



INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DEL MALLADO EN LA SIMULACIÓN DEL CONFORMADO DE CHAPA POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Teresa Pérez-Sosa¹, Víctor M. Llorens², Ramón Quiza³

^{1,2,3} Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS). Universidad de Matanzas. Autopista a Varadero km 3½, Matanzas, Cuba. Web: <http://cefas.umcc.cu>, Teléf.: +(53)45256812
¹e-mail: teresa.perez@umcc.cu, ²e-mail: victor.llorens@umcc.cu, ³e-mail: ramon.quiza@umcc.cu

RESUMEN

La simulación por el método de elementos finitos del proceso de conformado de la chapa juega un papel fundamental tanto en el diseño como en el monitoreo de la fabricación de recipientes a presión. A pesar de ser la densidad del mallado uno de los factores que más influyen en la calidad de los resultados de la simulación, no existe un fundamento teórico en que pueda basarse su selección. En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio de la relación entre la densidad del mallado de la pieza, y la precisión de la fuerza máxima de prensado, en la simulación de un proceso de conformado de chapa. En la misma, se utilizó un modelo bidimensional con simetría axial. Se ejecutaron simulaciones con diferentes valores de densidad de mallado, obteniendo las correspondientes fuerzas máximas de prensado. La relación entre ambas variables fue modelada utilizando regresiones no lineales, con diversas bases funcionales. El mejor resultado se obtuvo para una función de comportamiento asintótico hacia un punto que refleja el valor real del parámetro modelado.

PALABRAS CLAVES: Elementos finitos; Conformado de chapa; Mallado.

INFLUENCE OF THE MESH DENSITY IN THE SIMULATION OF A SHEET FORMING PROCESS BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

Finite element-based simulation of sheet forming plays an important role in both designing and monitoring of pressurized vessels manufacturing. In spite of the influence of the mesh density in the quality of simulation results, there is not a theoretical foundation which can be used for selecting the proper values. This work presents a study of the relationship between the part mesh density and the accuracy of the maximum pressing force, in the simulation of a sheet forming process. An axisymmetric bi-dimensional model was used. Simulations were carried out with different mesh density values, obtaining the corresponding maximum pressing forces. Relationship between both variables was modeled by using non-linear regressions, with different functional bases. The best outcomes were obtained for a function with an asymptotic trend to a point which depicts the actual value of the modeled parameter.

KEY WORDS: Finite elements; Sheet forming; Meshing.

1. INTRODUCCIÓN

El conformado de chapa es una importante operación tecnológica, jugando un papel clave en la fabricación de una amplia gama de productos, dentro de los que se destacan los recipientes metálicos a presión [1]. La simulación de este proceso, utilizando el método de elementos finitos, juega un papel clave, al posibilitar la modelación y optimización del proceso, sin necesidad de recurrir a una experimentación altamente costosa y lenta [2],

El método de elementos finitos permite resolver, de forma aproximada, un importante grupo de problemas que tienen, como característica común, el estar definidos mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales [3]. Esto lo logra discretizando el dominio espacial en unidades simples llamadas elementos, e interpolando los desplazamientos (y, por lo tanto, las deformaciones y tensiones) en los puntos de dichos elementos, a partir de los desplazamientos que ciertos puntos notables, denominados nodos [4].

La estructura de elementos y nodos recibe el nombre de malla [5], y su configuración ejerce una influencia significativa en la calidad de los resultados del método de elementos finitos [6]. Está bien establecido que el error de discretización, en la solución de un problema por el método de elementos finitos, disminuye según aumenta el número de elementos [7], pero, a la vez, aumenta significativamente el costo computacional de la solución [8]. El mallado más conveniente se suele determinar, buscando un equilibrio entre calidad de los resultados y costo computacional, incrementando iterativamente la cantidad de elementos, hasta lograr una convergencia aceptable de los resultados a un valor [9-12].

En el caso de problemas donde interviene la deformación plástica, como ocurre en la simulación de los procesos de conformado [13], se incrementa la complejidad numérica de la solución, ya que los modelos constitutivos de los materiales introducen no linealidades en el método de elementos finitos [14].

