
- [10] Sheng Cheng, Xun Li Wang, Zhili Feng, Bjorn Clausen, Hahn Choo, Peter K.

Liaw. "Probing the Characteristic Deformation Behaviors of Transformation-Induced Plasticity Steels". The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2008. Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 39A, December 2008-3105 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-008-9604-4>.

- [11] Reveles A. Juan Francisco. "Simulación de Estampado e Hidroformado. Tesis de Maestría". Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica, Universidad de Guanajuato, México. Junio de 2009.
- [12] ANSYS. Help version 12.
- [13] (LSTC), Livermore Software Technology Corporation. Ls-Dyna keyword user's manual version R7. Livermore, California : s.n., February 2013.
- [14] Marc 2011. Volume A: "Theory and User Information", MSC. Software, Santa Ana, Ca, 2011.
- [15] M. Gere, James and J. Goodno, Barry. Mecánica de materiales. s.l. : Cengage learning, 2009. ISBN 0-534-55397-4.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado con un Convenio de Colaboración entre la universidad de Guanajuato Campus Irapuato Salamanca y la Empresa Pintura Estampado y Montaje S. A. P. I. de C. V. (PEMSA) para el proyecto Desarrollo de Proceso para Optimización de Estampados con Aceros Avanzados Mediante Manufactura Estratégica. Los autores quieren expresar su agradecimiento, por el apoyo recibido para esta investigación al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al Cuerpo Académico de Diseño y Manufactura, de la Universidad de Guanajuato y a la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, así como al Departamento de Investigación y Desarrollo de la empresa PEMS A Celaya, México. Además se reconoce la participación del Ing. Pedro Rubio Díaz, integrante del grupo de trabajo en el desarrollo del modelo inicial.