

*Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.  
Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.*



# *TRABAJO DE DIPLOMA*

*Propuesta para la aplicación de sistemas inteligentes en la planeación de  
Procesos de Embutido de Chapas.*

*Autor: Ernesto Valdés Infante.*

*Tutor: MSc. Ing. Yudieski Bernal Aguilar.*

*Curso: 2008-2009*

# Pensamiento



Facultad de Ingeniería Mecánica



*“Nos forjaremos en la acción cotidiana, creando  
un hombre nuevo con una nueva técnica”.*

*Che*

# Dedicatoria



Facultad de Ingeniería Mecánica

## *Dedicatoria*

---

*A mi esposa, familia y amigos.*

# Agradecimientos



Facultad de Ingeniería Mecánica

## *Agradecimientos*

---

*A mi esposa, tutores y amigos.*

# Índice



Facultad de Ingeniería Mecánica

	Pág.
Introducción.....	1
<b>Capítulo I: Estado del arte de los procesos de conformación por estirado de chapas metálicas.</b>	
1.1.- Conceptos generales sobre los procesos de estirado de materiales.....	5
1.1.2.- Características de este tipo de proceso.....	7
1.1.3.- Formulas para el cálculo de la fuerza, tensiones y deformaciones en estos procesos.....	16
1.1.4.- Perspectivas de desarrollo de los procesos de estirado de chapas. Aplicaciones industriales...	18
1.2.- Estados tensionales y de deformación en los procesos de estirado.....	19
1.2.1.- Modelos existentes en la literatura para interpretar tensiones y deformaciones.....	20
1.2.2.- Diagramas límite para las operaciones de estirado de chapas.....	28
1.3.- Herramientas básicas para los procesos de estirado.....	31
1.4.- Conclusiones Parciales	34
<b>Capítulo II: Técnicas de Inteligencia Artificial y su vinculación a los procesos de conformación de chapas.</b>	
2.1.- Técnicas y herramientas de Inteligencia Artificial.....	35
2.1.1.- Estrategias evolutivas.....	36
2.2.- Aplicaciones industriales de las herramientas de Inteligencia Artificial a los procesos de conformación.....	53
2.2.1.- Limitaciones y alcance de las técnicas de IA en relación a los procesos de conformación de chapas.....	55
2.3.- Conclusiones Parciales.....	56
<b>Capítulo III: Posibilidades de empleo de las técnicas de Inteligencia Artificial en los procesos de estirado de chapas.</b>	
3.1.- Aplicaciones industriales de las herramientas de Inteligencia Artificial (IA) en los procesos de estirado de chapas.....	58
3.2.- Selección de la variable a optimizar en proceso de estirado de chapa.....	61
3.3.- Valoración de las posibilidades del empleo de la Inteligencia Artificial para los procesos de estirado de chapas para las condiciones concretas en la región central.....	67
3.4.- Conclusiones Parciales.....	69
Conclusiones Generales.....	70
Recomendaciones.....	71
Bibliografía.....	72
Anexos.....	

# Resumen



Facultad de Ingeniería Mecánica

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 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, aún con el desarrollo científico técnico alcanzado hoy. El trabajo explica inicialmente los elementos a considerar en el diseño óptimo multicriterial de los procesos de embutido de chapas, a continuación, las posibilidades que ofrece esta compleja tarea para el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial y como resultado a esta investigación se propone una metodología para la aplicación de la técnica computacional seleccionada. Los resultados demuestran los riesgos y ventajas del empleo de estas modernas herramientas de optimización para un proceso de embutido de chapas.

**Palabras Claves: Conformación de metal, Optimización, Simulación Numérica**

## *Abstract*

---

Sheet metal forming is a significant manufacturing process for producing a large variety of automotive parts and aerospace parts as well as consumer products. Deep drawing is a compression-tension forming process involving wide spectrum of operations and flow conditions. The result of the process depends on the large number of parameters and their interdependence. It depends on the knowledge and experience of the design engineer only. The present paper explain a few elements to be consider on multicriterial design of sheet metal drawing processes, as a result of this research proposes a methodology for the application of computational techniques selected and results achieve evidence the advantages and risk in the use of modern optimization tools.

**Keywords: Sheet metal forming, Optimization, Numerical simulation.**

# Introducción



Facultad de Ingeniería Mecánica

El proceso de conformación por embutido es uno de los de mayor utilización en la industria provincial. En los últimos años este tipo de procesos han alcanzado una gran importancia en el mundo industrial. La chapa se utiliza ampliamente como material base en productos industriales y de consumo a causa de su fácil maleabilidad para poder convertirla en formas complejas. [1]

En el mundo es notable la importancia del uso del proceso de estirado profundo (embutido) para la producción de piezas tridimensionales, muy usado en la industria automovilística, en la cual los componentes fabricados mediante este tipo de proceso representan un 30% del peso total de un auto, utilizándose hasta 500 elementos elaborados por estirado de chapas. [2]

La Empresa Industrial de Productos y Utensilios Domésticos “1<sup>to</sup> de Mayo” (EINPUD) de Santa Clara, en Villa Clara, es un gran exponente de la utilización de procesos de conformación de chapas metálicas.

Esta empresa fue fundada en 1964 por el Comandante de la Revolución Ernesto Guevara de la Serna, desde sus inicios la producción ha sido destinada principalmente al consumo nacional. A partir de su creación hasta los años 90, en que el país transitó por el período especial, esta fue la principal industria en Cuba que utilizó los procesos de conformación de chapas.

En los inicios del siglo XXI se ha visto una reanimación de la economía cubana y en la EINPUD se retoman las producciones tradicionales, ejemplo de esto es la fabricación de ollas de presión distribuidas a la población como parte de la Revolución energética que lleva a cabo el país.

En esta industria el 90 por ciento de la producción se efectúa por medio de procesos de conformación de metales, destacándose el uso del proceso de embutido, que es uno de los tipos de estirado de chapas.

Dentro del universo que representa la conformación de metales, los procesos de estirado de chapas ocupan un lugar destacado pues 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. [3]

En el desarrollo técnico industrial mundial, la implementación de técnicas computacionales pertenecientes al campo de la inteligencia artificial, han marcado pauta, más cuando el mundo avanza tecnológicamente a un ritmo acelerado, donde los fabricantes necesitan satisfacer las demandas que exigen los consumidores con calidad y rapidez; argumentos de los que la directiva de la EINPUD no está ajena.

Desde el aspecto del diseño industrial donde las propiedades de los materiales y el diseño de forma desempeñan papeles importantes, es mucho más caro realizar experimentos empíricos que la simulación de optimización numérica. Lo expuesto con anterioridad hace ver la importancia del uso de las técnicas de inteligencia artificial en los procesos de conformado en el ámbito nacional.

En la actualidad el sector industrial de la chapa, se encuentra bajo presión debido a la globalización del mercado internacional y los cortos plazos de entrega por el pequeño ciclo de vida de los productos.

Para ser competitivo en este mercado, las empresas productoras de componentes de chapas deben obtener suficiente flexibilidad de producción para producir rápidamente varios productos de chapa con calidad aceptable. [4]

### **Situación Problémica.**

Existen factores negativos en los procesos de estirado de chapas que atentan contra el diseño óptimo de estos, entre los cuales se encuentran las deformaciones no deseadas, el adelgazamiento de los espesores de chapas además de las arrugas, grietas y roturas en el material.

En el país se han realizado pocas investigaciones para determinar el diseño óptimo de piezas mediante procesos de conformación de chapas metálicas con el empleo de la Inteligencia Artificial. Resultaría necesario alcanzar solidez en esta línea de investigación para contribuir al mejor entendimiento por la industria cubana de los beneficios del uso de técnicas de Inteligencia Artificial en el conformado por embutido profundo.

En Villa Clara no se han realizado estudios de este tipo con anterioridad. En la EINPUD “1<sup>ro</sup> de Mayo” de Villa Clara, el cálculo de los procesos de fabricación de piezas por embutido se hacen de forma manual y mediante ensayos empíricos, lo que ocupa mucho tiempo y encarece grandemente el proceso. Al igual que en otras empresas de la provincia no se utilizan los Algoritmos Genéticos, técnicas cuya introducción sería muy ventajosa por lo que se sugiere la idea de la aplicación de los Algoritmos Genéticos para optimizar y agilizar estos procesos. Sería favorable incidir en el proceso de embutido a través de la utilización de técnicas de Inteligencia Artificial con el fin de optimizar este tipo de proceso.

### **Problema de Investigación:**

¿Cómo incidir de manera favorable en el proceso de embutido a través de la utilización de técnicas de Inteligencia Artificial?

### **Preguntas de Investigación:**

1. ¿Qué elementos físicos, mecánicos y tecnológicos intervienen en los procesos de estirado profundo?
2. ¿Cómo se emplean las técnicas de Inteligencia Artificial para optimizar los procesos de estirado de chapas?
3. ¿Qué parámetro se debería analizar para la optimización del proceso de conformación por estirado?
4. ¿Qué condiciones existen en la provincia actualmente y específicamente en la EINPUD para producir piezas por estirado profundo auxiliándose de técnicas de Inteligencia Artificial?

## *Introducción*

---

### **Novedad Científica:**

Una metodología para la aplicación de la técnica computacional seleccionada, con el fin de demostrar las ventajas del empleo de estas modernas herramientas de optimización para un proceso de embutido de chapas.

### **Objetivo General:**

Proponer una metodología en el diseño de piezas por estirado profundo de chapas para la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial.

