

Análisis de esfuerzos en una pieza automotriz fabricada mediante hidroformado

Jorge León¹, Carlos Pérez², Juan Cisneros²

División de Ingeniería Industrial¹, Doctorado en Sistemas Integrados de Manufactura²
Universidad Politécnica del Valle de México¹, Universidad Popular Autónoma de Puebla²
Tultitlán, Méx.¹; Puebla, Pue.²; México
jcleon1969@gmail.com, carloskobe@hotmail.com, juancarlos.cisneros@upaep.mx

Abstract— Now day the automotive industries in our country is expanding, the only way to maintain the grow rate in global market is developing efficient technology and manufacturing process. Hydroforming is manufacturing process with steady growth, but there is little data generated in our Country. In our particular case the part we are studying could be developed in two ways, first by an experimental method, that requires a great amount of resources and specialized equipment, the second method is using numerical simulation software. This method allows us to obtain reliable results, utilizing fewer resources and reducing the lead time in product development.

Keyword— hydroforming, stress, simulation, Hyperform

Resumen— Actualmente la industria automotriz en nuestro país se encuentra en expansión, la manera de mantener el ritmo de crecimiento en un mercado globalizado es mediante el desarrollo de tecnología y procesos de manufactura más eficientes. El hidroformado es un proceso de manufactura con un crecimiento constante en México, sin embargo casi no existe información generada en el país. En nuestro caso particular, existen dos maneras de desarrollar el componente aquí estudiado, el primer método es de manera experimental, que requiere de una gran cantidad de recursos y equipo especializado, el segundo es mediante el uso de software de simulación numérica. Este método nos permite obtener resultados confiables, utilizando menos recursos y un menor tiempo de desarrollo de producto.

Palabras claves— hidroformado, esfuerzo, simulación, Hyperform.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los requerimientos de un mercado globalizado obligan a la industria automotriz a reducir sus costos, y a la vez cumplir con expectativas cada vez mayores de calidad, haciendo atractivo al consumidor sus productos reduciendo el consumo de combustible, tanto por los constantes incrementos en los precios de las gasolinas, como desde el punto de preservación del medio ambiente.

Además de la meta de reducción de costes, estas empresas tienen como objetivo la optimización de los procesos de fabricación de sus productos, la disminución del peso, la estabilidad, rigidez, etc. Esto requiere de la reevaluación de las soluciones de diseño convencional, las técnicas de fabricación y los materiales seleccionados en la búsqueda de soluciones alternativas. Una alternativa interesante con un gran potencial técnico y económico es el Hidroformado, un método para la fabricación de una amplia gama de componentes con geometrías complejas fabricados de material tubular o chapas por medio de la presión de un fluido. Este método puede disminuir los tiempos de desarrollo, reducir el número de pasos de operación y alcanzar una alta precisión en las piezas (AIMME, 2009).

En la historia de las tecnologías de conformado metálico; la industria automotriz ha demostrado ser la fuerza impulsora desde el siglo pasado. De esta manera, el desarrollo continuo de los procesos de fabricación fue la base para la mejora continua de los productos. Al mismo tiempo, se desarrollaron nuevos procedimientos que han facilitado la obtención de componentes con geometrías más complejas que garantizaron un aumento de la eficiencia y disponibilidad de piezas además de nuevos procesos de deformación y máquinas que responden a los nuevos requisitos. Los procedimientos de conformado se

pueden clasificar y/o subdividir en: procedimientos de conformado de chapa metálica o en procedimientos de conformado masivo. La norma DIN 8582 subdivide los procesos de conformado teniendo en cuenta, principalmente, los esfuerzos efectivos, la figura 1 muestra la subdivisión (Keigler, Bauer, Harrison, & De Silva, 2004).

