



DETERMINACIÓN DE LA FUERZA DE PISADO EN EL EMBUTIDO DE CHAPAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Reynier Febles García, Marcelino Rivas

*Centro de Estudio en Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas
Autopista a Varadero km 3½, Matanzas 44740, Cuba. Teléf.: + (53) (45) 25 6783.*

Resumen: El proceso de conformación de chapa juega un papel clave dentro de la industria de manufactura mecánica, especialmente dentro de la fabricación de recipientes metálicos a presión. La determinación del régimen de trabajo es un aspecto clave para lograr la eficiencia de estos procesos; sin embargo, los estudios experimentales son lentos y costosos. En el presente estudio, se llevó a cabo la simulación por el método de los elementos finitos de un proceso de conformación en frío de chapa, analizando la influencia de la fuerza de pisado en el proceso con el objetivo de determinar la fuerza de pisado adecuada se realizaron simulaciones a diferentes valores en un rango de (16-70 kN), arrojando los mejores resultados para 20 kN de fuerza de pisado. El material de la chapa usado fue acero JIS 3116 SG255. La validación se realizó a través del espesor de la chapa del cilindro. Realizándose mediciones a diferentes alturas y comparándose los valores simulados con los experimentales, se obtuvo un error medio del 8.88 %.

Palabras claves: simulación, método de elementos finitos, embutido, espesor.

Abstract: The sheet forming process plays a key role in mechanical manufacturing industry, especially in metal pressure vessels production. The determination of the working regime is a key to efficiency of these processes; however, experimental studies are slow and expensive. In the present study, a finite element method simulation was applied a cold forming process sheet, analyzing the influence of the tread force in the process in order to determine the appropriate tread force Performed simulations at different values in a range of (16-70 kN), yielding the best results for 20 kN of treading force. The sheet material used was JIS 3116 SG255 steel. Validation was performed through the thickness of the cylinder plate. When measurements were taken at different heights and the simulated values were compared with the experimental values, an average error of 8.88 % was obtained.

Keywords: simulation, finite element method, drep drawing, thickness.

1. Introducción

La determinación de los parámetros de trabajo del proceso de embutido es un factor decisivo en la calidad de la pieza a elaborar. Una selección no adecuada de la fuerza de pisado puede provocar un flujo incorrecto del material, durante los procesos de embutido dando lugar a defectos tales como arrugas causadas por una insuficiente fuerza de pisado o la propia rotura (desgarramientos) causada por una fuerza excesiva (Patel, 2008). Uno de los problemas actuales consiste en la obtención de los parámetros adecuados del proceso, lo que implica la

necesidad de contar con modelos robustos de los fenómenos físicos que tienen lugar en dichos procesos, lo cual requiere a su vez de la realización de experimentos que suelen ser lentos y muy costosos. Estos ciclos pueden ser reducidos por medio de análisis de aproximación numérica. Los primeros intentos de soluciones numéricas del conformado de la chapa metálica tienen lugar sobre la década de los años 60. En este sentido un gran avance en la solución de problemas en el proceso de conformado de la chapa utilizando soluciones numéricas fue el método de elementos finitos (MEF) (Govik, *et al.*, 2012; Nasser, *et al.*, 2010). Los primeros trabajos fueron realizados por (Gotoh y Ishise, 1978), donde utilizaron un comportamiento del material elastoplástico; no siendo así en el caso de (Wang y Budiansky, 1978; Wifi, 1976) que emplearon una ley plástico-rígido. Las primeras aplicaciones en 3D son conocidos por (Tang, *et al.*, 1982; Toh y Kobayashi, 1983). Teniendo sus inicio los métodos explícitos dinámicos en el estudio de (Belytschko y Mullen, 1977).

El método de elementos finitos permite obtener información sobre las fuerzas, esfuerzos, deformaciones y otros parámetros de importancia en el proceso, por lo que ha sido investigado por diferentes autores (Dixit y Dixit, 1997). Se fundamenta en dos formulaciones: la Eulerian y la Lagrangian. En la primera se analiza el control del volumen del material y en la segunda el análisis se realiza a partir de las características del material sin tener en cuenta el control del volumen.