### **Objetivos Específicos:**

1. Caracterizar los elementos físicos, mecánicos y tecnológicos que intervienen en los procesos de estirado profundo.
2. Describir el empleo de las técnicas de Inteligencia Artificial para los procesos de estirado de chapas.
3. Analizar la variable seleccionada para optimizar mediante una herramienta de Inteligencia Artificial.
4. Elaborar una metodología para el diseño de piezas por estirado profundo mediante técnicas de Inteligencia Artificial.
5. Valorar las condiciones actuales para la producción de piezas por estirado profundo mediante el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial.

### **Principal Resultado a Obtener:**

Existen en la actualidad diversos modelos para interpretar las operaciones de conformación de materiales mediante el empleo de variadas técnicas de la inteligencia artificial. Entre estos procesos sobresalen por su complejidad e importancia los procesos de estirado y estirado profundo de chapas. Estos modelos toman en consideración diferentes consideraciones teórico prácticas. Se hace necesario, bajo las condiciones de desarrollo actuales de la industria de conformación cubana, el entendimiento de la interrelación los aspectos físicos, mecánicos y tecnológicos en las operaciones de estirado y estirado profundo, así como las posibilidades de emplear en su diseño las técnicas y herramientas de la inteligencia artificial. Es por ello que como principal resultado se propone una guía metodológica para el diseño de las operaciones de estirado de chapas a través de la utilización de técnicas y herramientas de la inteligencia artificial.

### **Hipótesis del trabajo:**

Si se establece una correcta metodología se podrá incidir favorablemente en el diseño de piezas por estirado profundo mediante técnicas de Inteligencia Artificial.

## ***Introducción***

---

### **Justificación:**

Los resultados de esta investigación le brindarán a la comunidad científica-técnica Villaclareña una herramienta que agilizará los cálculos para el diseño de piezas por estirado profundo mediante técnicas de Inteligencia Artificial.

Con esta investigación se contribuye a ampliar el horizonte cognoscitivo sobre este tema en los profesionales de la Ingeniería Mecánica en la provincia de Villa Clara, lo cual sería un elemento favorecedor para la introducción del campo de la Inteligencia Artificial para los procesos de conformado en la industria.

Las conclusiones a las que se podrán arribar pueden servir como punto de partida para investigaciones posteriores.

### **Viabilidad de la Investigación:**

La investigación es viable ya que se cuenta con profesionales y estudiantes de la Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas” y la EIMPUD “1<sup>ro</sup> de Mayo” de Villa Clara capacitados para llevar a cabo la investigación. La dirección de la EIMPUD se encuentra abierta a la cooperación para llevar adelante este estudio.

### **Metodología:**

Se realizará una investigación descriptiva y explorativa dentro del paradigma cuantitativo. El propósito de la misma consiste en proponer una metodología para el diseño de piezas por estirado profundo mediante técnicas de Inteligencia Artificial. El trabajo se ejecutará en la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central “Marta Abreu de las Villas” (UCLV) y en la EIMPUD “1<sup>ro</sup> de Mayo” de Villa Clara. El estudio se llevará a cabo en el período comprendido entre mayo de 2008 y junio de 2009.

Se trabajará con el universo, el cual estará constituido por los Ingenieros Mecánicos que conforman el Departamento de diseño de piezas y troqueles en la EIMPUD “1<sup>ro</sup> de Mayo” de Villa Clara. El estudio se llevará a cabo en el período comprendido entre marzo de 2009 y julio de 2009.

El principio ético de la no maleficencia será tenido en cuenta en la investigación.

### **Estructura del Trabajo:**

El trabajo de diploma consta de una síntesis o resumen, introducción, tres capítulos, así como conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

**Capítulo I:** Abordará acerca de las concepciones generales sobre las operaciones de conformación de materiales, con especial énfasis en los parámetros técnicos del proceso de estirado de chapas. Las experiencias Nacionales e Internacionales en cuanto a los estados tensionales y los modelos existentes para interpretar las

tensiones y deformaciones en estos procesos y las herramientas más utilizadas en el desarrollo de los procesos de estirado para lograr la aplicación de los Métodos Numéricos e Inteligencia Artificial de estas.

**Capítulo II:** Tratará sobre las técnicas y herramientas a utilizar de Inteligencia Artificial y sus definiciones, así como las aplicaciones industriales y ejemplos en los procesos de conformación de materiales, además los alcances, limitaciones y selección de las técnicas más destacadas con el fin de su posible utilización en procesos de estirado de chapas metálica.

**Capítulo III:** Las experiencias Nacionales e Internacionales en cuanto a la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial en los procesos de estirado de chapas metálicas. Elementos físico-matemáticos sobre las operaciones de conformación de materiales, con especial énfasis en los parámetros técnicos del proceso de estirado de chapas. Las regularidades a tener en cuenta en el desarrollo de los procesos de estirado para lograr la aplicación de los Métodos Numéricos e Inteligencia Artificial de estas.

# Capítulo 1

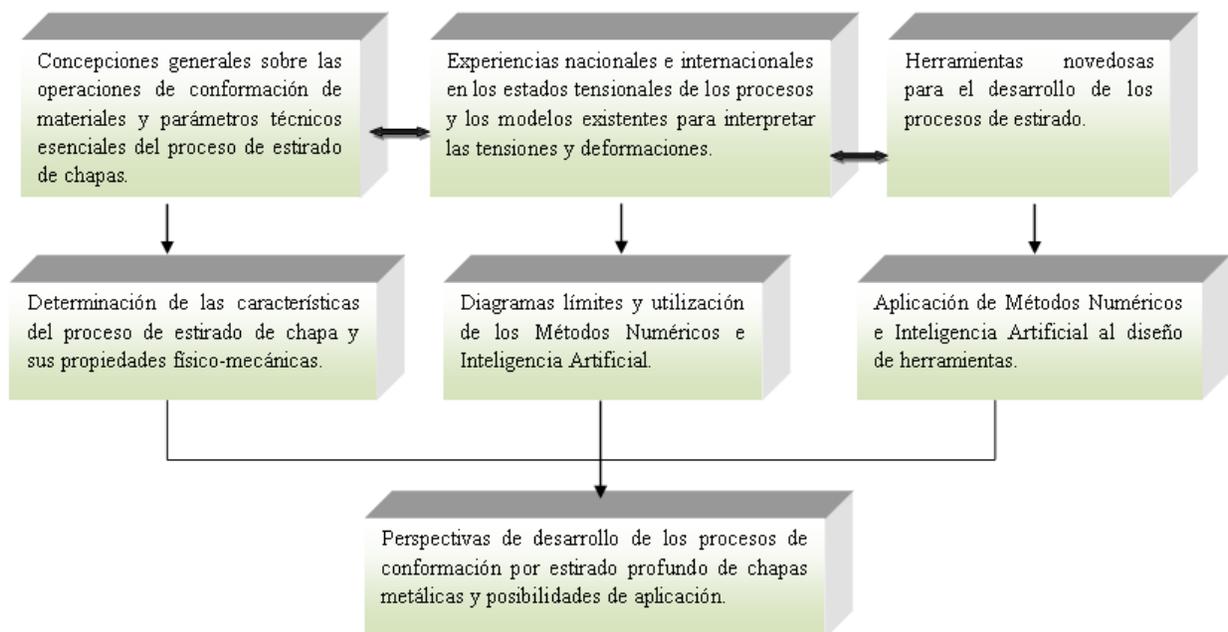
Facultad de Ingeniería Mecánica

## 1.- Estado del arte de los procesos de conformación por estirado de chapas metálicas.

### 1.1.- Conceptos generales sobre los procesos de estirado de materiales.

El objetivo de este capítulo es realizar un análisis del estado del arte sobre las principales experiencias nacionales e internacionales relacionadas con los procesos de conformación por estirado y estirado profundo de chapas, caracterizando las principales propiedades mecánico-tecnológicas, fórmulas para el cálculo de fuerza, tensiones y deformaciones, modelos existentes para estudiar e interpretar tensiones y las herramientas utilizadas para este tipo de procesos; apreciando las perspectivas de desarrollo en este campo, con vistas a desarrollar una valoración que posibilite arribar a conclusiones valiosas para los objetivos del trabajo.

La **figura 1.1** muestra el esquema de análisis general previsto para el desarrollo del capítulo y la interrelación entre sus elementos.



**Figura 1.1:** Método para el estudio y análisis de las herramientas, características y aplicación de Métodos Numéricos e Inteligencia Artificial.

En la **figura 1.1** se consideran:

1. Concepciones generales sobre las operaciones de conformación de materiales, con especial énfasis en los parámetros técnicos del proceso de estirado de chapas.
2. Las experiencias Nacionales e Internacionales en cuanto a los estados tensionales y los modelos existentes para interpretar las tensiones y deformaciones en estos procesos.
3. Las herramientas más utilizadas en el desarrollo de los procesos de estirado para lograr la aplicación de los Métodos Numéricos e Inteligencia Artificial de estas.

## Capítulo I: Estado del arte de los procesos de conformación por estirado de chapas metálicas.

La ejecución de un proceso de conformación presupone, en el material a conformar, cierta capacidad para variar su forma en proporciones satisfactoriamente grandes bajo el efecto de fuerzas exteriores sin que este pierda su cohesión.

Dentro del universo que representa la conformación de metales, los procesos de estirado de chapas ocupan un lugar destacado pues 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.

Según [5] son procesos en los cuales se efectúa el conformado de recortes de chapa hacia cuerpos huecos, llanos o profundos, o de estos cuerpos hacia otras formas bajo el efecto, fundamentalmente, de fuerzas de tracción.