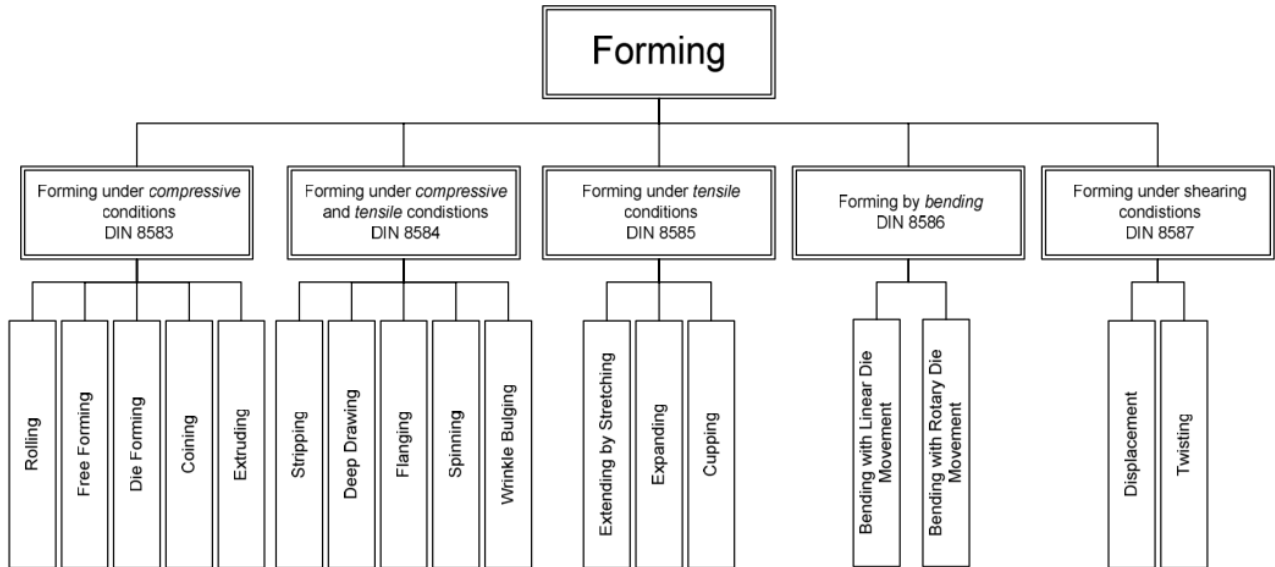


Fig. 1. Subdivisión de los procesos de manufactura conforme a la norma DIN 8582

Debido al hecho de que los recursos son más escasos y como consecuencia de la creciente contaminación medioambiental, las construcciones de bajo peso o ligeras (incrementan la eficiencia del combustible) son de especial importancia en el diseño de un producto. Como resultado de estos requisitos, se ha establecido un nuevo proceso de conformado entre los procesos de conformado clásico el “Hidroformado” (AIMME, 2009).

“El Hidroformado es todavía una tecnología relativamente joven” Tim Werding, presidente y CEO de Schuler Hydroforming Inc. Dijo también recientemente “y todavía está en transición de un arte a una ciencia” siguiendo con sus comentarios “hemos estampado metal por cerca de 150 años, así que tenemos una gran base de conocimientos y también especificaciones de materiales muy confiables que comunican con precisión los requerimientos mecánicos. Tenemos que llegar a ese mismo nivel con las especificaciones del Hidroformado” (Wilson, 2004).

El conjunto de técnicas conocidas como Hidroformado representan una alternativa a los métodos convencionales mecánicos por razones de flexibilidad (simplificación de utillajes), mejora de condiciones de proceso (esencialmente reducción de fuerzas de fricción), que permiten mayores deformaciones, mejor precisión, mejoras en las tensiones residuales y finalmente posibilitan la obtención por deformación de piezas imposibles de producir hasta hoy por los procedimientos convencionales (particularmente en la fabricación de piezas a partir de elementos tubulares y en componentes donde es crítica la relación peso-resistencia) (AIMME, 2009).