El modelo del material, así como los valores de las constantes y exponentes son aspectos muy importantes. En su trabajo (Chung, *et al.*, 2014), proponen un modelo visco plástico para el material usando elementos tetraédricos MINI-lineales. De igual forma (Arfa, *et al.*, 2013), consideran un modelo elastoplástico para aleaciones de aluminio y realizaron el análisis por MEF de un proceso de deformación incremental utilizando el software ABAQUS.

La mayor parte de los modelos de metales consideran el material como isotrópico, que puede en ocasiones no ser realista. En el trabajo de chapas metálicas con anisotropía normal el alto valor de la tensión de flujo en la dirección del espesor y un bajo valor de esta tensión en el plano es deseable para evitar la en la operación de embutición profunda. Sin embargo, la anisotropía planar (es decir, la variación de la tensión de flujo en el plano con la orientación) produce defecto en la pieza embutida (Dixit y Dixit, 1997).

Con su estudio (Gantar y Kuzman, 2002) demostraron que en el caso de la simulación por elementos finitos del proceso de embutido, los parámetros del proceso más importantes son: las propiedades del material (coeficiente de endurecimiento, límite de fluencia, constante del flujo de esfuerzos, coeficiente de anisotropía y coeficiente de fricción (μ)). También (Ledoux, *et al.*, 2010) llegaron a la conclusión de que el coeficiente de fricción es el parámetro que más influye en los resultados de la simulación, con más del 60 %, mientras que la variabilidad del material presenta una influencia de más del 30 %, según sus investigaciones el límite de fluencia casi no muestra influencia.

Diversos productos de software han sido utilizados para simular el proceso de embutición a través del método de elementos finitos. Dentro de ellos cabe destacar el DYNAFORM (Jie, *et al.*, 2015; Lindeberg, 2012), ANSYS LS-DYNA (Ankenas y Barauskas, 2006; Lora, *et al.*, 2013), ABAQUS (Ayed, *et al.*, 2014; Hagenah, *et al.*, 2013), STAMPAK (Bernal, 2013) y DEFORM-3D (Poláková y Zemko, 2012).

El trabajo realiza la selección de fuerza de pisado para un proceso de embutido de acero JIS 3116 en la fabricación de recipientes a presión empleando el método de los elementos finitos. El mismo está dividido en cuatro secciones: introducción, materiales y métodos, análisis de los resultados, conclusiones y bibliografía.

2. Materiales y métodos

2.1. Ensayos del material utilizado

El material utilizado para la simulación del proceso de embutido fue el JIS 3116 SG255, el mismo es muy usado en la industria para la fabricación de cilindros de gas licuado. Para la determinación de su composición química se un análisis mediante un Espectrómetro LECO de descarga luminiscente del cual se obtuvo como resultado los elementos expuestos en la (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química real

Elemento	Fe	Si	Al	Si	Mn	C	S
%W	99.41	0.32	0.056	0.040	0.204	0.0170	0.008

Para obtener las propiedades mecánicas del material, así como los datos necesarios para el modelo de flujo de tensiones se realizaron ensayos de tracción acorde con ASTM E-8M (ASTM, 2013). El equipo utilizado fue la prensa de ensayo mostrada en la figura 1. Los ensayos fueron realizado a una velocidad de 50 mm/ min y los resultados fueron introducidos en forma de tabla en el software DEFORM-3D. El espesor de la chapa fue de 2.2 mm. El límite de fluencia obtenido fue de 242 MPa, módulo de Young de 210 GPa y el coeficiente de Poisson de 0.3



Figura 1. Equipo y probetas utilizadas en los ensayos de tracción.

2.2. Simulación por elementos finitos.

Los parámetros geométricos utilizados en la simulación se muestran en la figura 2. El material de la chapa fue considerado totalmente plástico y el punzón, la matriz y el pisador como rígido.