En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio de la convergencia del método de elementos finitos, en la simulación de un proceso de conformado de chapa, analizando la relación entre la cantidad de elementos del mallado y los valores obtenidos para la fuerza máxima de conformado.

2. DEFINICIÓN DEL MODELO

El proceso analizado fue el conformado de una chapa de acero AISI 1010, para la elaboración de una de las mitades del cilindro de gas licuado de petróleo de 10 kg. El proceso se lleva a cabo con una chapa de 2,2 mm de espesor y 530 mm de diámetro, sobre la que actúa un punzón de 306 mm de diámetro, que entra en una matriz de 311 mm de diámetro interior, con un redondeo de 8 mm en su borde. La chapa se mantiene unida a la matriz, mediante un pisador sobre el que actúa una fuerza de 1000 N. En la Fig. 1 se muestran las dimensiones de todos los elementos que intervienen en el proceso.

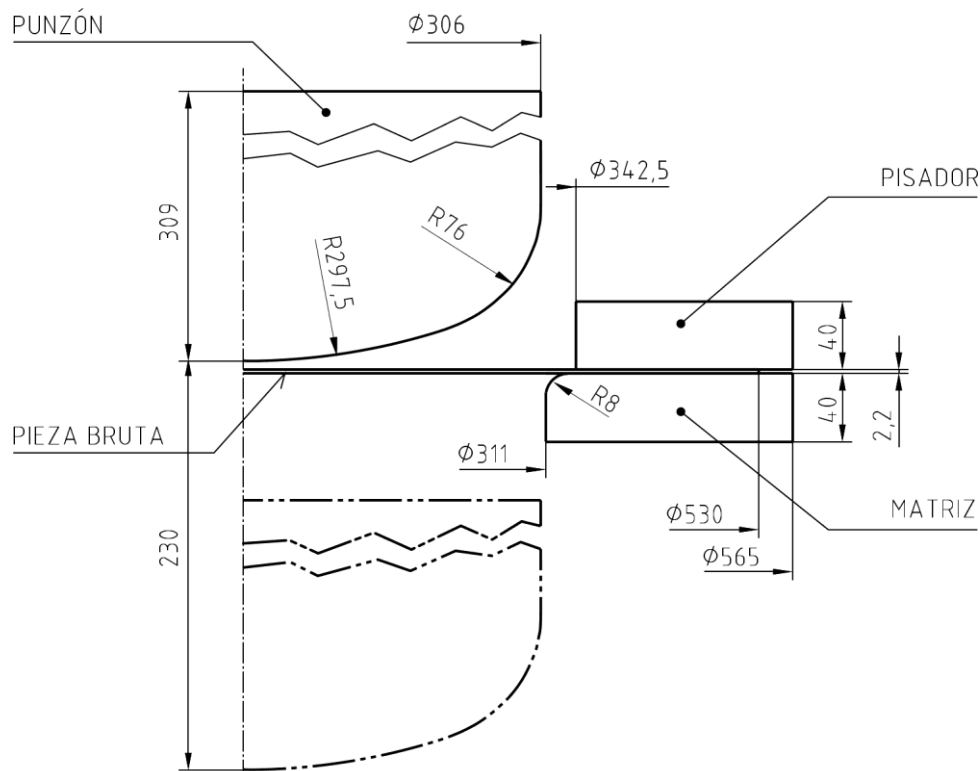


Figura 1: Geometría del proceso de conformado de chapa analizado

En la simulación, el comportamiento del material de la pieza se consideró perfectamente plástico, con un modelo de plasticidad dado por los valores de tensiones equivalentes, en función de las deformaciones y velocidades de deformaciones, que se muestran en la Fig. 2. Se consideró que el punzón, la matriz y el pisador son perfectamente rígidos.