Existen principalmente dos clases de Hidroformado, conocidas como, Tube Hydroforming (Hidroformado para piezas tubulares), y Sheet Hydroforming (Hidroformado de chapas), además, se adelantan estudios para la implementación de fluidos calientes “Hidroformado Térmico” (Thermal Hydroforming) y pulsaciones en el Hidroformado, con el propósito de optimizar y extender esta técnica a otras industrias (Ordoñez Jiménez, 2012).

De los clases previamente mencionadas, la más común es el Hidroformado de Tubos (Tube Hydroforming, THF por sus siglas en inglés) que consiste en el conformado de un tubo de acero contra las paredes de una matriz, mediante la introducción de un fluido a presión. Pudiendo emplearse además una compresión axial simultánea para evitar un excesivo adelgazamiento del espesor del tubo en las zonas sometidas a una fuerte expansión. El tubo altera su forma durante el proceso permitiendo diferentes cambios de sección a lo largo de su longitud, obteniéndose unas formas suaves lo que proporciona una mayor rigidez que en piezas estampadas facilita las posteriores operaciones de taladrado en cualquier parte de la pieza (AIMME, 2009).

Debido a que el mecanismo de deformación es muy complejo en el proceso, y las propiedades mecánicas resultantes no pueden predecirse con exactitud mediante métodos analíticos, el uso de software específico nos permite analizar los posibles resultados que se obtendrían en una simulación con determinada pieza, permitiendo con relativa facilidad someterla a distintas condiciones, tales como presión, velocidad de fluido, lubricante, y material (AIMME, 2009).

El proceso básico para el Hidroformado de tubos se puede describir de la siguiente manera (véase figura 2):

Tubos rectos o pre-deformados se introducen primero en la matriz.

La matriz se cierra por un proceso hidráulico que puede conformar de manera mecánica el tubo durante el cierre.

Los punzones de sellado cierran las extremidades del tubo y se inicia el llenado.

El material se expande por el incremento de presión del fluido que se realiza conjuntamente con el avance simultáneo de los punzones de sellado, fluye hacia el interior de las zonas de conformado y da la configuración final de la pieza.

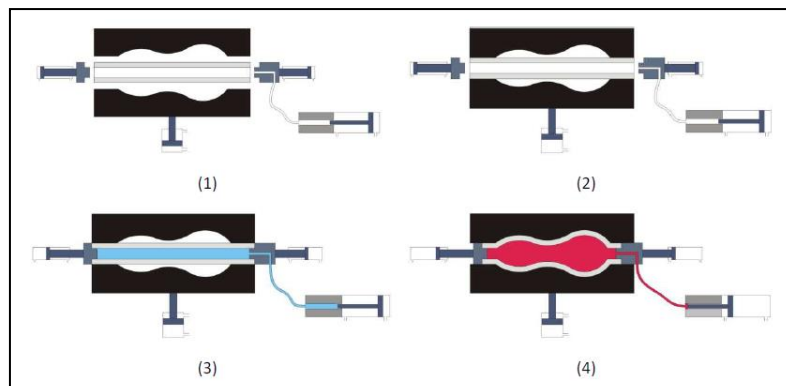


Fig. 2. Esquema del proceso de Hidroconformado para tubos (AIMME, 2009)

II. DESARROLLO DEL PROBLEMA

En los últimos diez años tanto el equipo de cómputo, como el software para simulación y análisis de esfuerzos han experimentado un desarrollo acelerado, por una parte el aumento en la capacidad para realizar cálculos cada vez más complejos en menos tiempo y por otra parte el desarrollo de algoritmos que arrojan resultados cada vez más precisos, son algunas de las principales razones por las cuales los resultados obtenidos mediante el Método del Elemento Finito (MEF) son utilizados para el diseño de productos y procesos.

En el caso del hidroformado, los cálculos analíticos para obtener las deformaciones y los esfuerzos presentan una complejidad enorme, por lo que para explicar este fenómeno en la zona plástica del

material es necesario un equipo de cómputo que mediante métodos numéricos obtenga una solución aproximada.