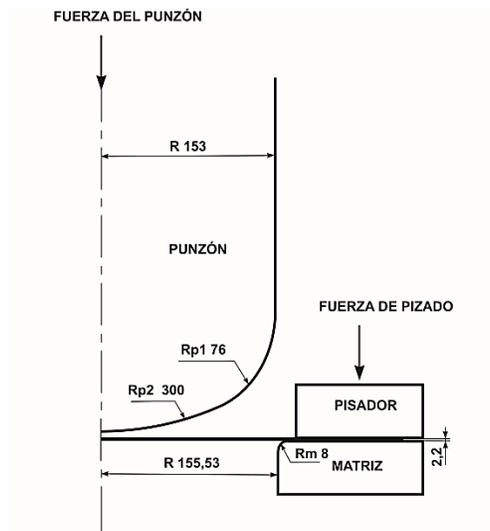


Figura 2. Geometría utilizada para la simulación.

Para simplificar el problema el material fue considerado isotrópico. Después de realizar varias simulaciones se concluyó que los mejores resultados se obtenían con el tipo de malla hexaédrica con 2410 elementos y 5084 nodos. El desplazamiento fue permitido solo en el eje Z con una velocidad de 30 mm/s coincidiendo con la velocidad empleada en la empresa. La cantidad de pasos de simulaciones fue de 1000 pasos. Los límites de convergencia fueron para la velocidad de 0.005 mm/s y para la fuerza de 0.05 N. La temperatura se mantuvo constante a 20 °C debido a que el proceso se realiza en frío. La ley utilizada para el coeficiente de fricción (μ) fue Coulomb con un valor constante de [0.15]. La fuerza de pisado se varió en el rango de (16 - 70 kN) con el fin de determinar el valor de fuerzas donde se obtuviera un menor adelgazamiento de las paredes del recipiente sin ocurrir defectos en la pieza terminada. El rango fue obtenido a partir de cálculos teóricos. Empleando para la solución el método de iteración directa hasta las 350 iteraciones y luego método híbrido.

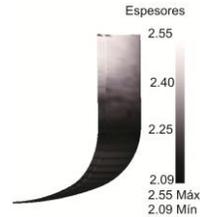
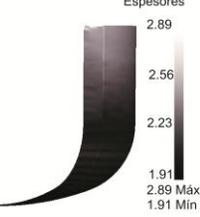
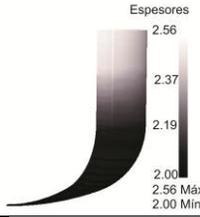
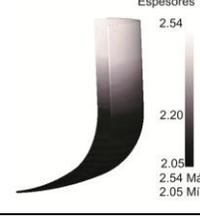
3. Análisis de los resultados.

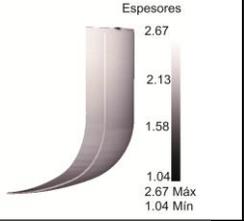
A partir de los ensayos de tracción se obtuvieron valores experimentales de tensión y deformación a distintas velocidades de deformación. Valores estos que fueron introducidos mediante tablas en la lista de materiales que es una de las opciones que nos brinda el software para añadir un nuevo material a su librería ya que este no cuenta con los datos del acero JIS 3116.

3.1. Criterio de selección.

Se aplica como criterio de selección de la fuerza de pisado, basándonos en el mínimo adelgazamiento de la pared del cilindro, normado para un valor de 0.22 mm sin que ocurran defectos en la pieza terminada. Para ello se realizaron 7 simulaciones con distintas fuerzas de pisados [16 – 70 kN]. En la (Tabla 2) podemos observar los resultados de las simulaciones, apreciándose que para una fuerza de 16 y 70 kN respectivamente ocurren defectos en el embutido, por lo cual estos valores no son recomendados para la fabricación de los recipientes. Por otra parte para un valor 20 kN se obtienen los mayores espesores, con un valor mínimo de 2.09 mm en la zona del recipiente cercana al radio de 76 mm. Siendo esta la zona más crítica del cilindro debido a que se encuentran los menores valores de espesores de pared.

