

Planeación de procesos de embutido de chapas mediante herramientas numéricas. Planning and programming sheet metal drawing processes .

Yudieski Bernal Aguilar¹, José R. Marty Delgado², Ernesto Valdez Infante³, Michael A. Rivero Portal³, Jorge Sánchez Gutiérrez³, Leidier Flaquet Pen³(Footnotes)

¹ Bernal Aguilar, Y. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Cuba. Carretera a Camajuaní. Km. 5 ½, Santa Clara. Villa Clara. CP: 54830. Correo Electrónico:

yba@uclv.edu.cu

² Marty Delgado, J. R. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Cuba. Correo Electrónico:

jmarty@uclv.edu.cu

³ Graduados Universitarios. Facultad Ingeniería Mecánica. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Cuba.

Resumen

Los procesos de conformación de chapas metálicas representan un grupo significativo de procesos de manufactura de piezas para diferentes aplicaciones. Dentro de estos, los procesos de embutido de chapas incluyen un amplio rango de operaciones y de condiciones de fluencia en la que predominan esfuerzos de tensión/compresión. Los resultados finales del proceso dependen de una gran cantidad de parámetros interrelacionados y sobre todo, es decisiva la experiencia y el conocimiento del diseñador. En el presente trabajo se explican los elementos a considerar en el diseño óptimo multicriterial de los procesos de embutido de chapas y las posibilidades que ofrece esta compleja tarea para el empleo de métodos de elementos finitos, las técnicas de inteligencia artificial y los conceptos de planeación de procesos con el auxilio de la computación. Los resultados actuales de los trabajos reportados en la literatura demuestran los riesgos y ventajas del empleo de estas modernas herramientas de optimización para un proceso de embutido de chapas.

Palabras Claves: Embutido de Chapas, Simulación Numérica, Inteligencia Artificial, CAPP, CAE

Abstract

The sheet metal forming processes are an important group of manufacturing processes for dissimilar applications. Deep drawing is a compression-tension forming process involving large spectrum of operations and flow conditions. The result of the process depends on the large number of parameters and their interdependence, the knowledge and experience of the designer is critical. The present paper explain the elements to be consider on multicriterial design of sheet metal drawing processes using artificial intelligent tools, the results achieve evidence the advantages and risk in the use of modern optimization tools. Keywords: Sheet metal drawing, Numerical simulation, Optimization, Artificial Intelligence.

Listado de símbolos

F_{total}	fuerza total de embutido	<i>N</i>
F_{cr}	fuerza máxima de rotura de la chapa	<i>N</i>
F_n	fuerza normal en el prensachapas	<i>N</i>
P_{pc}	fuerza del prensachapas sobre la matriz	<i>N</i>
A_0	área de la sección inicial del semiproducto	<i>mm²</i>
K_{fm}	valor medio de las tensiones	<i>MPa</i>
R_m	tensión máxima del material de la chapa	<i>MPa</i>
D	diámetro del semiproducto en el momento de la fuerza máxima	<i>mm</i>
d_o	diámetro final en la pieza embutida	<i>mm</i>
μ	coeficiente de fricción	<i>adimensional</i>
r_m	radio de la matriz	<i>mm</i>
r_p	radio del punzón	<i>mm</i>
s_o	espesor inicial en la chapa	<i>mm</i>
s	espesor instantáneo de la chapa	<i>mm</i>
β	relación de embutición	<i>adimensional</i>
β_0	inverso de la relación de embutido	<i>adimensional</i>
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	deformaciones principales en la pieza embutida	<i>adimensional</i>

Introducción

Ampliamente utilizados en las industrias médico-farmacéuticas, biotecnológica y de utensilios electrodomésticos en general, así como en el sector energético, automovilístico y militar, los procesos mecánicos de conformación de chapas metálicas, gozan hoy de una amplia popularidad asociada a su elevada productividad, alta confiabilidad, flexibilidad, bajos costos relativos, bajo consumo de insumos y una alta resistencia mecánica en relación al peso de sus productos terminados.

Dentro de los procesos mecánicos de conformación de chapas, los más complejos desde el punto de vista físico mecánico, son los procesos de embutido en sus diversas variantes tecnológicas. Para la interpretación físico mecánica de estos procesos de embutido se realizan una serie de suposiciones simplificadoras en el análisis de las interacciones entre los materiales involucrados (pieza/herramienta) y en el comportamiento del material de la pieza.