Al igual que en otros problemas que se resuelven mediante el MEF, es necesario crear un modelo CAD, asignarle material, las condiciones de carga y realizar la discretización del mismo (malla) antes de someterlo a un proceso de solución.

Una vez obtenido el resultado, la parte más importante es el análisis del mismo, pues mediante un módulo de visualización especializado, permite ver las fallas que pueden presentarse lo que permite la optimización del modelo propuesto.

Se utilizará el software desarrollado por la compañía Altair Hyperworks, compañía norteamericana cuyo software comercial es HyperWorks, el cual tiene un módulo denominado HyperForm, especializado en formado de metales y el módulo HyperMesh, utilizado en la visualización de los resultados obtenidos

La pieza a analizar es mostrada en la figura 3, la cual se solucionará por el método denominado por el software Incremental Radioss. Para conocer el ambiente de la figura se toma la consideración que el 90% de las solicitudes de piezas hidroformadas son para componentes de la industria automotriz (Wilson, 2004). Para esto será necesario considerar desde la preparación de la pieza hasta el análisis de ciertos resultados. Para la solución de dicho problema se tiene que considerar los siguientes puntos:

1. Elegir el material para la pieza.
2. Realizar el estudio Incremental Radioss.
3. Elegir la presión, velocidades y demás parámetros adecuados para la conformación de la pieza.
4. Se entregará un análisis del % de adelgazamiento, conformabilidad y FLD.
5. Realizar la interpretación de los resultados y en su caso sugerir las posibles soluciones a los problemas que se presenten (HyperView).

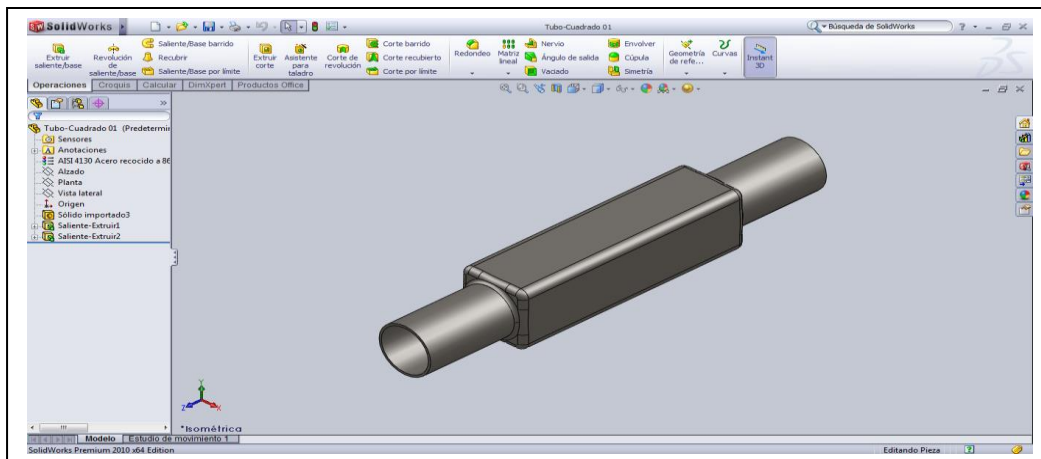


Fig. 3. Pieza a realizar en HyperForm.

Continuamente las complejas geometrías de los componentes hacen con frecuencia más necesaria la preforma después de la flexión (si esta última es necesaria) y antes del proceso de Hidroconformado

real. Este proceso debe definirse teniendo en cuenta diferentes aspectos económicos. No solo las herramientas y aumento de los costos de manufactura tienen que ser considerados, sino también la mejora de la calidad de los componentes, incrementa las condiciones de seguridad de la fabricación y se reduce el desgaste de las herramientas. Si un proceso de preformado es necesario, con el fin de garantizar una fabricación sin problemas del componente, principalmente dependerá de la distribución de la sección transversal del componente inicial en relación con la geometría final. En general, se distingue en dos grupos principales que hacen necesario el preformado, siendo el más común el siguiente (Keigler, Bauer, Harrison, & De Silva, 2004):