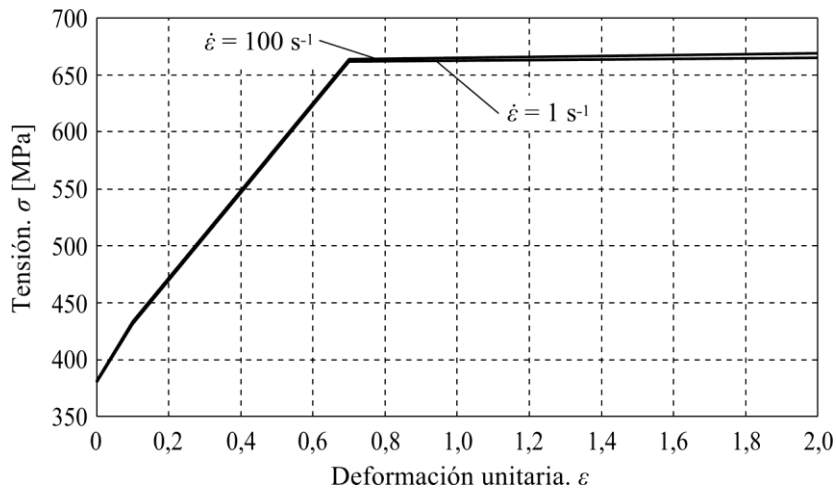


Figura 2: Comportamiento plástico del material considerado (acero AISI 1010)

Se consideró un desplazamiento del punzón de 230 mm, a una velocidad de 50 mm/s. El coeficiente de fricción entre los diferentes elementos, se tomó como 0,08.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para analizar la convergencia, se comenzó por un mallado de, aproximadamente, 1000 elementos, el cual se fue incrementando de 1000 en 1000 hasta lograr una estabilidad en los valores de fuerza máxima de conformado. En la Fig. 3 se muestra, gráficamente, el proceso de simulación para la malla más basta, para cuatro instantes del proceso.

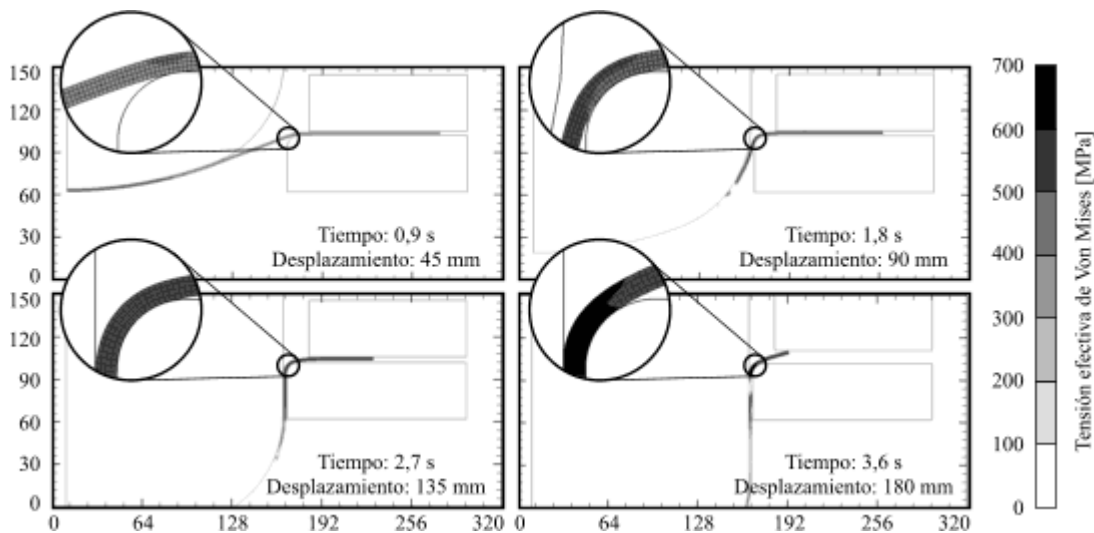


Figura 3: Simulación del proceso de conformado, para la malla más basta

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de la fuerza de conformado durante el recorrido del punzón, en la simulación. Como se puede observar, a partir de los 90 mm se produce una estabilización en el intervalo (500 ... 750) kN para, en los últimos 30 mm del recorrido, alcanzar un pico cercano a los 1500 kN.