El término estirado de chapas puede ser aplicado a un gran número de operaciones ejecutadas en una prensa con o sin el uso de matrices y punzones. Los procesos de estirado de chapas son realizados normalmente en frío y producen piezas de paredes finas, partiendo de una chapa metálica plana que sufre alargamiento en por lo menos, una dirección; siendo comprimida en otra dirección principal.

Los procesos de conformación por estirado de chapas tienen características que los diferencian de los demás tipos de procesos. La característica principal de ellos radica en la existencia de conformados tridimensionales, realizados con herramientas de forma, lo cual es a la vez, la principal diferencia entre los procesos de estirado de chapas y los procesos de doblado.

La gran similitud de las herramientas de forma con las utilizadas en los procesos de estampa de forja hace que al estirado de chapa popularmente se le llame estampado en frío, no afín con la designación de troqueles que se estipulan en las normas nacionales.

Otra característica y diferencia importante en estos procesos respecto a los procesos de doblado es la existencia de estados tensionales mucho más complejos en los primeros, pues además de existir tensiones normales de doblado aparecen tensiones a tracción y/o compresión, que estiran o recalcan la chapa localmente.

Existen varios tipos de procesos de estirado, estos se pueden ver a continuación:

- Repujado
- Conformación tensionada
- Expansionado
- Estirado con cojines deformables
- Repulsado
- Embutido

El embutido es sin lugar a dudas uno de los procesos que más posibilidades de trabajo brinda, obteniendo mediante él, productos con formas geométricas simples y complejas lo que viene aparejado de un comportamiento físico-mecánico en el material de mayor complejidad.

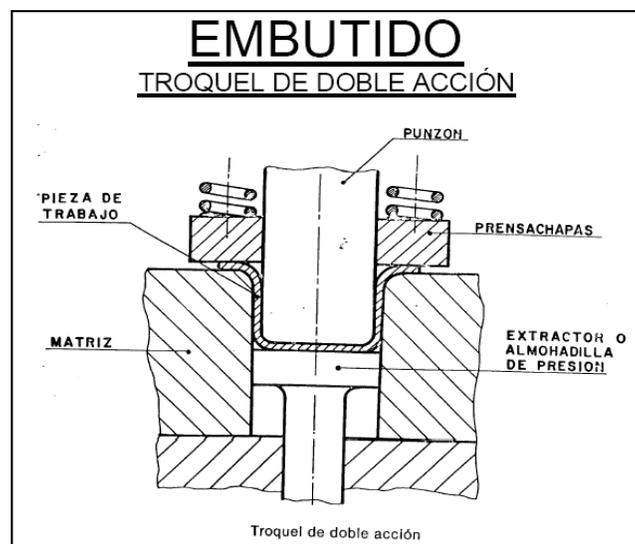
A continuación el autor ordena este tipo de procesos a partir de su amplitud de trabajo:

- Embutido simple
- Embutido con estirado
- Otros (Hidroconformado, Sistema Dualform, Estampado Incremental, etc.)

Dentro de los procesos antes mencionados se hará hincapié en el embutido con estirado, pues actualmente es un proceso de amplio uso mundial, aplicado con la intención de fabricar un producto con una forma deseada y sin fallas.

### **1.1.2.- Características de este tipo de proceso.**

En el embutido profundo una lámina de material inicialmente llana o preconformada se sujeta entre el dado o matriz y el prensachapa. El prensachapa aplica una fuerza que es necesaria para prevenir el arrugado y controlar el flujo de material en la cavidad del dado. Entonces el punzón se empuja en la cavidad del dado y transfiere la forma específica del punzón y el dado simultáneamente a la región que se escogió para ello. Durante la fase del conformado el material se sujeta mediante tensiones de compresión-tracción durante el conformado. Cuando la fuerza del prensa chapas es muy grande el proceso de embutido profundo se convierte en un proceso de estirado. En el proceso de conformación por estirado, el material es fijo en la región bajo el prensa chapas y conlleva a la reducción de los espesores en las partes restantes del espacio conformado en el que las tensiones son tensoras en casi todas las direcciones. **(Figura 1.2)**



**Figura 1.2: Partes que conforman la máquina herramienta utilizada para los procesos de conformación.[5]**

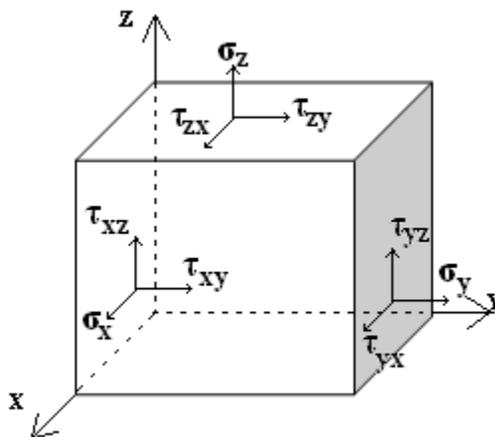
El conformado por estirado se usa para producir grandes partes poco profundas que deben sujetarse para lograr la deformación necesaria en aras de mejorar principalmente la resistencia por flexión. [6]

### **Propiedades mecánicas y tecnológicas de interés para los procesos de estirado.**

En los procesos de estirado de chapa, y en especial los de estirado profundo, todas las operaciones de deformación que ocurren están estrechamente vinculadas con la plasticidad del material y otras propiedades físico-mecánicas-estructurales (coeficiente de endurecimiento, anisotropía, relación máxima de embutición). Entre todas forman el límite de formabilidad del material. Es de gran importancia dedicar un tiempo a exponer algunas de estas teorías y características que presentan los materiales conformable.

### **Teoría de la plasticidad**

Al asumir un sistema de coordenadas  $(x, y, z)$  el estado de la tensión en un punto arbitrario del cuerpo se determina por 9 ejes de coordenadas de tensión medidas como fuerza por unidad de área (figura 1.3),  $\sigma$  denota la tensión normal y la  $\tau$  la componente tangencial.



**Figura 1.3: Paralelepípedo elemental mostrando las direcciones de las componentes de la tensión. [7].**

Según el criterio de Szcepiniski, [8] la tensión resultante que actúa sobre una cara cualquiera del cuerpo, se determina por las tres coordenadas individuales, de la forma  $(P_x, P_y, P_z)$  o como  $P_j (j = 1, 2, 3)$  ver en la **figura 1.4**.

$$P_j = \sigma_{ij} * a_i \quad (1.1)$$

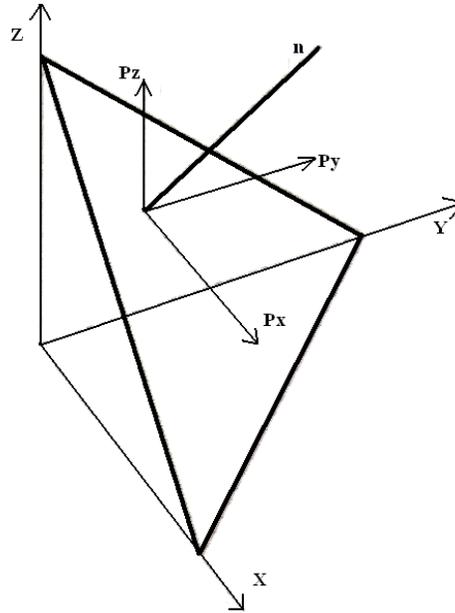
La componente de la tensión normal es igual a la suma de las proyecciones de las componentes  $P_j$  sobre la dirección n.

$$P_n = P_j a_j \quad (1.2)$$

Donde  $a_i$  y  $a_j$  representan las direcciones de los cosenos directores de la normal sobre una dirección arbitraria  $n$ .

La tensión tangencial, (la otra componente de la resultante de la tensión), se obtiene de la relación:

$$P_t^2 = P^2 - P_n^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - P_n^2 \quad (1.3)$$



**Figura 1.4: Tetraedro elemental representando una dirección de acción arbitraria  $n$  para la tensión.[7]**

Autores como [9], [10] y [11] coinciden en que sobre el plano en el que se encuentra el valor de la tensión principal  $\sigma$ , la tensión resultante debe estar dirigida a lo largo de la normal  $n$ , porque solo en tal caso, la tensión cortante puede obviarse. Esto permite plantear la condición:

$$P_j = a_j * \sigma \quad (1.4)$$

Sustituyendo esta relación en la ecuación 1.1 se obtiene:

$$a_{ij} a_i - \sigma a_j = 0 \quad (1.5)$$

Se conoce la propiedad en un sistema de ecuaciones de este tipo, de tener una solución diferente de cero en el caso de que la característica de su determinante sea igual a cero. [12]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma \end{bmatrix} = 0 \quad (1.6)$$

Resolviendo el miembro izquierdo de la ecuación matricial anterior queda una ecuación de tercer orden respecto a  $\sigma$

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma + I_3 = 0 \quad (1.7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \\ I_3 &= \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.8)$$

La ecuación 1.7 presenta 3 raíces que determinan los valores de las tensiones principales  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Es importante aclarar que esas raíces no dependen de la posición del sistema de coordenadas. Esto significa también que los coeficientes  $(I_1, I_2, I_3)$  son independientes de la rotación de los ejes  $(x, y, z)$  por ello constituyen las invariantes del tensor de la tensión. Si se asume que los ejes coordenados coinciden con las direcciones principales en un punto específico, las invariantes se pueden expresar en términos de la tensión principal de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 &= \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \\ I_3 &= \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \end{aligned} \quad (1.9)$$

La magnitud:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(I_1) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1.10)$$

Representa la tensión media.

El cambio de forma de un cuerpo bajo la influencia de la deformación plástica suele describirse en la literatura con la comparación de la colocación de los puntos del material, antes y después de la deformación.