Tabla 2. Resultados de las simulaciones para distintas fuerzas de pisado.

Exp	Fpisado (kN)	S _{mín} (mm)	Fe máx (N)	T (seg)	Gráfico espesores	Defecto
1	16	-	-	-		Pliegues o arrugas
2	20	2,09	212678,6	3,67		- Espesor Mín 2.09
3	24	1,91	217796,23	3,83		Espesor Mín 1.91
4	32	2,03	195573,87	3,75		
5	44	2,02	196747,03	3,58		

6	68	1,04	194827,70	3,76		Espesor Mín 1.04
7	70	-	-	-		Rotura

A continuación se realiza un análisis del comportamiento de las tensiones, deformaciones y adelgazamiento para la fuerza de 20 kN.

Como se puede apreciar en la (Figura 3) los mayores valores de tensión bajo los cuales estará sometido el material se alcanzan en los últimos segundos del proceso cuando el punzón tiene que hacer fluir entre el y la matriz una cantidad de material mayor a el juego entre estos. Esto se debe a que durante el proceso gran parte del material estirado se traslada hacia la parte de arriba del recipiente provocando un aumento del espesor del material y a su vez un aumento de las tensiones.

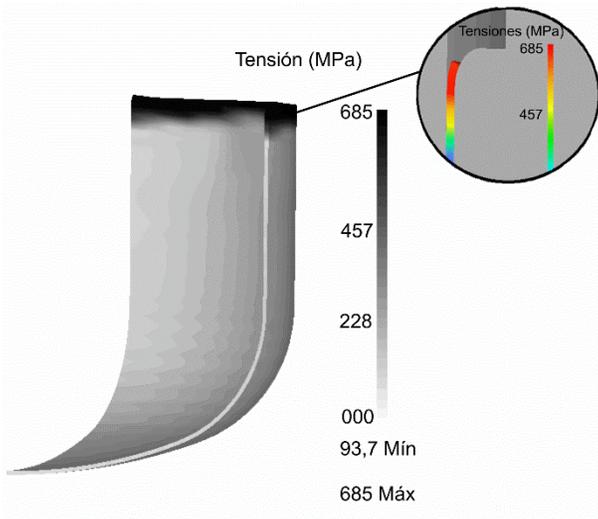


Figura 3. Distribución de tensiones para 20 kN de fuerza

En el proceso de embutido las deformaciones que ocurren para lograr obtener las piezas son generalmente grande. En la (Figura 4) se puede observar que para la fabricación de los cilindros empleando el acero JIS 3116, para el cual los valores de deformación oscilan entre 0,0262 mm y 0,678 mm. Situándose las mayores deformaciones en la parte superior debido a la acumulación del material desplazado, el cual en ocasiones supera el juego entre punzón y matriz provocando un aumento de la fuerza de embutido en ese instante.

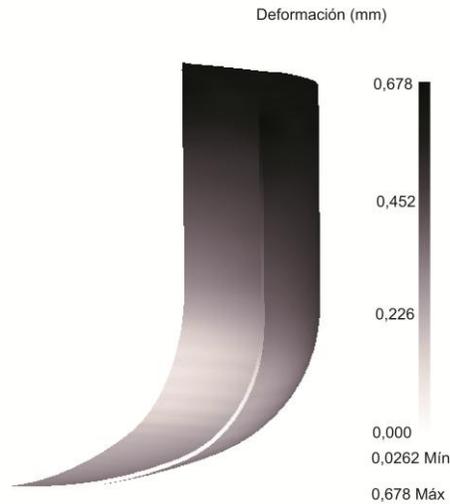


Figura 4. Deformaciones presentes en el material para 20 kN de fuerza

Durante la elaboración de recipientes a presión uno de los parámetros más importantes que se debe tener en cuenta es el espesor de la pared o adelgazamiento. Aspecto este que está estrechamente relacionado con las normas de seguridad. En el caso de estudio, esta normado como mínimo valor de espesor de pared 1,98 mm. En la (Figura 5) podemos apreciar que según las simulaciones el mínimo valor de espesor que se debe obtener para los parámetros especificados del proceso es 2,09 mm, cumpliendo con lo normado para su comercialización.