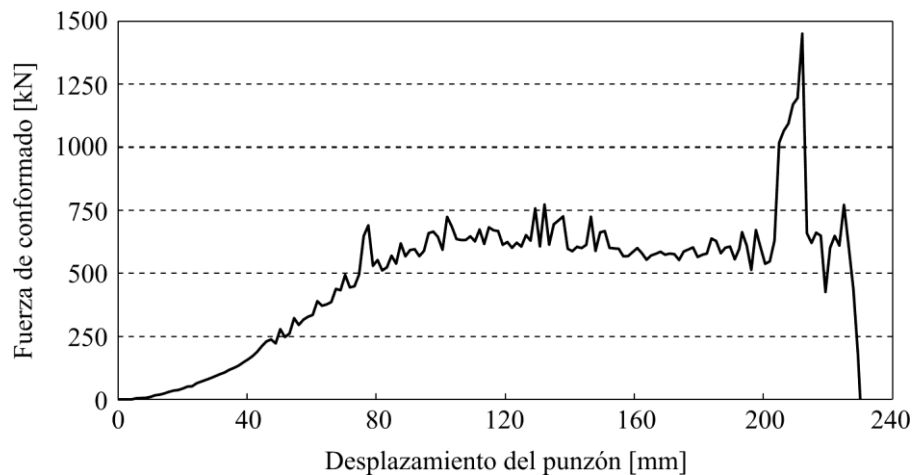


Figura 4: Comportamiento de la fuerza durante la simulación, para la malla más basta

De modo similar se procede con las restantes mallas. En la Tabla 1 se muestran las características de la malla, dadas en valores del número de elementos, N_E , y de nodos, N_N , y los correspondientes los valores máximos de la fuerza de conformado, F_{max} . Como se puede observar, según se incrementa la calidad del mallado, disminuyen los valores predichos para la fuerza máxima de conformado.

Tabla 1: Resultados de la simulación para las diferentes mallas

No.	Mallado		Fuerza máxima de conformado, F_{max} [kN]
	Cantidad de elementos, N_E	Cantidad de nodos, N_N	
1	1041	1392	1450
2	2004	5210	1283
3	3694	4415	1151
4	6070	6978	1085
5	8318	9415	1057

Con el objetivo de analizar la tendencia en la relación entre la cantidad de elementos y la fuerza máxima de conformado, se ajustó una regresión no lineal, con tres coeficientes, con la forma:

$$F_{max} = b_1 + b_2 \exp\left(-\frac{N_E}{b_3}\right). \quad (1)$$

Los coeficientes fueron estimados por el método iterativo de Marquard, partiendo de valores para los coeficientes $b_1 = b_2 = b_3 = 1000$. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para dichos coeficientes con sus correspondientes intervalos para un 95% de confiabilidad. El modelo presenta un coeficiente de determinación de 99,9% (99,8% ajustado para los grados de libertad), un error estándar de los estimados de 6,591 y un error absoluto medio de 3,987.

El análisis de los residuales mostró que sólo el quinto punto (con un valor normalizado por t -Student de $-2,06$) está fuera del intervalo $(-2 \dots 2)$, aunque no de $(-3 \dots 3)$, por lo que se decidió, en vista del pequeño tamaño de la muestra, mantenerlo en el modelo.

Tabla 2: Valores e intervalos de confianza de los coeficientes de modelo

Coeficiente	Estimado	Intervalo para un 95% de confiabilidad	
		Límite inferior	Límite superior
b_1	1054	1025	1083
b_2	691,8	590,3	793,2
b_3	1847	1373	2321

El modelo ajustado toma, entonces, la expresión:

$$F_{\max} = 1054 + 691,8 \exp\left(-\frac{N_E}{1847}\right); \quad (2)$$

y su comportamiento se grafica en la Fig. 5. Como se puede observar, el modelo tiene un comportamiento asintótico hacia el valor estimado de la fuerza máxima de conformado.