Si un punto  $P$  de coordenadas  $(x, y, z)$  sufre, debido a la deformación, pequeños desplazamientos que se determinan por la magnitud  $U$ , con sus componentes  $(u_x, u_y, u_z)$  el incremento de la deformación en cada dirección es:

$$\partial s_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \partial s_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \partial s_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (1.11)$$

Los incrementos en los ángulos de distorsión se pueden expresar como:

$$\delta\gamma_{xy} = \left[ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right], \delta\gamma_{yz} = \left[ \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right], \delta\gamma_{zx} = \left[ \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right] \quad (1.12)$$

De esta manera, los incrementos de deformación en un punto específico pueden ser determinados por el tensor de incrementos de deformación, donde  $\delta s_{xy}, \delta s_{yz}, \delta s_{zx}$  representan la mitad de los incrementos de los ángulos de distorsión.

$$D = \begin{bmatrix} \delta s_x & \delta s_{xy} & \delta s_{xz} \\ \delta s_{yx} & \delta s_y & \delta s_{yz} \\ \delta s_{zx} & \delta s_{zy} & \delta s_z \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$$\delta s_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (1.14)$$

Con los elementos anteriores es fácil reescribir la matriz fundamental de deformaciones, la que referida a los ejes principales, se reduce a:

$$D = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

El tensor de incrementos de la deformación, tiene 3 invariantes, la primera de ellas:

$$\xi_1 = \delta s_x + \delta s_y + \delta s_z = 3\delta s_m \quad (1.16)$$

Representa la variación de incremento volumétrico. Sin embargo, empleando las hipótesis comunes y la ley de invariabilidad del volumen, es entendible que:

$$\xi_1 = 0$$

Actualmente se están estudiando por las relaciones existentes entre las invariantes de los tensores de la tensión y la deformación de la fluencia plástica del material para estados complejos de carga, las tensiones que se generan en el proceso, así como las deformaciones asociadas a ellas en los materiales.

La condición de fluencia para los materiales metálicos puede interpretarse, funcionalmente de la siguiente manera:

$$F = (J_1, J_2, J_3) \quad (1.17)$$

$$F = (I_1 : I_2 : I_3)$$

La magnitud de formabilidad es la cantidad de deformación que el material puede resistir sin que se produzca la fractura en un proceso particular de conformado. Las líneas límites de deformación (LLD) constituyen la representación grafica del límite de deformación de la chapa y brindan información sobre la formabilidad (conformabilidad) de esta en una sola embutición.[13]

Por otra parte, la práctica demuestra que la capacidad de un metal de deformarse plásticamente es su propiedad más útil e importante.[7]

El autor al investigar la bibliografía existente sobre plasticidad en materiales metálicos y su relación con la deformación, reconoce la unidad de criterios de los investigadores acerca del papel preponderante que tienen las dislocaciones en este fenómeno.

Considerando la teoría de [14] sobre los fenómenos de bifurcación y localización de la deformación se puede razonar que la respuesta mecánica general de un material puede representarse en forma diferencial simple por la relación:

$$\partial\sigma = h\partial\varepsilon + s\partial\log\varepsilon \quad (1.18)$$

La cual relaciona la tensión  $\sigma$ , la deformación plástica  $\varepsilon$  y su derivada con respecto al tiempo,  $\dot{\varepsilon}$ , y revela dos características propias del material, la razón de endurecimiento por deformación  $h$ , y la sensibilidad del material a la velocidad de deformación de la tensión  $s$ :

$$h = \left. \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} \right|_{\dot{\varepsilon}} \quad s = \left. \frac{\partial\sigma}{\partial\log\varepsilon} \right|_{\dot{\varepsilon}} \quad (1.19)$$

Si el material se conforma a una temperatura tal que se haga poco sensible a la velocidad de deformación, la curva real tensión-deformación, se ajusta bastante bien, en la zona de alargamientos uniformes, al modelo exponencial propuesto por Ludwick, según él:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.20)$$

El modelo anterior se diferencia poco de la relación empírica de endurecimiento formulada por [15] de la forma:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (1.21)$$

En las ecuaciones 1.20 y 1.21,  $\sigma$  es la tensión real efectiva (Pa),  $K$  es la constante de plasticidad del material (Pa),  $\varepsilon$  es la deformación real,  $\varepsilon_0$  el valor de la pre deformación y  $n$ , el coeficiente de endurecimiento por deformación, constituye la pendiente de la representación logarítmica doble en estas ecuaciones.

Existen varias propiedades mecánicas y tecnológicas en los procesos de estirado pero hay algunas que por su importancia en la práctica y por el interés que representan en estudios teóricos son imprescindibles, es el caso de la anisotropía normal (R), el coeficiente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) y la relación máxima de embutición ( $\beta$ ).

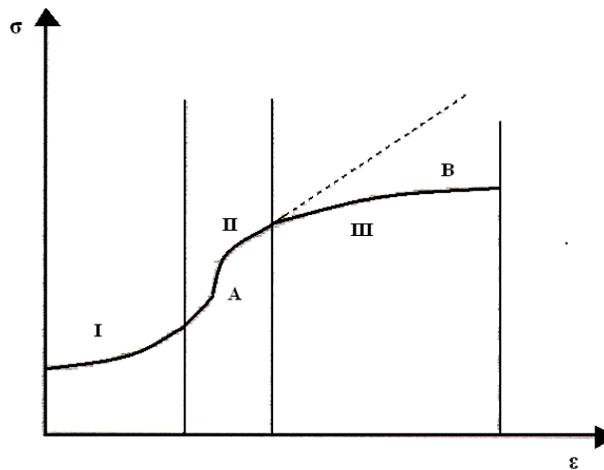
### **Coeficiente de endurecimiento por deformación.**

El endurecimiento por deformación es un valor específico para cada material, dependiendo del estado de deformación alcanzado. Este caracteriza además el cambio estructural en el material debido a la deformación plástica.

Algunos investigadores como es el caso de [16] plantean que el coeficiente de endurecimiento indica el ritmo creciente de la acritud, siendo esta siempre creciente con la deformación, pero el autor no está de acuerdo con lo anteriormente planteado y decide irse por la interpretación del crecimiento de la acritud precisada en la curva del modelo de Ludwick definida por la tangente de  $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$ :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = n * k * \varepsilon^{n-1} \quad (1.22)$$

En el cual asumiendo que sea proporcional el coeficiente de endurecimiento con la acritud, esta disminuye con la deformación dada en el cociente de  $\frac{\sigma}{\varepsilon}$ .



**Figura 1.5: Estados genéricos en la curva de endurecimiento por deformación.[6]**

Como se muestra en la **figura 1.5**, la zona I presenta una baja sensibilidad al endurecimiento por deformación, manifestándose pequeños cambios en la dureza del material. La zona II se considera como una etapa de flujo laminar, incrementándose la dureza y presentándose una gran sensibilidad del material al endurecimiento; y la zona III está caracterizada por el incremento de la dureza y un descenso de la sensibilidad al endurecimiento por parte del material.

La máxima profundidad de un conformado depende tanto de los valores máximos que adquiera la deformación como de la homogeneidad de la deformación en todos los puntos de la chapa. [7]

Asumiendo la relación de Ludwick junto a las teorías expuestas con anterioridad, se puede decir que el coeficiente de endurecimiento coincide con el alargamiento máximo:

$$n = \varepsilon_p \quad (1.23)$$

Resulta de interés destacar algunos factores que influyen sobre el coeficiente de endurecimiento dentro de los cuales se encuentra: naturaleza de la carga que actúa, la velocidad de aplicación de la carga externa, el sistema cristalino perteneciente al material, la energía de las dislocaciones, el tamaño del grano y la composición química del material.

## Anisotropía

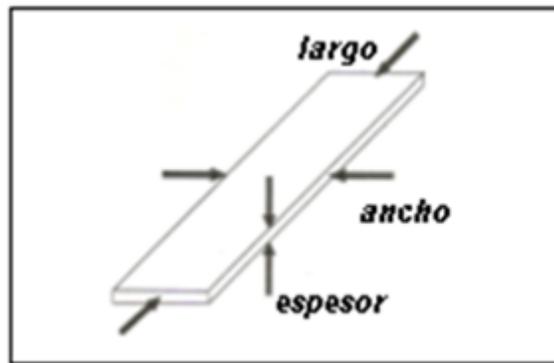
El factor de mayor importancia para aumentar la capacidad de embutición profunda de un acero es su textura cristalográfica: se trata de lograr una textura con orientación de los sistemas de deslizamiento que proporciona mayor resistencia a la deformación plástica en la dirección normal a la lámina que dentro del plano de esta. Este comportamiento se caracteriza por medio de la anisotropía normal, expresada por el coeficiente de anisotropía o de Lankford:[17]

$$r = \frac{\epsilon_{\text{ancho, efectivo}}}{\epsilon_{\text{espesor, efectivo}}} \quad (1.24)$$

Donde:

$$\epsilon_{a,e} = \ln \frac{a_i}{a_f} \quad \epsilon_{e,e} = \ln \frac{e_i}{e_f} \quad (1.25)$$

Representan las deformaciones efectivas ( $R_{eabs}$ ) en el ancho ( $a$ ) y en el espesor ( $e$ ) de la muestra, de acuerdo con la **figura 1.6**.