Las secciones transversales de la geometría del componente permiten una estable formación del tubo inicial, sin embargo, hay áreas con alta expansión localizada. En este caso la preforma es utilizada para lograr una pre-distribución del material del tubo. Durante el preformado una acumulación de material se crea mediante la modificación intencionada de las secciones transversales en los lugares de expansión localizados o la forma de las secciones transversales se ajustan lo más cerca posible al contorno final. De esta manera la producción en serie se cumple sin problemas en el proceso y se mejora la calidad del producto final (Keigler, Bauer, Harrison, & De Silva, 2004).

Debido a lo previamente explicado para nuestra pieza fue necesario realizar una preforma, la cual como se menciona, fue lo más asemejada a la geometría final como fuera posible para lograr una adecuada formabilidad. La figura 4 muestra la preforma realizada.

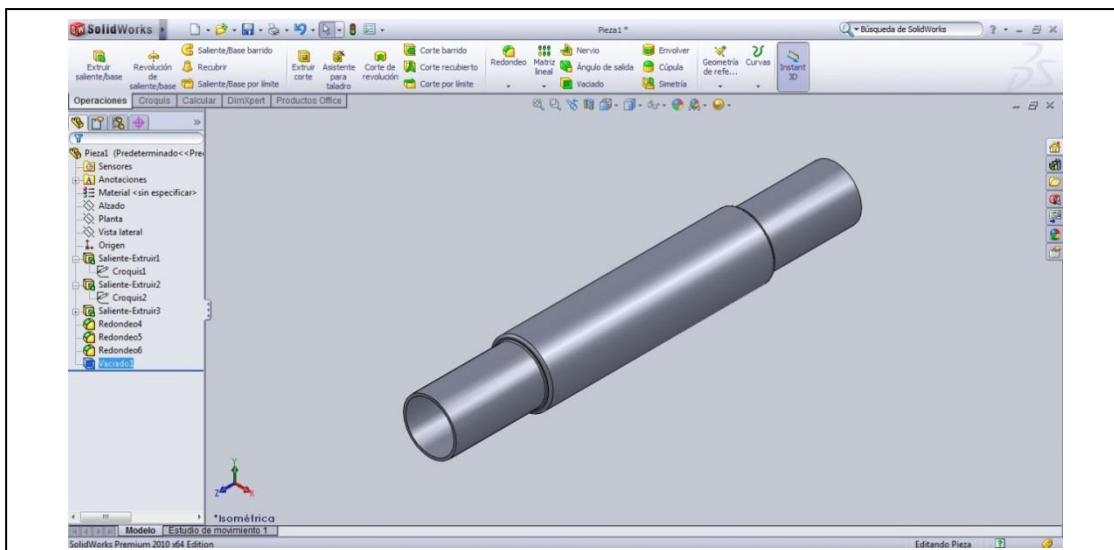


Fig. 4. Pieza a realizar en HyperForm.

Actualmente para llevar a cabo la reducción de espesores de los diferentes componentes metálicos encontrados en un automóvil, como montantes, taloneras, refuerzos laterales, etc. y con un aumento la resistencia al impacto, se están empezando a utilizar los llamados aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steel) (AIMEE, 2008).

Los aceros que actualmente son usados en el sector del automóvil se definen como de alta resistencia HSS (High-Strength Steels) los cuales poseen límites elásticos comprendidos entre 210 y 550 MPa y con una tensión de rotura de entre 270 y 700 MPa. Mientras que otros aceros con límites elásticos mayores de 550 MPa y con tensiones de rotura mayor de 700 MPa son los llamados aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High strength Steels). En la figura 6 se muestran diferentes tipos de estos aceros (AIMEE, 2008).