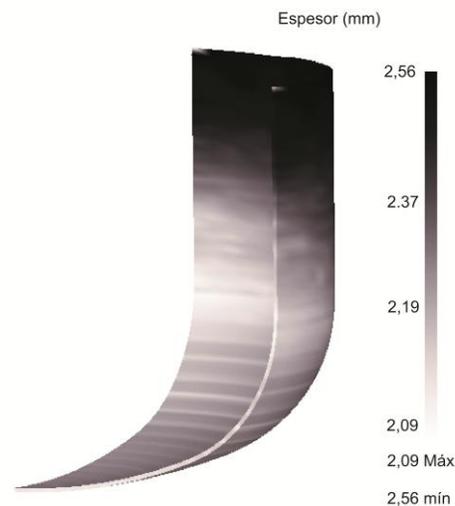


Figura 5. Relación de espesores para 20 kN de fuerza

3.1. Validación.

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos, el embutido fue realizado en una prensa modelo YC 28-200/300, el lubricante utilizado fue la grasa ETIRELF T 474-FE/B de acuerdo con ISO 6743/7 (Figura 6). Los espesores se midieron con el medidor ultrasónico modelo Dakota Ultrasonic con cabezal de doble cristal y una frecuencia de 5 MHz.



Figura 6. Proceso de embutido a escala industrial

La comparación entre los valores simulados y los obtenidos del proceso real se muestran en la Figura 7, donde se puede apreciar que el error relativo máximo obtenido fue de 8.88 % para un valor de H de 60 mm, por otra parte, se observa que los valores máximos de espesor se obtienen en la parte superior del cilindro, mientras que los espesores mínimos fueron obtenidos en la zona donde comienza el radio del recipiente. Este fenómeno se manifiesta también en el resultado del proceso real de embutido.

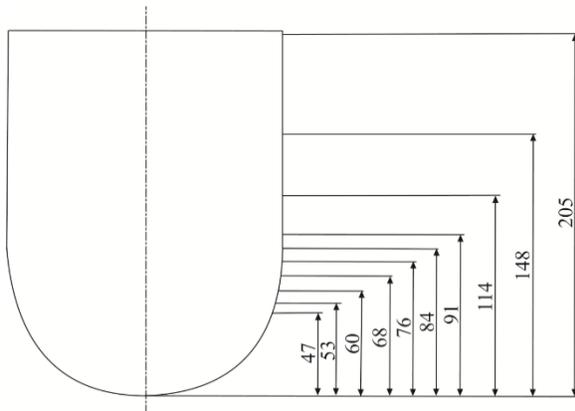


Figura 8. Mediciones experimentales de espesores.

No. mediciones	Altura (mm)	Espesor real (mm)	Espesor sim. (mm)
1	202	2,53	2,53
2	148	2,26	2,30
3	114	2,15	2,16
4	91	2,08	2,11
5	84	2,05	2,10
6	76	2,01	2,09
7	68	1,98	2,09
8	60	1,99	2,14
9	53	2,08	2,10
10	47	2,15	2,16

Tabla 3. Validación de los experimentos.

En la (Figura 9) podemos apreciar el comportamiento del espesor a distintas alturas del recipiente. Observándose las mayores diferencias de espesores entre el real y simulado cercanas a los 60 mm de altura que coincide con la zona de curvatura del cilindro, lugar donde ocurren los mayores adelgazamientos de las paredes.