La complejidad físico mecánica de la operación de embutido demanda el uso de las técnicas para su optimización. Una posible vía para resolver los problemas que en ella se presentan parte de la representación multiobjetiva, multicriterial y de la toma de decisiones, sobre las variables que intervienen en el proceso de embutido y su relación con el método de elementos finitos y las técnicas de Inteligencia Artificial. Esto es: a) La utilización de los métodos de elementos finitos (MEF) en el análisis paramétrico del proceso [1-3] b) Planeación del proceso mediante técnicas de Inteligencia Artificial (IA), Redes Neuronales Artificiales (RNA), Algoritmos Genéticos (AG), Sistema Experto (SE), Lógica Difusa (LD), Recocido Simulado (RS) y otras técnicas (por ejemplo, combinación de las anteriores) [4, 5]

Hasta el momento, no existe una expresión analítica que describa las relaciones funcionales entre estos parámetros y el dimensionamiento e integración de los elementos constitutivos de la herramienta utilizando el método de elementos finitos. Tampoco existen criterios uniformes en cuanto a los elementos a optimizar en la operación. En este sentido es de destacar las contribuciones realizadas por Firat [6].

Los factores más importantes que condicionan la calidad de las embuticiones vienen determinados por:

1. Las características del material (propiedades, tamaño del grano, acritud, coeficiente de anisotropía)
2. Variaciones en espesor del material
3. Tipo de embutición (simple efecto, doble o triple efecto)

4. Tamaño de la embutición (profundidad, velocidad, lubricación)
5. Grado de reducciones ó cantidad de pasos (una embutición, dos embuticiones, varias embuticiones)
6. Geometría de la embutición (cilíndrica, cuadrada, irregular)
7. Calidad superficial de las herramientas (acabados, radios)
8. Juego de embutido

El presente trabajo explica los elementos a considerar en el diseño óptimo multicriterial de los procesos de embutido de chapas y las posibilidades que ofrece esta compleja tarea para el empleo de técnicas de simulación por elementos finitos y de inteligencia artificial. Los resultados demuestran los riesgos y ventajas del empleo de estas modernas herramientas de optimización para un proceso de embutido de chapas.

Planeación de procesos en las operaciones de embutido de chapas

En la **figura 1** se representa esquemáticamente un proceso de embutido de chapas, mostrando algunos de los elementos que deciden sobre la calidad final del proceso. Existe hoy un marcado interés en el desarrollo de herramientas numéricas de modelación y simulación que posibiliten conocer y comprender con anticipación las características y el desarrollo de la operación, así como la optimización del proceso.

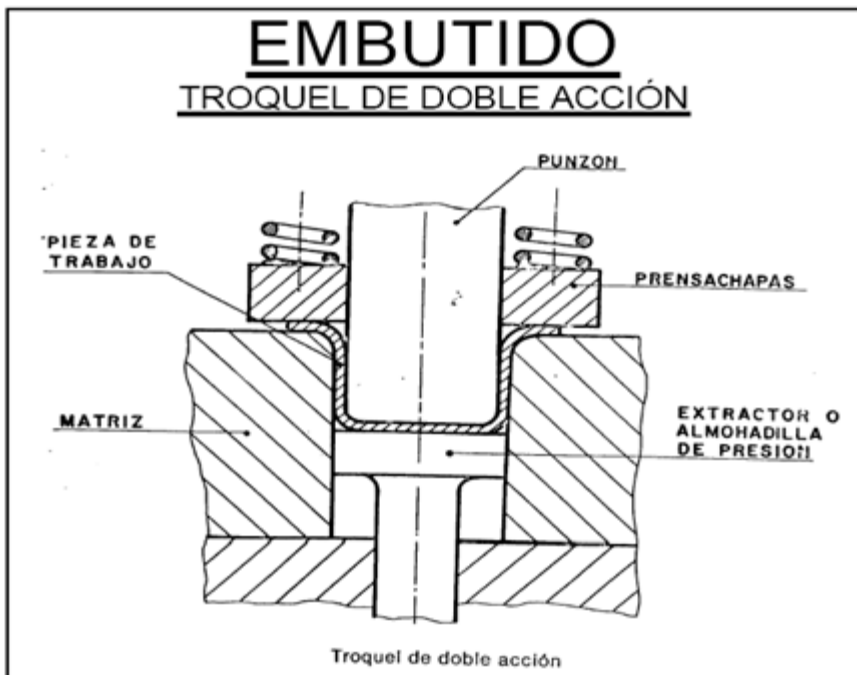


Fig. 1 Elementos representativos de una operación de embutido de chapas

Una fórmula empírica para la determinación de la fuerza total de embutido es la ofrecida por Schaeffer [7] en la que se consideran la fuerza ideal, las fuerza de fricción (matriz/prensachapas y matriz/chapa) y la fuerza de retroceso elástico