La principal diferencia entre los aceros convencionales HSS y los avanzados AHSS es su microestructura. Los HSS son monofásicos con una estructura ferrítica, mientras que los AHSS son de múltiples fases, que pueden contener ferrita, martensita, bainita, y / o austenita retenida en cantidades suficientes para producir distintas propiedades mecánicas. Algunos tipos de AHSS tienen una mayor capacidad de endurecimiento dando como resultado unas propiedades resistencia-ductilidad mayor a los aceros convencionales (AIMEE, 2008).

Tabla I. Propiedades mecánicas requeridas de martensita de bajo carbono roladas en caliente y láminas de acero reducidas en frío (Auto/steel Partnership, 2000).

SAE J2340 Grado, Designación y Tipo	Esfuerzo Mínimo a la Cedencia MPa	Esfuerzo a Tension MPa	Elongación Total en 50 mm % mínimo (ASTM.L)
800 M	600	800	2
900 M	750	900	2
1000 M	750	1000	2
1100 M	900	1100	2
1200 M	950	1200	2
1300 M	1050	1300	2
1400 M	1050	1400	2
1500 M	1200	1500	2

En estos aceros se transforma la mayoría de la matriz en martensita durante el proceso de templado conteniendo pequeñas cantidades de bainita y ferrita. Como se puede observar en la figura 8 son los que mayor resistencia mecánica poseen alcanzando valores incluso de hasta 1700 MPa. Es frecuente someterles a un post-calentamiento para reducir su fragilidad y aumentar su conformabilidad ya que de esta forma se aumenta su ductilidad. En estos aceros el carbono es el encargado del aumento de la resistencia mecánica, aunque elementos como el Mn, Si, Cr,... pueden aumentar también esta característica (AIMEE, 2008).

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es inconveniente por las siguientes razones: 1) retarda el flujo en el trabajo, ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto, 2) se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación y 3) el desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da como resultado piezas defectuosas y el reemplazo de la herramienta. Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, el desgaste de las misma es de una mayor importancia (Groover, 2007).

La fricción en el formado de metales es diferente a la que se encuentra en la mayoría de los sistema mecánicos, como trenes de engranes, flechas, cojinetes, etc. Estos casos se caracterizan generalmente por bajas presiones de contacto, temperaturas entre bajas y moderadas, y una lubricación amplia para minimizar el contacto entre los metales. Por el contrario, las condiciones en el formado de metales representan presiones altas entre la superficie dura de la herramienta y la pieza de trabajo suave, deformación plástica del material más suave y altas temperaturas (al menos en trabajo en caliente). Estas condiciones pueden generar coeficientes de fricción relativamente altos en el metal de trabajo, incluso con la adición de lubricantes. Los valores típicos del coeficiente de fricción para el formado de metales para trabajo en frío es 0.1 (Groover, 2007). 0.1 por lo tanto será el coeficiente de fricción a emplear para el estudio.

La magnitud de la presión utilizada en el Hidroformado de baja presión se define arbitrariamente mediante el tubo y la asociación fabricante de tuberías, la cual debe de estar por debajo de los 12,000 psi (83 MPa) (Singh, 2003).

La gama de presiones usadas en el Hidroformado de alta presión es generalmente 12,000 psi (83 MPa) a 60,000 psi (414 MPa). Presiones más altas permiten a la sección de longitud de línea del Hidroformado que se expanda hasta a hasta el límite permitido por la elongación plástica del material (Singh, 2003).

Debido a que el material a emplear es SAE J2340 1000M y este tiene una alta resistencia a la tensión, consecuentemente se necesitarán presiones altas para deformarlo.

Para encontrar la presión necesaria que debe ejercer el fluido en el material para vencer el punto de cedencia, está dada por la siguiente ecuación (Singh, 2003):

$$P_y = \sigma_y [2t_0/(D_0-t_0)] \quad (1)$$

En tanto que el la presión a la que se rasgara el tubo se obtiene con la siguiente ecuación:

$$P_{bursting} = \sigma_u [4t_0/(D_p - t_0)] \quad (2)$$

En donde:

σ_y = esfuerzo de cedencia

σ_u = esfuerzo último

t_0 = espesor inicial del tubo

D_0 = Diámetro inicial

D_p = Diámetro final

Para realizar dicho estudio, primero se realizó una preforma como se indicó previamente en este trabajo, esta fue convertida a superficie y después guardada como archivo IGES, todo esto con ayuda del software SolidWorks 2012.