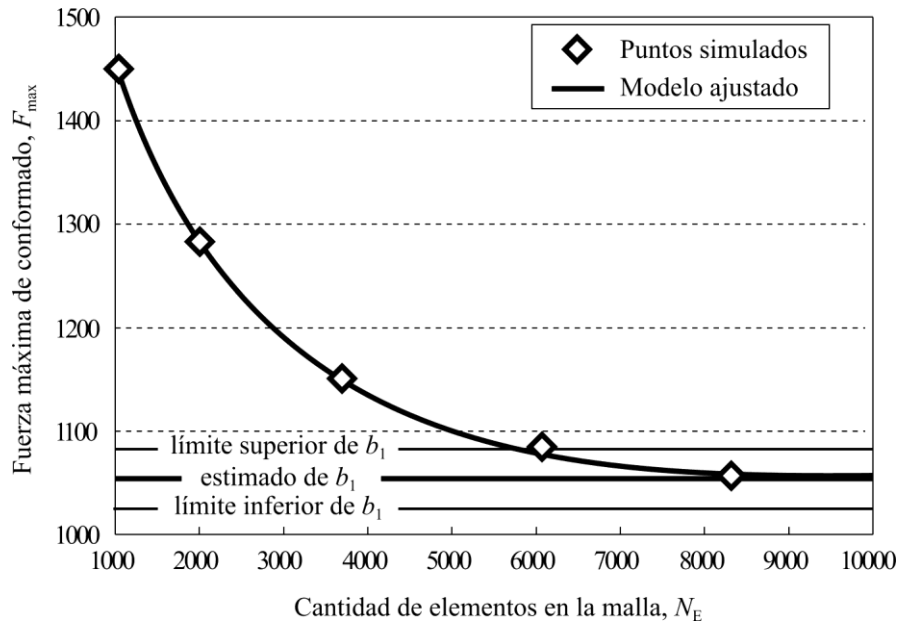


Figura 5: Modelo ajustado para la fuerza máxima de pisado vs. la cantidad de elementos en la malla

Para conocer el valor real estimado para la fuerza máxima de conformado, se calcula el límite de la expresión (1), para valores muy altos del número de elementos, es decir:

$$F_{\max}^{\text{estimada}} = \lim_{N_E \rightarrow \infty} \left(b_1 + b_2 \exp\left(-\frac{N_E}{b_3}\right) \right) = b_1; \quad (3)$$

por lo cual, y teniendo en cuenta los intervalos de confianza para los coeficientes (ver Tabla 2), el valor estimado de la fuerza máxima de conformado será:

$$F_{\max}^{\text{estimada}} = (1054 \pm 29) \text{ kN}; \quad (3)$$

lo que representa una variabilidad de 2,8%.



4. CONCLUSIONES

En primer lugar, debe concluirse que fue posible modelar el proceso de conformado de la chapa mediante un modelo de elementos finitos con un enfoque lagrangiano-euleriano arbitrario. Mediante el mismo fue posible predecir el comportamiento del proceso y de sus principales variables.

Para diferentes calidades de la malla, dada por la cantidad de elementos en la misma, fue determinada la fuerza máxima de conformado. Se comprobó que la fuerza disminuye, con el aumento del número de elementos, convergiendo asintóticamente al valor esperado de la misma.

Se ajustó un modelo de regresión no lineal para reflejar la relación entre la fuerza máxima de conformado y la cantidad de elementos. A partir del mismo se determinó, no sólo el valor estimado de la fuerza máxima de conformado, sino también su intervalo de confianza.

Como desarrollo futuro de este trabajo se impone, en primer lugar, la validación experimental de los resultados obtenidos. También será importante determinar la influencia cruzada de la calidad del mallado con otros parámetros de la simulación, tales como el modelo de plasticidad y el coeficiente de fricción.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer el soporte de la UEB Fábrica Noel Fernández, de la Empresa de Envases y Recipientes Metálicos, a la presente investigación, a través del proyecto empresarial *Optimización y automatización de procesos productivos de recipientes a presión*.