$$p_{pc} = 0.0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0.5 \frac{d_0}{100 s_0} \right] R_m \quad (1.1) \quad (1)$$

La fuerza máxima de embutido permitida en un proceso está limitada por la carga que puede ser transmitida a la chapa en las regiones más peligrosas de la pieza embutida. Según [8] esta fuerza se puede calcular por

$$F_{cr} = \pi D s_0 s \quad (2)$$

El espesor en cada instante del proceso de embutido, en relación a las deformaciones, puede expresarse

por: $s = s_0 e^{\varphi_2} [-(1 + \beta)\varphi_1] = s_0 e^{-\varphi_1}$
 (3)

Si el juego de embutido es calculable por la expresión

$u_d = s_0 + k\sqrt{10s_0}$ (4)

donde K asume los valores de 0.07, para el acero; 0.02 para el aluminio y 0.04 para otros materiales ferrosos

El radio de la matriz r_m , depende del diámetro de la pieza y de su espesor. En la literatura aparecen recomendaciones para su determinación. Kakandikar [8] ofrece una relación en la que el factor de 0.035, puede incrementarse hasta 0.08 $r_m = 0.035[50 + (D - d_0)]\sqrt{s_0}$

(5) El radio del punzón r_p nunca debe ser menor que el de la matriz. Se recomienda hacer el radio del punzón mayor que el de la matriz en un factor de 3 a 5 veces.

La planeación tradicional de los procesos de embutido incluye la secuencia lineal de pasos que se ofrecen la **figura 2**.

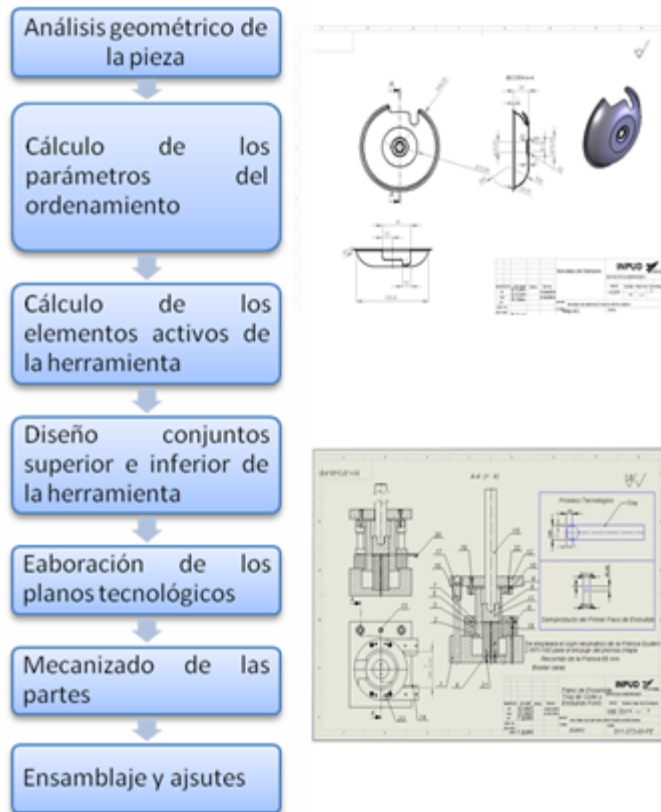


Figura 2. Planeación convencional de un proceso de embutido de chapas en un ambiente CAD

Sistema de variables para el análisis de los procesos de embutido de chapas

En la **figura 3**, los autores proponen el sistema de variables a emplear para el análisis multiobjetivo y multicriterial para el empleo de las técnicas de optimización en las operaciones de embutido de chapas, en la misma se consideran elementos propios del diseño del producto (pieza), del desarrollo de la tecnología de elaboración por embutido y los parámetros a optimizar.