**Figura 1.6:** Orientación relativa de la medición de la deformación en una chapa delgada de acero.[17]

Se requiere un alto valor de  $r$ , correspondiendo a poca reducción de espesor y mayor deformación en el plano de la lámina. En la práctica es muy difícil medir la variación del espesor de la lámina delgada, pero se puede demostrar que:

$$r = \frac{\ln \frac{a_i}{a_f}}{\ln \frac{l_f a_f}{l_i a_i}} \quad (1.26)$$

Donde  $l$ , es la longitud de la muestra. En la práctica se mide el ancho ( $a$ ) de la muestra para un alargamiento ( $l$ ) determinado.

El valor de  $r$  depende también de la dirección dentro del plano de la lámina (se llama a esto anisotropía planar). Dependiendo de la dirección de medición, se obtienen así los valores

$r_0, r_{45}, r_{90}$  indicándose el ángulo entre la dirección de laminación y la dirección de la prueba de tracción. Los parámetros finales son el valor promedio del coeficiente de anisotropía,  $r_m$  definido según:

$$r_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (1.27)$$

Y la variación del coeficiente  $r$ , definido como sigue:

$$\Delta_r = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{2} \quad (1.28)$$

En la práctica se trata de lograr una  $r_m$  grande, lo que corresponde a un material que se deforma más fácilmente en su plano, sin reducir mucho su espesor, mientras que se trata de lograr una  $\Delta_r$  pequeña, correspondiendo a un material que se deforma de modo homogéneo en el plano, sin formación de las llamadas “orejas”, causadas por deformaciones diferentes según la orientación en la lámina.

### **Relación máxima de embutición.**

La relación máxima de embutición para un material ( $\beta$ ) está asociada a la reducción de diámetros que se pueden lograr en una sola embutición. [18] Es la relación que existe entre el diámetro de la pieza embutida (D) y el diámetro de la pieza existente (d) antes del proceso, expresándose de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (1.29)$$

Muchas veces el embutido deseado no se puede alcanzar en un solo paso por lo que, de ser necesario, después del primer paso seguirán otros que se acercarán a la forma y magnitudes deseadas. Igualmente [18] propone una vinculación entre la relación de embutido ( $\beta$ ) y el valor del índice de anisotropía ( $\bar{R}$ ), según la ecuación:

$$\ln \beta = \frac{1}{(1 + \mu)} \sqrt{\frac{(\bar{R} + 1)}{2}} \quad (1.30)$$

Siendo  $\mu$ , el coeficiente de fricción entre el material y la herramienta y  $\bar{R}$  el valor promedio del coeficiente de anisotropía ( $r_m$ ). Esta ecuación permite obtener un valor más aproximado a la realidad de la relación de embutido que los valores existentes en tablas.

### 1.1.3.- Formulas para el cálculo de la fuerza, tensiones y deformaciones en estos procesos.

Fuerza máxima de embutido

La variación de la fuerza de embutido durante el recorrido del punzón puede ser determinada de dos formas, a partir de las ecuaciones ofrecidas por la teoría de la plasticidad, o empleando ecuaciones empíricas.

$$F_D = \pi d_1 t_0 K_{fm} \ln \frac{D_0}{d_1} \quad (1.31)$$

El valor de  $K_{fm}$  es un valor intrínseco para cada material, resistencia media a la conformación, y se obtiene experimentalmente de la curva de fluencia del material.

Fuerza en el prensachapas

La indeseable aparición de arrugas en las piezas puede evitarse empleando un prensachapas. Existen diversas recomendaciones empíricas de taller que guían el uso o no del prensachapas. La fuerza necesaria e el prensachapas ( $F_{BH}$ ) es función de la presión necesaria que ejerce el prensachapas ( $P_{BH}$ ) sobre el área de contacto de la chapa ( $A_{BH}$ ) puede determinar por:

$$F_{BH} = A_{BH} P_{BH} \quad (1.32)$$

La presión necesaria  $P_{BH}$  depende del material de la chapa, del espesor relativo y de la relación de embutido. Valores de orientación  $P_{BH} = 12 \text{ Kg/cm}^2$  (1.17 MPa) para el aluminio, 20 (1.96MPa) para el latón, 25 (2.46 MPa) para aceros de bajo contenido de carbono y 30 (2.96 MPa) para otros tipos de acero.

$$A_{BH} = \frac{\pi}{4} [D_0^2 - (d_1 + 2r_2)^2] \quad (1.33)$$

Para la 1<sup>ra</sup> operación en embutidos cilíndricos

Sin embargo, [19] ofrece, para el cálculo de la fuerza del prensachapas, la ecuación:

$$F_{BH} = 0.785(D_2 - d_1)P_{BH} \quad (1.34)$$

El trabajo de recalcado se realiza fácilmente si el cilindro que se obtiene es poco profundo, es decir, si la relación entre el diámetro  $d_1$  del cilindro y el  $D_0$  de la chapa es pequeña. Recomendaciones de taller establecen que si la relación:

$$\frac{d_1}{D_0} \geq 0.55 \quad (1.35)$$

La operación se puede realizar sin pisador. También pueden absorberse los pliegues, si la diferencia entre el diámetro  $D_0$  del desarrollo y el diámetro  $d_1$  de la pieza es inferior a 20 veces el espesor del material. Por lo recomendaciones de taller establecen que:

$$D_0 - d_1 \geq 22t_0 \quad (1.36)$$

Es necesario el uso del prensachapas en la primera operación.

Fuerza máxima de rotura en la chapa

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,

$$F_{cr} = \pi d t_0 \sigma_t \quad (1.37)$$

### **Variaciones en el espesor de la pieza**

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

$$t = t_0 \exp(\epsilon_3) [-(1 + \beta)\epsilon_1] = t_0 \exp(-\epsilon_1) \quad (1.38)$$

### **Juego de embutido**

Si el juego de embutido es muy grande, se corre el peligro que la forma cilíndrica embutida no se logre, aun cuando el borde superior de la copa sigue siendo ampliado. Por otro lado, si el juego de embutido es muy pequeño, aumenta la fuerza de embutido con el peligro de la aparición de grietas. Además puede ocurrir la soldadura entre el punzón y la pieza.

$$c_D = t + K\sqrt{10t} \quad (1.39)$$

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

### **Radio de punzón y matriz**

El radio de la matriz  $r_2$ , depende del diámetro de la pieza y de su espesor. Con el objetivo de disminuir la fuerza de embutido e incrementar la relación de embutido, es conveniente aumentar el radio de la matriz, sin embargo, ello reduce el área de contacto entre el prensachapa y la chapa, incrementándose la tendencia a la formación de arrugas.

$$r_2 = 0.035[50 + (D_0 - d_1)]\sqrt{t_0} \quad (1.40)$$

En ocasiones se emplea también la ecuación:

$$r_2 = (5 - 10)t_0 \quad (1.41)$$

El radio del punzón  $r_1$  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.

**1.1.4.- Perspectivas de desarrollo de los procesos de estirado de chapas. Aplicaciones industriales.**

La investigación que se ha realizado, apoyándose en una exhaustiva búsqueda bibliográfica acerca de las técnicas, procedimientos y elementos que caracterizan los procesos de conformación por estirado profundo de chapas, le han permitido al autor considerar la importancia actual del estudio de ellos. Los países desarrollados le conceden gran valor al perfeccionamiento de estos procesos, implementando métodos novedosos para su evaluación y el resto de las naciones en vías de desarrollo se han dado cuenta de la necesidad que representa el manejo de ellos. Cuba se encuentra dentro de los países en vías de desarrollo y se reconoce la existencia de factores que influyen negativamente en el estudio y desarrollo de estos procesos, dentro de los que se destacan:

- Tecnologías inadecuadas.
- Infraestructura deficiente.

La interpretación del comportamiento de los procesos de estirado profundo de chapas y la optimización de diversos parámetros de estos ha suscitado el interés de investigadores físicos, matemáticos y metalurgistas para estudiar las deformaciones plásticas a escala atómica, así como la correlación entre las propiedades policristalinas y el cristal simple. Por otro lado, los ingenieros y diseñadores desean predecir el rango límite de las deformaciones en relación con la resistencia del material, por lo que deben desarrollar métodos y técnicas para el estudio y modelación de la distribución de tensiones y deformaciones en un material.

Dentro de las características que se desean perfeccionar e interpretar, se destacan por su predominio en la revisión bibliográfica realizada:

- La formabilidad límite y la influencia del endurecimiento de la textura y su relación con la teoría de la plasticidad.
- La anisotropía normal de la chapa metálica y su influencia en la interpretación de los diagramas límites de conformado.
- La naturaleza de las deformaciones en formas complejas y la caracterización del flujo del material.

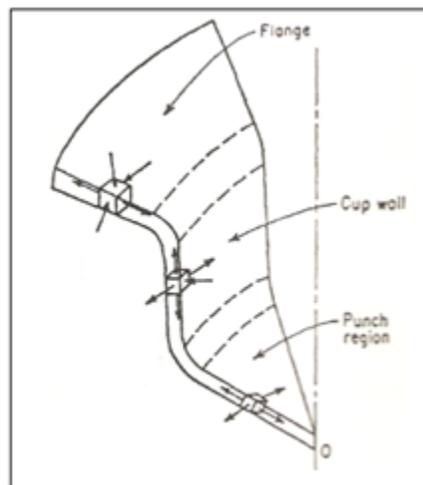
Por otro lado, entre los estudios más novedosos que aparecen en la literatura técnica consultada sobre el desarrollo de las características mecánicas y tecnológicas del material, se destacan los siguientes:

- Diseño óptimo de procesos de conformado de chapas mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial.
- Diseño óptimo de procesos de conformado de chapas mediante el uso del método de los elementos finitos y otros métodos de optimización discretos.
- Modelación de los procesos de conformación por estirado profundo.