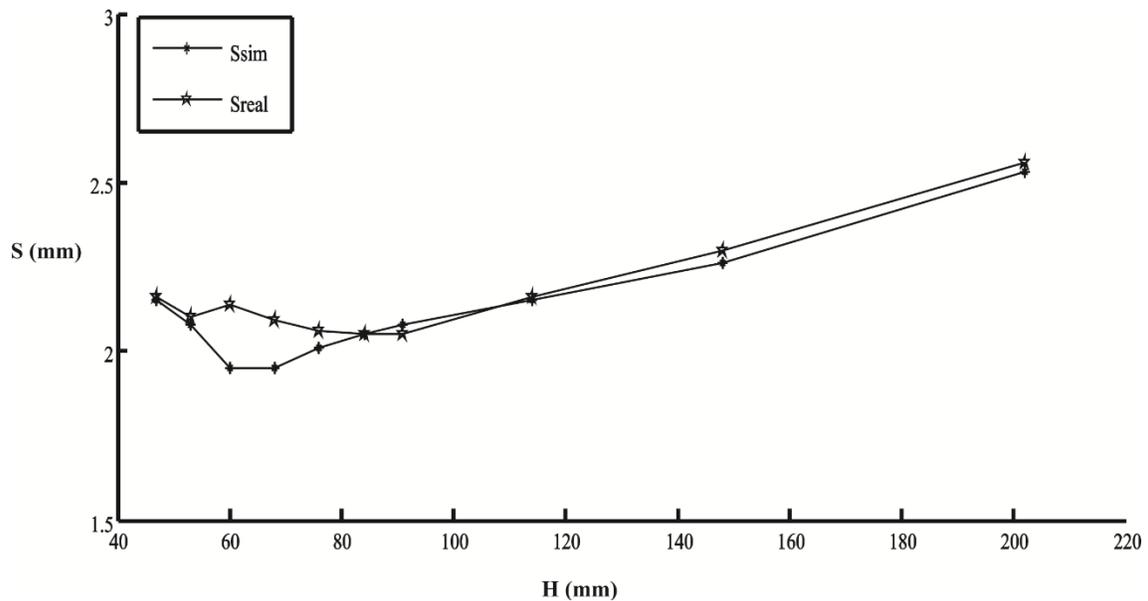


Figura 9. Resultado de la validación.

4. Conclusiones

Con el empleo del método de los elementos finitos se logró seleccionar la fuerza de pisado para el material JIS 3116 SG255. Determinando la zona de tensiones máximas en el instante que ocurre el desplazamiento por el radio de la matriz, siendo esto de vital importancia para el cálculo de desgaste de la matriz.

Para valores de fuerzas de pisado menores de 16 kN ocurren defectos (arrugas) debido a que la fuerza que ejerce el pisador no es suficiente para mantener el material plano durante el desplazamiento provocado por el punzón. No siendo así 70 kN donde ocurre la rotura del recipiente debido a que se limita el movimiento del material provocando su rotura.

Luego de realizar la validación de los resultados para la fuerza de pisado determinada (20 kN) como la más adecuada para el proceso, tenemos un error medio del 8,88 % entre los valores simulados y los reales del proceso.

Entre los parámetros de mayor influencia en la simulación tenemos, el tamaño de la malla, el coeficiente de fricción y el modelo constitutivo del material, por lo cual, en futuros trabajos, se debe prestar especial atención.

Referencias

- Ankenas, R. ; Barauskas, R., 2006. "Finite element investigation on parameters influencing the springback during sheet metal forming". *Mechanika*, 5, pp. 57-61.
- Arfa, H.; Bahloul, R. ; BelHadjSalah, H., 2013. "Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of

parts ". *International Journal of Material Forming*, 6, pp. 483–510, DOI: doi: 10.1007/s12289-012-1101-z.

ASTM, 2013. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. USA: West Conshohocken.

Ayed, L.; Robert, C.; Delamézière, A.; Nouari, M. ; Batoz, J., 2014. "Simplified numerical approach for incremental sheet metal forming process". *Engineering Structures*, 62-63, pp. 75-86, DOI: doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.033. .

Belytschko, T. ; Mullen, R., 1977. "Explicit integration of structural problems". *Finite Elements in Nonlinear Mechanics*. Tapir, Trondheim, Norway, pp. 672-720.