Los análisis de formabilidad de la chapa y de la recuperación elástica en el material de la pieza, la determinación de otras importantes informaciones tales como la distribución de la deformación del espesor, distribución de tensiones, número de pasos, esfuerzos del punzón, etc., son factores importantes que influyen sobre el ciclo completo del proceso de conformado por embutición.

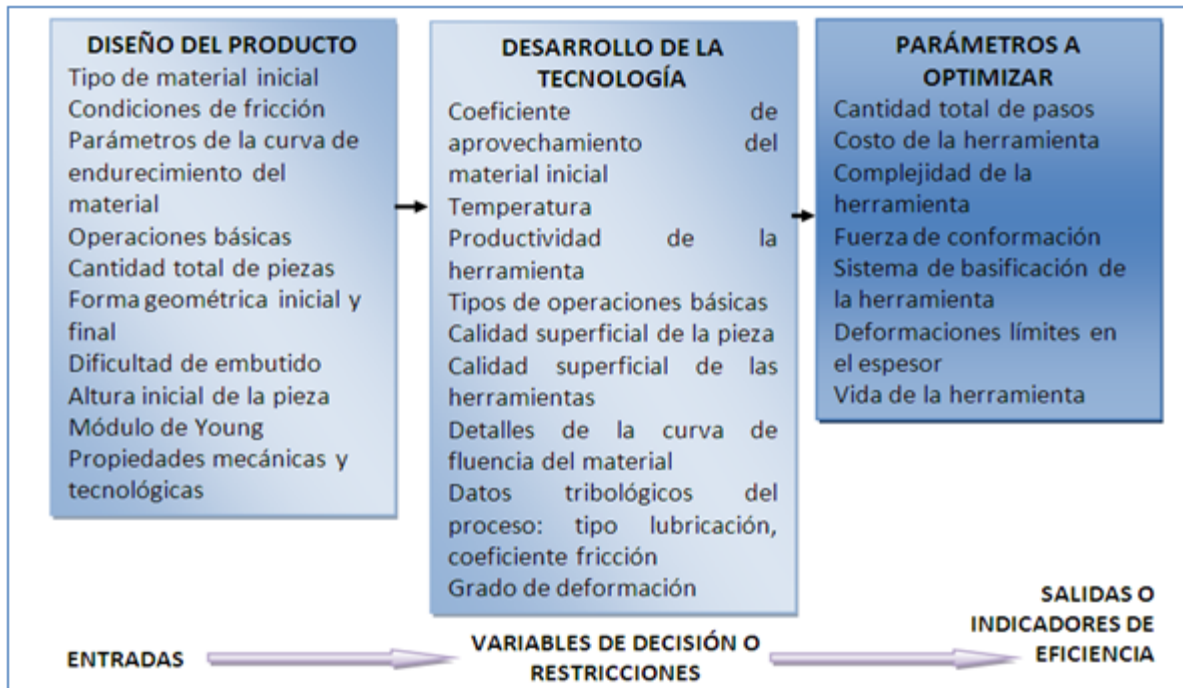


Figura 3. Sistema de variables a emplear para el análisis multiobjetivo en las operaciones de embutido de chapa

Método de elementos finitos en la simulación de operaciones de embutido de chapas

Los objetivos principales de la aplicación de la simulación numérica por elementos finitos en el proceso de embutido de chapas son, entre otros, determinar los parámetros adecuados del proceso, desarrollar un diseño apropiado de la herramienta, mejorar la calidad de la pieza mediante la predicción de los límites del proceso, reducción de los tiempo de ajuste y ensamblaje de la herramienta, así como acortamiento los plazos de entrega; todo ello incide, significativamente, en la disminución los costos de fabricación.

Sin embargo, a pesar del enorme desarrollo de las instalaciones de hardware y software, el uso exclusivo de la modelación numérica por elementos finitos tiene también algunas desventajas: la fiabilidad de los resultados depende de las experiencias del usuario. Esto se debe, en parte, al gran número de parámetros interrelacionados cuya influencia debe ser investigada, y en parte también, a las dificultades causadas por la complejidad numérica de los modelos matemáticos aplicados para describir el comportamiento del material. Por lo tanto, en los últimos años ha existido una tendencia a la integración de la modelación por elementos finitos con la utilización de técnicas de inteligencia artificial. Ver por ejemplo los trabajos de [9, 10].