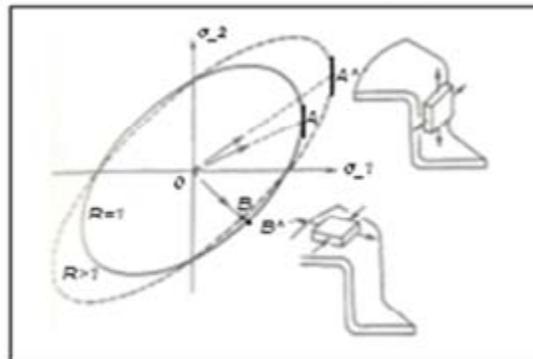
- Desarrollo de métodos predictivos para determinar la formabilidad mediante el uso de los diagramas Límite de conformado.
- Modelación de la evaluación de la conformabilidad de la lámina metálica utilizando el análisis de los diversos estados tensionales que aparecen en el proceso.
- Formulaciones numéricas y algoritmos para la resolución de problemas de contacto en la simulación de los procesos de conformado.

### **1.2.- Estados tensionales y de deformación en los procesos de estirado.**

Según [20] en el momento en que se realiza el proceso de embutición profunda, el material se expone a diferentes tipos de deformación como muestra la **figura 1.7**. La parte central de la muestra, debajo del punzón, se estira en dos direcciones y tiene tendencia a reducir su espesor, mientras que el borde exterior se jala hacia el interior, por debajo del anillo sujetador, el cual ejerce una fuerza de compresión para evitar arrugas en la lámina, ya que el diámetro exterior tiene que disminuir. Finalmente en el costado de la pieza, se presenta un importante alargamiento, llevando aquí también un estado de esfuerzos biaxiales de tensión, con tendencia a reducir el espesor de la lámina (**figura 1.8**). Para las aplicaciones de embutición profunda, es importante reducir esa tendencia al mínimo.



**Figura 1.7.- Esfuerzos presentes durante la embutición profunda de una copa.[17]**



**Figura 1.8.- Esfuerzos en la embutición de una copa y efecto de la anisotropía.[17]**

**1.2.1.- Modelos existentes en la literatura para interpretar tensiones y deformaciones.**

Los modelos que describen el comportamiento plástico de los materiales metálicos policristalinos son principalmente de dos tipos: los basados en la textura cristalográfica y los llamados femonológicos. Los primeros obligan al estudio microscópico del material y los segundos al estudio macroscópico, los cuales son más a fin a la mecánica clásica.

Los modelos femonológicos describen el comportamiento plástico de un material desde el punto de vista macroscópico, asumiéndose que este está correctamente descrito por una superficie que se deforma plásticamente. Bishop y Hill en 1951 y Hecker en 1976 demostraron que para materiales policristalinos estas suposiciones son validas y que una superficie plástica puede ser definida adecuadamente de modo que los modelos describan el comportamiento plástico de los materiales policristalinos, isotrópicos y anisotrópicos. [21]

El autor está de acuerdo con [2] cuando dice que un criterio de plasticidad puede interpretarse como un modelo que define una superficie en el espacio de las tensiones, es decir, una superficie continua, tal que  $F(\sigma) = 0$ . Esa superficie corresponde a todos los estados tensionales para los que ocurre en el inicio de la deformación plástica.

Un poco antes del siglo pasado, muchos fueron los investigadores que propusieron criterios de plasticidad para describir el comportamiento plástico de materiales isotrópicos y anisotrópicos. Los primeros fueron en un inicio propuestos por:

$$\sigma_1 - \sigma_m = Y \tag{1.42}$$

Tresca (1864)

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2Y^2 \quad \alpha = 3\sigma/\sigma = 2Y^2 \tag{1.43}$$

Von Mises (1913)

$$I_2^3 - cJ_3^2 = k^2, \quad c \tag{1.44}$$

Drucker (1949)

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^{2n} + (\sigma_2 - \sigma_3)^{2n} + (\sigma_1 - \sigma_3)^{2n} = 2Y^{2n} \tag{1.45}$$

Hershey (1954) y Hosford (1972)

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_m$  son la mayor y tensión media principal del tensor de tensiones  $\sigma$ ;  $Y$  es la tensión límite de elasticidad en tracción uniaxial, el cual está en función del estado de deformación del material.

Son  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  las tensiones principales del tensor de tensión  $\sigma'$ ;  $I_2$  y  $J_3$  son las segunda y tercera invariante del tensor de tensiones  $\sigma'$  y  $k^2 = 27(Y/3)^6$ . El criterio de plasticidad de Drucker se encuentra entre los propuestos por Tresca y Von Mises. El criterio propuesto por Hershey y Hosford constituye una evolución del criterio cuadrático de Von Mises, reduciéndose este para  $\alpha = 1.0$ . [2]

Por otra parte, los criterios de plasticidad anisotrópica fueron descritos por varios autores, destacándose entre ellos los formulados por [22], [23], [24], [25], [26] y otros más recientes como es el caso de Balart et al. (1989, 1991, 1994, 1997 y 2000) descritos por [2] en su investigación, [27], [28], entre otros.

Hill 1948

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & F+H & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = Y^2. \quad (1.46)$$

$$F = \frac{H}{r_{90}}; \quad G = \frac{1}{r_0 + 1}; \quad H = r_0 * G; \quad L = M = 1.5; \quad N = \frac{1(r_0 + r_{90}) * (2r_{45} + 1)}{2 r_{90}(r_0 + 1)}$$

Hill 1979

$$|\sigma_1 + \sigma_2|^{\alpha} + (1 - 2r)|\sigma_1 - \sigma_2|^{\alpha} = 2(1 + r)Y^{\alpha} \quad \alpha = 1.14 + 0.86r \quad (1.47)$$

Hill 1990

$$|\sigma_1 + \sigma_2|^{\alpha} + \frac{\sigma_b^{\alpha}}{r^{\alpha}} |\sigma_1 - \sigma_2|^{\alpha} + |\sigma_1^2 + \sigma_2^2|^{\frac{\alpha}{2}-1} [-2A(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \cos(2\beta)] = (2\sigma_b)^{\alpha} \quad (1.48)$$

Hill 1993

$$\frac{\sigma_{XX}^2}{\sigma_f^2} - C \frac{\sigma_{XX}\sigma_{YY}}{\sigma_0\sigma_{90}} + \frac{\sigma_{YY}^2}{\sigma_{90}^2} + \left[ (A + B) - \frac{A\sigma_{XX} + B\sigma_{YY}}{\sigma_b} \right] \frac{\sigma_{XX}\sigma_{YY}}{\sigma_0\sigma_{90}} = 1 \quad (1.49)$$

Karafillis & Boyce (1993)

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{s}) &= (1 - c)\Phi_1(\mathbf{s}) + c \frac{g^{2k}}{2^{2k} + 1} \Phi_2(\mathbf{s}) = 2Y^{2k} \\ \Phi_1(\mathbf{s}) &= (s_1 - s_2)^{2k} + (s_2 - s_3)^{2k} + (s_3 - s_1)^{2k} = 2Y^{2k} \\ \Phi_2(\mathbf{s}) &= s_1^{2k} + s_2^{2k} + s_3^{2k} = \frac{2^{2k} + 2}{g^{2k}} Y^{2k} \end{aligned} \quad (1.50)$$

Balart Yld91(1991)

$$\mathbf{s} = L_1(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{K}) \quad \text{y} \quad |s_1 - s_2|^a + |s_2 - s_3|^a + |s_3 - s_1|^a = 2Y^a \quad (1.51)$$

Balart Yld'00-2d (2000)

$$\phi = \phi^{(1)} + \phi^{(2)} \quad \text{donde:} \quad \phi^{(1)} = |S_1^{(1)} - S_2^{(1)}|^\alpha \quad \text{y} \quad \phi^{(2)} = |2S_2^{(2)} + S_1^{(2)}|^\alpha + |2S_1^{(2)} + 2S_2^{(2)}|^\alpha \quad (1.52)$$

Vegter (1999)

$$\begin{aligned} \sigma_{Vegter}(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}) &= Y \\ \frac{\sigma_u}{\sigma_{Vegter}} &= (1 - u)^2 \sigma_1 |p_1 + 2u(1 - u)\sigma_1 |p_F + u^2 \sigma_1 |p_2 \\ \frac{\sigma_2}{\sigma_{Vegter}} &= (1 - u)^2 \sigma_2 |p_1 + 2u(1 - u)\sigma_2 |p_F + u^2 \sigma_2 |p_2 \end{aligned} \quad (1.53)$$

Banabic (2000)

$$\begin{aligned} & a(b\Gamma + c\psi)^{2k} + a(b\Gamma - c\psi)^{2k} + (1 - a)(2c\psi)^{2k} = Y^{2k} \\ & \Gamma = (d + e)\sigma_{xx} + (e + f)\sigma_{yy} \\ & \Psi = \sqrt{\left[\frac{d - e}{2}\sigma_{xx} + \frac{e - f}{2}\sigma_{yy}\right]^2 + g^2\sigma_{xy}^2} \end{aligned} \quad (1.54)$$

### Criterio de Hill 1948.

El criterio de plasticidad propuesto por Hill en 1948, el cual se muestra en la ecuación matemática 1.46, es una generalización del criterio cuadrático isotrópico de Von Mises, para materiales anisotrópicos ortotrópicos. En la cual  $F, G, H, L, M$  y  $N$  son los parámetros de anisotropía del criterio de Hill 1948.