Posteriormente se creó el herramental, es decir, la matriz superior e inferior en el software SolidWorks 2012, las cuales serán utilizadas subsiguientemente por el software HyperForm para realizar el Hidroconformado. Es de vital importancia mencionar que estas matrices al igual que la preforma son superficies, no geometrías sólidas. Ya por último se guardaron las superficies de las matrices como archivos IGES.

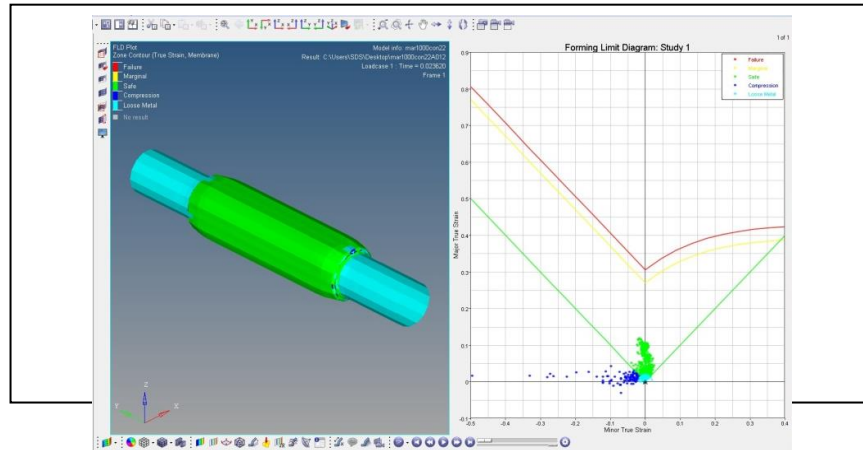
Tabla II. Parámetros utilizados para realizar el estudio.

Nombre del parámetro	Valor del parámetro
Material	SAE J2340 1000M
Coefficiente de Fricción	0.1
Presión (Hidroconformado de Alta Presión)	2000 – 24000 psi
Separación de la Matriz Superior	14 mm
Mallado Max/Min	5/10
Espesor	2.2

III. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A. Análisis de conformabilidad y FLD

El tubo final se muestra en la figura 5, se observa que tiene la forma deseada, no se presentan rasgaduras y tampoco arrugas en la misma. Los puntos dentro de la gráfica FLD se encuentran agrupados y concentrados, lo que indica una deformación uniforme en toda la pieza.



B. Análisis de Porcentaje de Adelgazamiento

Para validar el resultado debe considerarse un estado de esfuerzos bidimensionales en las direcciones Z-Y, ya que el espesor del tubo se mantiene prácticamente constante, como lo muestra la figura 6, en donde el adelgazamiento de la pared es cercano al uno por ciento.

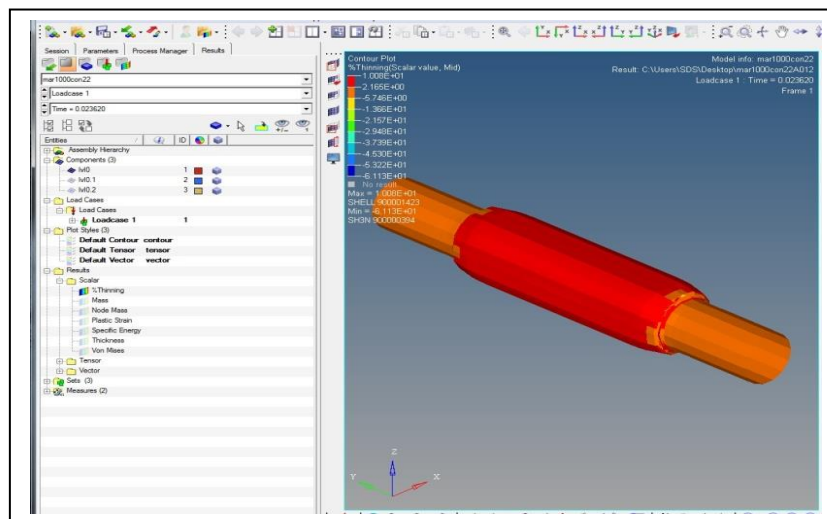


Fig. 6. Resultados del porcentaje de adelgazamiento.