En la figura 4 se representa el diagrama de flujo para la simulación de proceso de planificación basada en el diseño de troqueles. El diseño de los elementos activos de la herramienta, al considerar la forma geométrica de la pieza, tiene como objetivo determinar el número mínimo de operaciones de estampado y reducir los costos del herramental manteniendo los criterios de un conformado seguro.

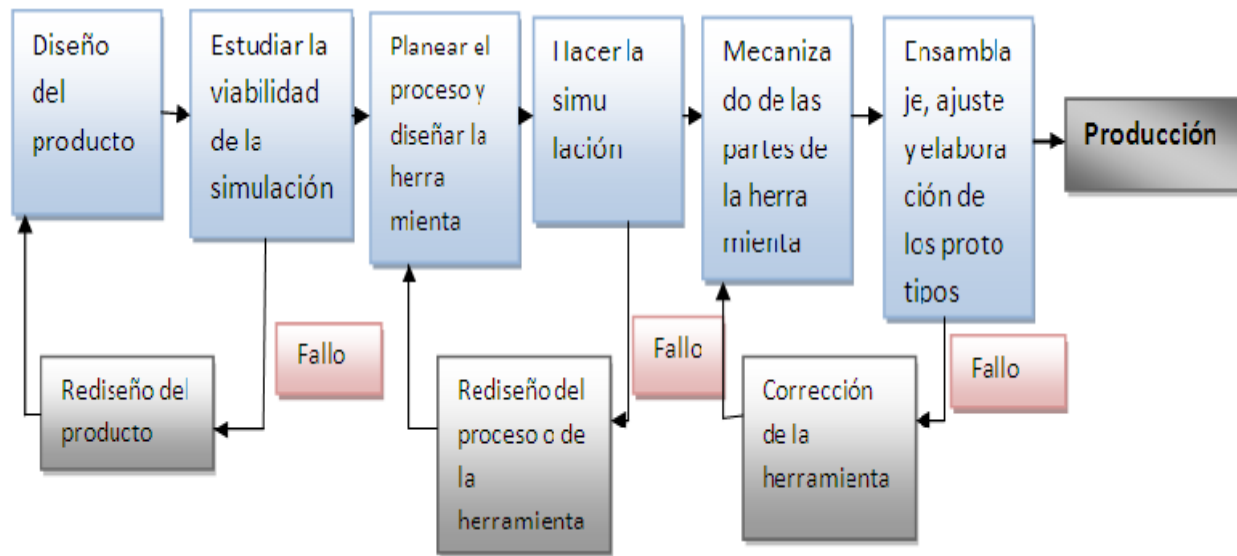


Fig. 4. Diagrama de flujo para la simulación de proceso de planificación basada en el diseño de troqueles. Adaptada de [11]

Las decisiones sobre los tipos de elementos finitos y el enfoque de aproximación para la generación del mallado, pueden tener un impacto sustancial sobre el resultado de la simulación computacional. De manera similar, la selección de los modelos constitutivos del material y la utilización exacta de los datos de un conjunto de ensayos de materiales tienen un control directo por ejemplo, sobre las deformaciones calculadas y los cambios en la predicción de la deformación.

Existen en la literatura científica numerosos criterios y modelos para predecir el fallo por fractura dúctil en materiales metálicos. Dependiendo de los fundamentos que lo sustentan, Vallellano [12] propone tres categorías. Los criterios esencialmente fenomenológicos, es decir, basados en reglas empíricas y/o semi-empíricas. La segunda categoría recoge aquellos métodos obtenidos de modelar el proceso físico de fractura observado experimentalmente, simulándose así las fases de nucleación, crecimiento y posterior coalescencia de huecos que ocurre durante la fractura dúctil de los metales. Por último, el tercer grupo incluye aquellos criterios que predicen el fallo del material como resultado de la aparición de una inestabilidad o bifurcación en el proceso de deformación plástica del material.

En la actualidad, diferentes códigos comerciales están disponibles para la simulación de procesos. Entre los códigos de propósitos generales pueden mencionarse, entre otros, MARC, COSMOS o ABAQUS; más recientemente, códigos especiales dedicados exclusivamente a las operaciones de embutido de chapas están siendo utilizados con mayor frecuencia, entre ellos, STAMP, AutoFORM, DYNA3D, ITS-3D, OPTRIS, FAST_FORM3D.