Adoptándose un tensor de  $2^{do}$  orden, puede representarse pseudo-vectorialmente por un vector de 6 componentes,  $\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5 \ \sigma_6]^T$  donde:

$$\sigma_1 = \sigma_{xx}, \quad \sigma_2 = \sigma_{yy}, \quad \sigma_3 = \sigma_{zz}, \quad \sigma_4 = \sigma_{yz}, \quad \sigma_5 = \sigma_{xz}, \quad \sigma_6 = \sigma_{xy}.$$

Finalmente, los 6 parámetros de Hill ( $F, G, H, L, M$  y  $N$ ) necesarios pueden ser determinados a partir de 3 ensayos de tracción uniaxial, respectivamente a  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  en la dirección del laminado.

### Criterio de Hill 1979.

Análisis experimentales realizados por Hill (1979) y Drucker (1951) demostraron que para superficies plásticas con estructuras CFC (cúbicas centradas en las caras) y CCC (cúbicas centradas en el cuerpo) los criterios de plasticidad cuadráticos no describen correctamente los fenómenos de plasticidad.

De ahí que Hill en 1979 propusiera un nuevo criterio de plasticidad, utilizando el exponente ( $\alpha$ ). Luego aplicando este criterio a estados planos de tensiones, el criterio de Hill 1979 se expresa de la forma descrita en la expresión (1.47), donde Bressan 2002 propone una relación empírica para el cálculo del parámetro ( $\alpha$ ) la cual es válida para valores de  $\bar{r}$  inferiores a 0.8; dejando de ser lineal para valores más allá de ese límite. Bressan expresa que el límite del parámetro ( $\alpha$ ) es 2.

**Criterio de Hill 1990.**

Hill (1990) crea una extensión del criterio planteado por él en 1979, la cual se muestra en la expresión (1.48); superando este la limitación de coaxialidad impuesta por el anterior, entre los ejes y las direcciones principales de tensión, en la cual  $\beta$  es un ángulo definido por los ejes de ortotropía y las direcciones principales de tensión y  $\sigma_b$  es la tensión límite de elasticidad biaxial, obtenida a partir de ensayos de tracción biaxial.

**Criterio de Hill 1993.**

Hill (1993) propone un nuevo criterio, en el cual procura modelar el comportamiento anisotrópico de materiales, evidenciando propiedades mecánicas particulares, tales como  $\sigma_0 = \sigma_{p0}$  y  $\tau_0 = \tau_{p0}$ ; exponiéndolo en la expresión (1.49) donde los 3 parámetros de este criterio,  $A, B, C$ , pueden ser obtenidas a partir de las expresiones ofrecidas por Hill, siendo necesarios los datos experimentales de ensayos de tracción uniaxial a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y biaxial.

Como se muestra en la figura 1.9 del anexo I, el investigador Banabic (1997) [29] demostró la gran similitud entre el criterio de Hill 1993 y los resultados experimentales realizados. Evidenció la mejor suficiencia del criterio de modelación de Hill 1948 para la superficie de anisotropía del acero, sobre la del aluminio; y en el caso del aluminio el criterio de Von Mises logró resultados superiores a los del criterio de Hill 1948.

**Criterio de Karafillis & Boyce (1993).**

Estos investigadores crearon un criterio de plasticidad capaz de reproducir diferentes familias de superficies de plasticidad isotrópica, siendo introducida la anisotropía a través de una transformación lineal del tensor de tensiones, es decir a través de un tensor de anisotropía de cuarto orden  $L$ .

Karafillis & Boyce (1993) adoptan una metodología que propone Balart et al., consistente en multiplicar las componentes del tensor de tensiones del material anisotrópico por constantes diferentes, obteniendo de este modo un nuevo tensor con un estado plástico isotrópico equivalente. El estado de tensión desviador es llamado “Estado Plástico Isotrópico Equivalente” y definido por:

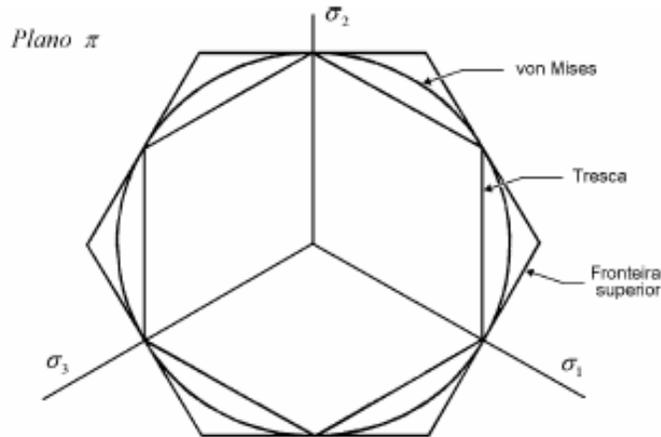
$$s = L : (\sigma - X) \text{ o } s = L : (\sigma' - X)$$

Siendo  $X$  el tensor de tensiones inversas y  $L$  un tensor de cuarto orden, simétrico y desviador. La componente hidrostática del tensor  $s$ , será nula e independiente de la componente hidrostática del tensor  $\sigma$  o  $(\sigma - X)$ , una vez que el tensor  $L$  tenga las siguientes propiedades:

$$L_{ijkl} = L_{jikl} = L_{jilk}, \quad L_{ijkl} = L_{klij}, \quad L_{ijkl} = L_{ijkk} = 0$$

Las expresiones que describen estos investigadores modelan todas las superficies de plasticidad isotrópicas comprendidas entre las fronteras límites inferior y superior del plano desviador.

La frontera inferior coincide con la superficie de plasticidad de Tresca (1864) y la superior representa una superficie definida con base en la semisuma de los dos mayores diámetros de círculos, descrito por Hosford (1972). En la **figura 1.10** se representa esquemáticamente un plano desviador  $\pi$  (plano perpendicular es la línea representativa de presión hidrostática)



**Figura 1.10: Representación geométrica del criterio de plasticidad de Von Mises y sus respectivos límites inferior y superior, representados en un plano desviador  $\pi$ . [2].**

Introduciendo el concepto de “Estado Plástico Isotrópico Equivalente” al criterio de plasticidad isotrópico generalizado propuesto por Karafillis & Boyce 1993 se obtienen las expresiones (1.50), donde  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  son las tensiones principales del tensor  $(\underline{s})$  y  $Y$  es la tensión límite de elasticidad en la tracción uniaxial.

La **figura 1.11** que muestra el anexo 2 compara los resultados obtenidos por el criterio de plasticidad de Karafillis & Boyce 1993 con los resultados experimentales y con los resultados obtenidos a partir de otros criterios de plasticidad.

### **Criterio de Balart Yld91.**

Los criterios de plasticidad propuestos por Balart et al. son válidos para un estado plano de tensión, con excepción del criterio Yld91, de ahí que el autor destaque inicialmente este.

El criterio de plasticidad Yld91 es una extensión del criterio isotrópico de Hosford, para materiales que presentan exclusivamente anisotropía ortotrópica. Este se resume mediante las expresiones (1.51), siendo  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  las tensiones principales del tensor  $\underline{s}$  y  $Y$  es la tensión límite de elasticidad en tracción uniaxial. El exponente  $\alpha$  puede asumir cualquier valor real superior a 1.0.

### **Criterio de Balart Yld89.**

Para crear este criterio el investigador tuvo en consideración los mismos preceptos pero con limitaciones todavía en la modelación de anisotropía asociada al estado plano de tensión.

### **Criterio de Balart Yld94.**

A partir de este criterio, todos los modelos descritos por Balart son evoluciones del descrito en 1991. El investigador demostró que para algunas ligas de aluminio con elevadas tasas de reducción por laminación en frío, la superficie de plasticidad presentaba diferencias significativas en relación a superficies modeladas por su criterio Yld91, por lo que Yld94 fue creado para acabar con esa dificultad.

### **Criterio de Balart Yld96.**

Los investigadores determinaron que pequeñas variaciones de forma de la superficie de plasticidad pueden modificar significativamente los valores del coeficiente de anisotropía  $r$  previstos por los criterios anteriormente descritos, por lo que una vez más se creó un nuevo criterio.

### **Criterio de Balart Yld'00-2d**

El anterior criterio demostró tener ciertas dificultades, una era la gran complejidad matemática y no estaba probada su convexidad por lo que nuevamente Balart y su equipo de investigadores propusieron un nuevo criterio de plasticidad. Este era convexo, válido para estados planos de tensión, matemáticamente mucho más simple que el Yld96 y describía el comportamiento anisotrópico. La expresión (1.52) muestra este criterio.  $s_1^{(0)}$  y  $s_2^{(0)}$ , son tensiones principales del tensor  $S^i$ , con  $i = 1, 2$ .

Este criterio presenta la incapacidad de prever correctamente los valores experimentales del coeficiente de anisotropía  $r$  para  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  relativamente en la dirección del laminado.

### **Criterio de Vegter. (Vegter et al 1999)**

Este criterio tiene características que lo diferencian de los antes propuestos. Se basa directamente en valores experimentales medidos a partir de ensayos de corte puro, tracción uniaxial, tracción biaxial y de deformación plana como se representa en la **figura 1.12**.