C. Análisis de Esfuerzos de Von Mises

Este estado de esfuerzos bidimensionales se generan un esfuerzo máximo y un esfuerzo mínimo, que de acuerdo a la teoría de falla, deben utilizarse para encontrar un esfuerzo resultante, para un material dúctil como es el que estamos utilizando, se aplica el criterio de Von Mises.

Por lo anterior observamos que existe una deformación plástica permanente en el tubo al rebasar el límite de fluencia de los 960 MPa, que se gráfica en colores verde y amarillo, en la región naranja y las pequeñas partes rojas, se observa que el máximo esfuerzo es de 1,385 MPa, el cual se encuentra por debajo del esfuerzo último del material. Las regiones en donde se localiza el esfuerzo máximo son en el cuello en donde dos radios cambian de dirección

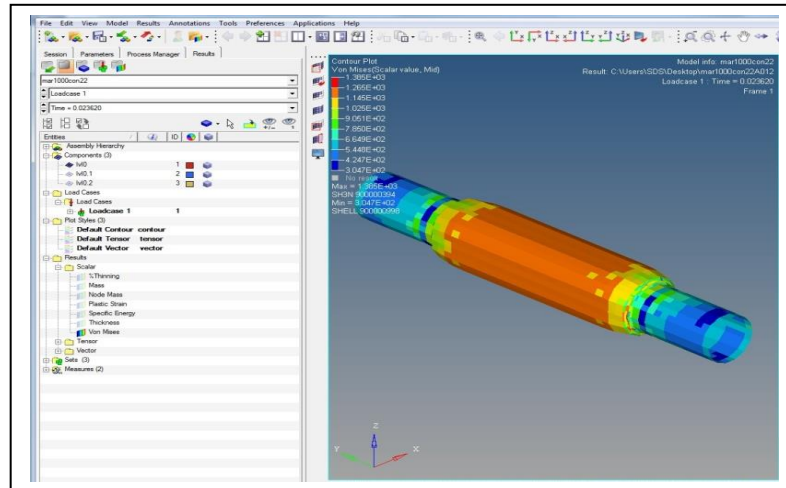


Fig. 7. Resultante de esfuerzos de Von Mises.

REFERENCIAS

- [1] AIMEE. (2008). Aceros Avanzados de alta resistencia AHSS. Instituto Tecnológico Metalmeccánico, 2-11.
- [2] AIMME. (2009). Hidroconformado (Hydroforming) Aproximación a tecnologías emergente. Instituto Tecnológico Metalmeccánico, 1-8.
- [3] Auto/steel Partnership. (2000). Hight Strenght Steel Stamping Design Manual. Auto/steel Partnership, 1-67.
- [4] Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill.
- [5] Gutiérrez Castillo, J. D. (2009). Estudio de la conformabilidad en aceros AHSS y aceros de embutición. Universitat Politècnica de Catalunya, 1-99.
- [6] Keigler, M., Bauer, H., Harrison, D., & De Silva, A. (2004). FE-Simulation of the Thermal Hydroforming Process. DYNAMore GmgH, 1-8.
- [7] Ordoñez Jiménez, J. L. (2012). Hidroconformado una alternativa para el Modelado de Metal. Metal Actual, 38-43.
- [8] Singh, H. (2003). Fundamentals of Hydroforming. United States of America: Society of Manufacturing Engineers.
- [9] Wilson, R. (2004). Forum for Hydroforming. Automotive Industries, 41-42.