Los modelos de elementos finitos usados para describir las operaciones de embutido de chapa generalmente realizan una descripción Lagrangiana del proceso. Dada la fuerte no linealidad del problema, debida principalmente al comportamiento plástico del material y al contacto entre los diferentes elementos, se emplea una formulación de grandes deformaciones. La matriz, el punzón y el prensa-chapa se consideraran elementos rígidos. Mientras que, para la chapa metálica, se supone un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento por deformación de tipo isotrópico. Se supone, además, un modelo de plasticidad asociativa isotrópico e independiente de la velocidad de deformación. Esta aproximación es válida siempre que la anisotropía de la chapa no sea muy elevada. Un criterio de fluencia empleado con frecuencia es el de von Mises.

Las piezas conformadas en las que están presentes grandes deformaciones plásticas, la distorsión de la malla de elementos finitos es significativa, de ahí que se hace necesario realizar remallados e interpolaciones de datos de la malla anterior a una nueva para obtener presión adecuada en los resultados. Esta característica hace indispensable una capacidad de remallado automático y adaptable integrado en los códigos de simulación.

Un resultado a destacar es el obtenido por Ayari y colaboradores [13], en el que, construyendo un modelo paramétrico de elementos finitos 3D y empleando código estándar ABAQUS/explicito, investigaron los parámetros de mayor influencia en la simulación de un proceso de embutido de un cuerpo rectangular (tales como, parámetros geométricos, ley constitutiva de fluencia del material, mallado y el coeficiente de fricción).

Especial atención han recibido también las modelaciones por elementos finitos que relacionan la forma inicial del semiproducto con la forma de la pieza y la geometría de la herramienta, vinculando estos elementos a un estampado libre de defectos [14].

La planeación de procesos asistida por la computación (CAPP) y el diseño de herramientas han evolucionado como una de las herramientas de ingeniería más importante en el conformado de chapas. Este desarrollo ha estado íntimamente relacionado con la rápida evolución y el perfeccionamiento de las técnicas de modelación por elementos finitos. En las actividades de ingeniería asistidas por la computación (CAE) en el embutido de chapas para predecir, por ejemplo, la formabilidad del material, tipos y secuencia de las operaciones y sus parámetros, diseño de la herramienta de conformar, etc.; existen dos tendencias principales, una de ellas está relacionada con la planeación de procesos basada en el conocimiento, la otra tendencia es la planeación de procesos basada en la simulación. La tendencia actual del desarrollo es la integración de estas dos actividades en sistemas basados en la simulación y el conocimiento (KSBS), con fuerte vínculo con los sistemas comerciales CAD y de elementos finitos.

Herramientas de inteligencia artificial

Sin la aplicación de herramientas de optimización y toma de decisiones, los sistemas CAD no están preparados, conceptualmente, para la realizar diseños que se aproximen al mejor compromiso posible entre los indicadores de eficiencia que se muestran en el **figura 3**. Las herramientas de inteligencia artificial se deben emplear para encontrar las condiciones óptimas de los parámetros del proceso, parámetros geométricos de la pieza ó los parámetros de operación de la prensa para el embutido profundo de piezas, en lugar de los tradicionales métodos de prueba y error que todavía se utilizan en muchas industrias.

En la literatura científica se pueden encontrar varios enfoques para realizar la planeación, modelación, y conjuntamente, la optimización de las operaciones de embutido de chapas. Uno de esos enfoques consiste en la aplicación de sistemas expertos basados en el conocimiento, u otras técnicas de inteligencia artificial, que generalmente se basan en la teoría de la plasticidad simplificada y en normas tecnológicas empíricas. Sin embargo, según Tiza [11], las soluciones de estos sistemas tienen ciertas desventajas: por lo general no pueden ofrecer una solución lo suficientemente precisa al problema, ya que estos sistemas se basan generalmente en reglas tecnológicas simples con validez limitada. Por lo tanto, con los sistemas basados en el conocimiento no se puede predecir, por ejemplo, el flujo de material, y por lo general no pueden proporcionar la distribución de las tensiones y deformaciones dentro del componente conformado.