REFERENCIAS

- [1] HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. *Metal forming: Mechanics and metalurgy*, 3rd. Ed. ed. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2007, ISBN 978-0-511-35453-3.
- [2] FEBLES, R.; RIVAS, M. "Determinación de la fuerza de pisado en el embutido de chapas utilizando el método de los elementos finitos," En VIII Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Matanzas (CIUM 2017), Varadero (Cuba), 2017.
- [3] SCHRÖDER, J.; WRIGGERS, P. (eds.) *Advanced finite element technologies*, Cham, Switzerland: Springer, 2016, ISBN 978-3-319-31923-0.
- [4] REZA ESLAMI, M. *Finite elements methods in mechanics* vol. 2016. Cham (Switzerland): Springer, 2014, ISBN 978-3-319-08036-9.
- [5] HANSEN, G. A.; DOUGLASS, R. W.; ZARDECKI, A. *Mesh enhancement: selected elliptic methods, foundations and applications*. London (UK): Imperial College Press, 2005, ISBN 1860944876.
- [6] AKIN, J. E. *Finite element analysis with error estimators*. Oxford (UK): Elsevier, 2005, ISBN 0-7506-6722-2.
- [7] APEL, T.; STEINBACH, O. (eds.) *Advanced finite element methods and application*, Berlin (Germany): Springer-Verlag, 2013, ISBN 978-3-642-30315-9.
- [8] LARSON, M. G.; BENGZON, F. *The finite element method: Theory, implementation, and applications*. Berlin (Germany): Springer-Verlag, 2013, ISBN 978-3-642-33286-9.
- [9] VALEŠ, J.; KALA, Z. "Mesh convergence study of solid FE model for buckling analysis," En AIP Conference Proceedings, 2018, pp. 150005-1–150005-4.
- [10] PATIL, H.; JEYAKARTHIKEYAN, P. V. "Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS," En 2nd International conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2018), 2018.
- [11] WANG, I.-T. "Numerical and experimental verification of finite element mesh convergence under explosion loading". *Journal of Vibroengineering*, 2014, vol. 16, núm. 4, pp. 1786-1798.
- [12] AHMAD, M.; ISMAIL, K. A.; MAT, F. "Convergence of finite element model for crushing of a conical thin-walled tube". *Procedia Engineering*, 2013, vol. 53, pp. 586-593.
- [13] QUIZA, R.; LÓPEZ-ARMAS, O.; DAVIM, J. P. *Hybrid modeling and optimization of manufacturing: Combining artificial intelligence and finite element method*. Heidelberg (Germany): Springer, 2012, ISBN 9783642260849.
- [14] DIXIT, U. S.; JOSHI, S. N.; DAVIM, J. P. "Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review". *Materials and Design*, 2011, vol. 32, núm. 7, pp. 3655-3670.



CONVENCIÓN 2019

del 21 al 24 de mayo

INTERNACIONAL CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA

UNIVERSIDAD DE CAMAGÜEY IGNACIO AGRAMONTE LOYNAZ

SOBRE LOS AUTORES

Teresa Pérez Sosa es ingeniera informática y máster en matemática educativa. Es miembro del Centro de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS) de la Universidad de Matanzas, en el cual trabaja en la línea de investigación de fabricación inteligente. Es miembro de la Sociedad Cubana de Matemática y Computación.

Víctor M. Llorens López es auxiliar técnico de la docencia en el Centro de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS) de la Universidad de Matanzas. Está realizando su trabajo de diploma en ingeniería mecánica, sobre la modelación y optimización de sistemas de manufactura mecánica.

Ramón Quiza es ingeniero mecánico y doctor en ciencias técnicas en la especialidad de construcción de maquinaria. Es, actualmente, director del Centro de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS) de la Universidad de Matanzas. Trabaja en temas de investigación relacionados con los procesos de manufactura y la inteligencia artificial aplicada. Es miembro titular de la Academia de Ciencias de Cuba y miembro del Consejo Técnico Asesor del MES. Pertenece a la Unión de Informáticos de Cuba y la Sociedad Cubana de Matemática y Computación.