Bernal, Y., 2013. *Planeación asistida y simulación numérica de los procesos de embutición cilíndrica sin reborde y rectangular con pestaña* Tesis de doctorado. Las Villas Universidad central "marta abreu" de las villas

Chung, W.; Kim, B.; Lee, S.; R., H. ; Mansoo, J., 2014. "Finite element simulation of plate or sheet metal forming processes using tetrahedral MINI-elements". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (1), pp. 237-243, DOI: doi: 10.1007/s12206-013-0959-0.

Dixit, U.S. ; Dixit, P., 1997. "A study on residual stresses in rolling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37, pp. 837–853.

Gantar, G. ; Kuzman, K., 2002. "Sensitivity and stability evaluation of the deep drawing process". *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126, pp. 302–308, DOI: doi: 10.1016/s0924-0136(02)00334-5.

Gotoh, M. ; Ishise, F., 1978. "A Finite element analysis of rigid-plastic deformation of the flange in a deep-drawing process based on a fourth-degree yield function". *International Journal of Mechanical Sciences*, 20, pp. 423-435, DOI: doi: 10.1016/0020-7403(78)90032-2.

Govik, A.; Nilsson, L. ; Moshfegh, R., 2012. "Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly". *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (7), pp. 1453-1462, DOI: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.012.

Hagenah, H.; Geiger, M. ; Merklein, M., 2013. "Numerical Simulation to Improve Robustness in Sheet Metal Forming Process Chains". *The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*. vol. 1532, pp. 683-688.

Jie, Z.; Fang, Z.; Lei, H. ; Yan, L., 2015. "Multi-objective optimization of stamping forming process of head using Pareto-based genetic algorithm". *Journal of Central South University*, 22, pp. 3287–3295, DOI: 10.1007/s11771-015-2868-0.

Ledoux, Y.; Sébastien, P. ; Samper, S., 2010. "Optimization method for stamping tools under reliability constraints using genetic algorithms and finite element simulations". *Journal of Materials Processing Technology* 210, pp. 474–486, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.10.010.

Lindeberg, F., 2012. *Sheet metal forming simulations with FEM*. Master thesis. Umeå: Umeå University.

Lora, F.; Boff, U.; Yurgel, C.; Folle, L. ; Schaeffer, L., 2013. "Validation of the computer simulation process applied to the incremental forming process for the evaluation of strain paths". *Key Engineering Materials*, 554-557 (2453-2461), DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.2453.

Nasser, A.; Yadav, A.; Pathak, P. ; Altan, T., 2010. "Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile

and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests". *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 429–436, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.10.003.

Patel, H., 2008. "Optimization of an aerospace component die design using metal forming simulation capability of hyper-form". *Hyper-works Technology conference(HTC)*. pp. 1-8.

Poláková, I. ; Zemko, M., 2012. "FEM simulation of strips cold rolling in DEFORM 3D". *Recent trends in structural materials*. Plzen, Czech Republic, EU, vol. 11, pp. 21-22.

Tang, S.; Chu, E. ; Samanta, S., 1982. "Finite element prediction of the deformed shape of an automotive body panel during preformed stage". *En NUMIFORM'82*. Pineridge Press, Swansea, pp. 629-640.

Toh, C.H. ; Kobayashi, S., 1983. "Finite Element Process Modeling of Sheet Metal Forming of General Shapes". *En Grundlagen der Umformtechnik I*. Berlin, Heidelberg, vol. 74, pp. 39-56.

Wang, N. ; Budiansky, B., 1978. "Analysis of sheet metal forming by finite element method". *Jorunal of Applied Mechanics*, 45, pp. 73.

Wifi, A., 1976. " An incremental complete solution of the stretch-forming and deep-drawing of a circular blank using a hemispherical punch". *International Journal of Mechanical Sciences.*, 18, pp. 23-31, DOI: doi: 10.1016/0020-7403(76)90071-0.