En el trabajo de Tsai, Y.-L., et. al. [15] se demuestra que, para la planeación de procesos en algunas piezas conformadas de configuraciones complejas, como los paneles de los automóviles, es conveniente utilizar metodologías de ingeniería basada en el conocimiento (KBE). La planificación de las operaciones de conformado identifica y ordena en secuencia las operaciones y las prensas necesarias. El razonamiento basado en casos (CBR) está integrado a los procesos la planificación y de diseño de las herramientas un sistema híbrido de ingeniería basados en el conocimiento (KBE). La arquitectura de este sistema está basada en tres grandes módulos, un módulo de representación, un módulo de reconocimiento (compuesto por los submódulos de razonamiento y de planeación de procesos) y por último, un módulo CAD para el diseño de la herramienta.

La aplicación exitosa de los Algoritmos Genéticos a la tarea del diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado, sugerida por Ruiz [16], concluye con la idea de su aplicación a otras muchas tareas de diseño de sistemas de ayuda al diseño óptimo multiobjetivo para otras muchas aplicaciones CAD. Esta idea se ve reforzada por la independencia del algoritmo de optimización con respecto a la descripción matemática del proceso tecnológico asociado.

En el trabajo presentado por Zhao, J. y F. Wang [10] se sientan las bases para el embutido profundo inteligente, cuando se describe un modelo de red neuronal con propagación hacia adelante, basada en

algoritmo de Levenberg y Marquardt, la cual se establece para identificar en tiempo real las propiedades del material y el coeficiente de fricción en el embutido profundo de cuerpos con simetría axial. Este modelo de red es comparado con un modelo de red neuronal con algoritmo de propagación hacia atrás y con otro modelo red neuronal evolucionario basada en algoritmo genético (GA-ENN).

El conformado de chapa inteligente incluye cuatro elementos básicos, el monitoreo en tiempo real, identificación, predicción y control, y constituye una confluencia entre la ciencia del control y la teoría del conformado de metales. De acuerdo a las características de la pieza inicial, utilizando cantidades físicas que son fáciles de medir, las propiedades del material y el coeficiente de fricción pueden ser determinados en tiempo real y el proceso de deformación de la chapa puede ser automatizado con los parámetros óptimos del proceso.

Metodología propuesta para la planeación y programación de procesos de embutido de chapas mediante herramientas numéricas

Paso 1. Inicio

- a. Establecer las relaciones cinemáticas del proceso (forma, velocidades, relación de deformaciones, entre la parte deformada y la parte no deformada)
- b. Establecer los límites de conformabilidad del material, o sea, determinar si es posible ejecutar la operación de conformación sin causar algún defecto de superficie o interno en el material.
- c. Prever la fuerza y las tensiones necesarias para ejecutar la operación de conformación.
- d. Considerar la influencia del endurecimiento por deformación, la relación de embutición, tipo de lubricante empleado y los diagramas límites de conformación

Paso 2. Simulación del proceso de embutido de chapas empleando el método de elementos finitos (MEF)

- a. Definir las variables de entrada con las que se trabajará, forma geométrica, material, parámetros del proceso, diagrama límite de conformado
- b. Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros
- c. Definir las variables de salida que interesan
- d. Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.
- e. Validación del MEF

Paso 3. Seleccionar de forma apropiada una herramienta de inteligencia artificial para modelar el efecto de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.

Ejemplos de variables para la optimización	Ejemplo de parámetros para la creación del algoritmo genético
Diámetro inicial semiproducto	Tipo de reproducción
Diámetro final en la pieza	Tipo de selección
Radio interior en la pieza	Elitismo
Coefficiente fricción	Probabilidad de mutación
Radio matriz	Probabilidad de reproducción
Radio punzón	Probabilidad de selección
Coefficiente para el cálculo fuerza prensa chapas	
Juego de embutido	

Tabla 1. Ejemplos de variables a optimizar en el embutido de chapas (izquierda) y parámetros para la creación de un algoritmo genético

Paso 4. Modelar la herramienta de IA para cada indicador de eficiencia seleccionado

Paso 5. Comparar los resultados de la simulación por MEF y por IA

Conclusiones

Los análisis de formabilidad de la chapa y de la recuperación elástica en el material de la pieza, la determinación de otras importantes informaciones tales como la distribución de la deformación del espesor, distribución de tensiones, número de pasos, esfuerzos del punzón, etc., son factores importantes que influyen sobre el ciclo completo del proceso de conformado por embutición.

En la simulación de las operaciones de embutido de chapas, diferentes parámetros y la influencia de varios factores deben ser considerados. Las propiedades del material, las leyes constitutivas y las condiciones tribológicas y de fricción son de gran importancia. Las representaciones geométricas y los tiempos de cálculo computacional deben ser también considerados para un costo real y efectivo de la modelación y simulación de la operación de conformado.

La planeación de procesos asistida por la computación (CAPP) y el diseño de herramientas han evolucionado como una de las herramientas de ingeniería más importante en el conformado de chapas.

Los nuevos requerimientos y desarrollos más importantes relacionadas con la simulación de los procesos de embutido de chapa están relacionados con los siguientes aspectos:

- Geometría de la pieza. Dependiendo de la complejidad geométrica de la pieza, generalmente se requieren simulaciones tridimensionales.

- Material de la pieza y de la herramienta. Es necesario emplear datos reales para la predicción correcta de la fluencia de material y de las fuerzas necesarias.

- Condiciones de la interface. Sobre todo, en lo relacionado con la fricción entre la pieza y la herramienta.

- Procesos tecnológicos. Nuevos procedimientos y equipos se han introducido en los últimos años, tales como los procesos de hidroconformado

- Evolución del hardware y del software

La tendencia actual del desarrollo es la integración de la planeación de procesos basada en el conocimiento, con los sistemas de planeación de procesos basados en la simulación y el conocimiento, con fuerte vínculo con los sistemas comerciales CAD y de elementos finitos.

Bibliografía

1. Tisza, M., Numerical Modeling and Simulation in Sheet Metal Forming Academic and Industrial Perspectives Materials Science Forum 2005 473-474: p. 135-140.
2. Wang, J., V. Levkovitch, and B. Svendsen, On some numerical aspects of the simulation of sheet metal forming and springback. Journal of Materials Processing Technology, 2006.
3. Aljibori, H.S.S. and A.M. Hamouda, Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process. European Journal of Scientific Research, 2009. 33 (1): p. 57-69.
4. Bozdemir, M. and M. Golcu, Artificial Neural Network Analysis of Springback in V Bending. Journal of Applied Science, 2008. 8(17): p. 3038-3043.
5. Kumar, S. and S. Singh, A knowledge-based system for selection of progressive die components. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007. 20(1-2).
6. Firat, M., Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts. Materials and Design 2007. 28: p. 1298–1303.
7. Schaeffer, L., Conformação de Chapas Metálicas. 2004, Poto Alegre: Imprensa Livre Editora Ltda.
8. Kakandikar, G.M. and V.M. Nandedkar, Optimization of forming load and variables in deep drawing process for automotive cup using Genetic Algorithm.
9. Qudeiri, J.A., H. Yamamoto, and R. Ramli, *Optimization of Operation Sequence in CNC Machine Tools Using Genetic Algorithm*. Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing, 2007. 1(2).
10. Zhao, J. and F. Wang, *Parameter identification by neural network for intelligent deep drawing of axisymmetric workpieces*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. 166(3): p. 387-391.
11. Tisza, M., *Recent achievements in computer aided process planning and numerical modelling of*

- sheet metal forming process*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2007. **24**(1).
12. Vallellano, C., J.J. Erce, and F.J. García-Lomas, *Predicción del fallo en el conformado plástico de chapa mediante criterios de fractura dúctil* Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2005 **9**(2): p. 101-111.
13. Ayari, F., T. Lazghab, and E. Bayraktar, *Parametric Finite Element Analysis of square cup deep drawing*. Archives of Computational Materials Science and Surface, 2009. **1**(2): p. 106-111. 14. Firat, M., *Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part III: Stamping die-face design* Materials and Design 2007. **28**: p. 1311-1320.
15. Tsai, Y.-L., et al., *Knowledge-based Engineering for Process Planning and Die Design for Automotive Panels*. Computer-Aided Design & Applications, 2010. **7**(1): p. 75-87.
16. Ruiz, J.A. and R.E. Simeón, *Aplicación de los Algoritmos Genéticos al Diseño Optimo Multiobjetivo de Troqueles de Corte y Punzonado Simples y Progresivos* Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2002. **22**(2).
17. Gestal Poce, M. *Introducción a las redes neuronales artificiales*. [Consultado junio de 2010]; Disponible en: <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/RNAtutorial/index.html>.