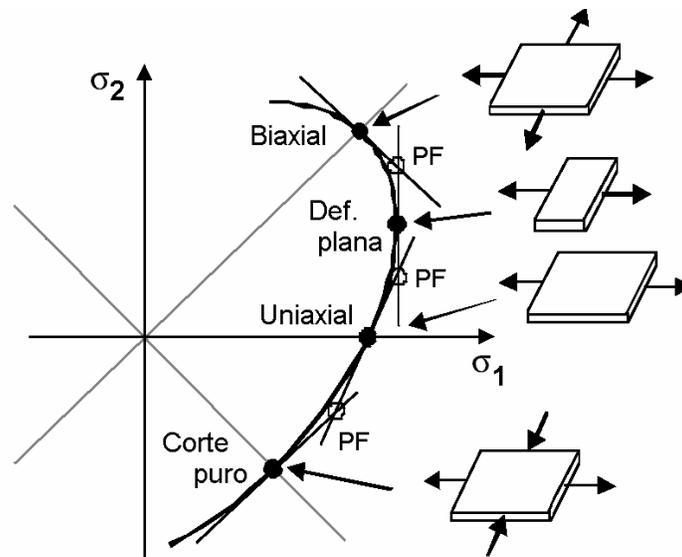


Figura 1.12: Superficie de plasticidad obtenida por el criterio de plasticidad de Vegter. Los círculos negros representan la información obtenida experimentalmente y los puntos blancos son puntos ficticios.[28].

Definiendo que  $\sigma_1 > \sigma_2$ , y asumiendo que, desde el punto de vista del criterio de plasticidad el material se comporta idénticamente en tracción y en compresión, apenas es necesario describir la zona de superficie de plasticidad comprendida entre los estados de tracción biaxial ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) y corte puro ( $\sigma_1 = -\sigma_2$ ), o sea, se describe el comportamiento plástico anisotrópico de un material dado utilizando apenas un cuarto de superficie de plasticidad total.

El criterio se describe en las expresiones (1.53), donde  $\sigma_{Vegter}$  es una tensión equivalente calculada en función de componentes del tensor de tensiones referencial de ortotropía y  $Y$  es la tensión límite de elasticidad en tracción uniaxial del material. Las funciones de interpolación de segundo grado, deben garantizar la continua evolución de las superficies de plasticidad y permiten el cálculo de  $u$ , el cual es el valor del parámetro de la función interpoladora tal que  $u \in [0,1]$ , y de  $\sigma_{Vegter}$ , valor de la tensión equivalente del criterio; valores estos necesarios para definir la superficie normal y el criterio de plasticidad respectivamente. Las características más relevantes de este criterio son su flexibilidad y simplicidad, demuestra la facilidad y el rigor con que el dominio del estado plano de tensión consigue representar y reproducir cualquier superficie de plasticidad.

### Criterio de Banabic (2000)

Por su parte Banabic et al propone el criterio (1.54) de plasticidad, donde  $a, b, c$  y  $k$  son parámetros de anisotropía y  $\Gamma$  y  $\psi$  son funciones del tensor  $s = L(\sigma - X)$ .  $L$  es un tensor simétrico y desviador de cuarto orden. En caso de un estado plano de tensor de tensiones  $s$  puede ser dado de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{zz} \\ s_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & e & 0 & 0 \\ e & f & 0 & 0 \\ -(d+e) & -(e+f) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

Siendo  $d, e, f$  y  $g$  nuevos parámetros de anisotropía.  $\Gamma$  y  $\psi$  Son funciones de los componentes de tensor de tensiones.

Hasta aquí se ha podido observar la diversidad de criterios existentes en la literatura técnica en cuanto a la teoría de la plasticidad y los criterios propuestos por varios estudiosos del tema.

A partir del estudio realizado por el autor y la unidad de criterios existente entre varios investigadores nacionales y foráneos, se decide considerar el criterio de Hill 1948, como modelo guía para regirse en la continuidad del presente trabajo, el cual consiste en proponer una guía metodológica que facilite la elaboración y optimización del proceso de estirado profundo en chapas metálicas, dentro de las cuales hay que tener en cuenta el comportamiento plástico de los materiales. Este criterio es el más comúnmente asociado en la literatura existente a la descripción de materiales de comportamiento ortotrópico, tales como chapas metálicas laminadas, constituyendo un marco referencial en la teoría de la plasticidad.

### 1.2.2.- Diagramas límite para las operaciones de estirado de chapas.

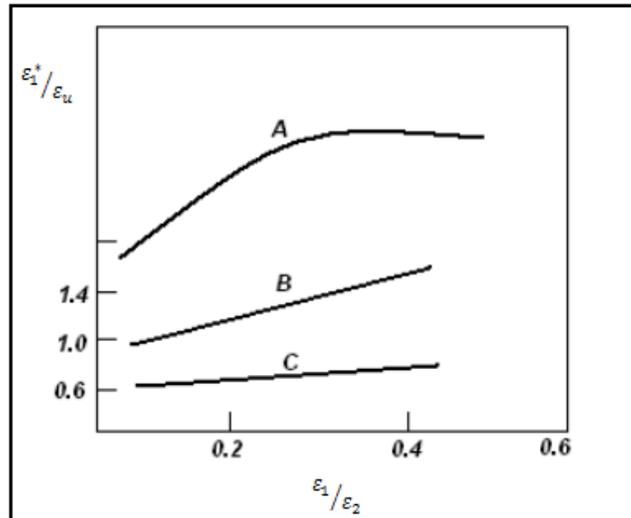
Los fenómenos de fractura y el agrietamiento de los materiales desde el punto de vista teórico-experimental continúan siendo estudiados, en los últimos años se ha reportado la aplicación de estas investigaciones a los procesos de conformación de chapas metálicas; científicos del ámbito nacional como [30] y del orbe como es el caso de [31] y [12] son muestra de ello.

El límite de deformación para el conformado de una chapa, depende en buena medida de las propiedades del material y de las condiciones en que se le suministra la carga; el comportamiento del material sin embargo, no es posible predecirlo fácilmente solo a través de datos experimentales que se emplean para cualquier circunstancia, independientemente del estado a que está sujeto el material en un proceso en particular. La demanda de una teoría que pueda ser cómodamente introducida en la simulación por métodos numéricos de los procesos de deformación, permitirá una predicción más realista de los efectos del punzón sobre la chapa y también podrá predecir qué zonas de esta sufrirán el agrietamiento indeseado.

A partir de los años 70 fue que se demostró la existencia de dos tipos diferentes de límites de comportamiento para diferentes materiales; aquellos que muestran un rápido ascenso en el límite de deformación con el incremento de la biaxialidad de la deformación, representados en la curva A, y otros en los que esta dependencia es menos pronunciada, curvas B y C. estos se pueden ver en la **figura 1.13**.

Hay unidad de criterios en los investigadores en cuanto a que las Líneas Límites de Deformación (LLD) obtenidas por el método de estirado bajo punzón son aceptables para las exigencias de la

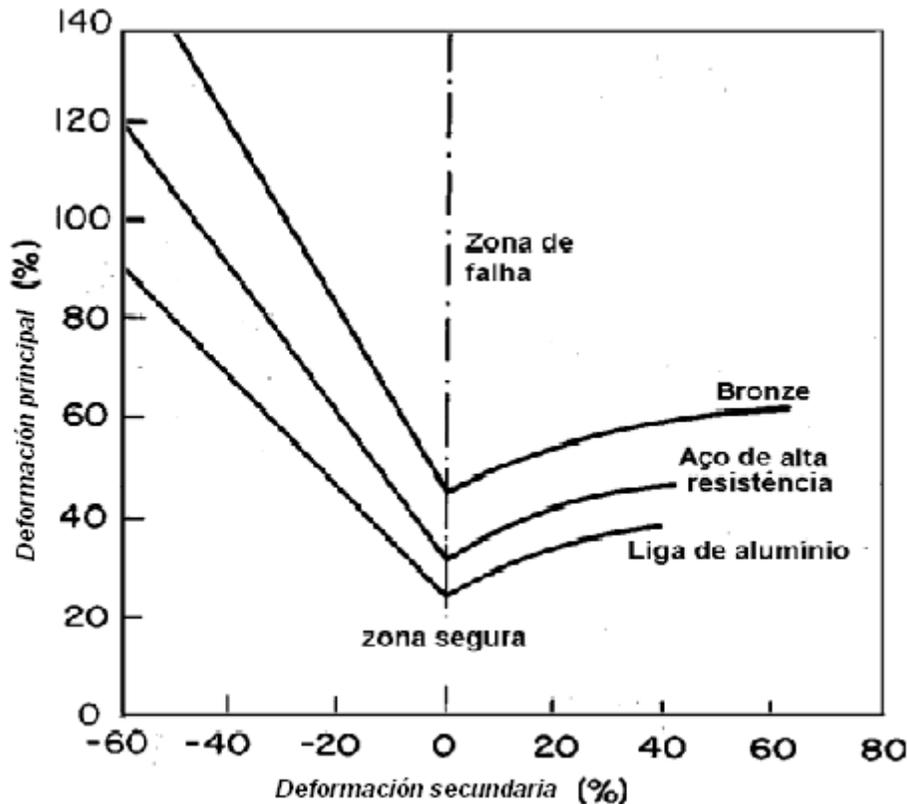
producción industrial. En estos casos, se desarrollan gradientes de deformación ya desde las primeras etapas y las deformaciones máximas se concentran progresivamente en el polo y terminan con el desarrollo de la estricción y posterior fractura.



*Figura 1.13: Deformación límite  $\varepsilon_1^*$  para estirado plano con respecto al alargamiento uniforme  $\varepsilon_u$  en tracción como una función de la relación de deformación  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ . Según Keeler y Backofen (1973)[7].*

En el estirado plano, por el contrario, no existen apenas gradientes de deformación, salvo en las últimas etapas de la deformación, cuando se ha formado ya la estricción; por estas razones se plantea que la relativa incertidumbre que acompaña la evaluación de los diagramas límites de conformación de chapas estiradas bajo punzón, no existen con el estirado plano. Estos tipos de diagramas tienen interés para comprobar la validez de los diagramas teóricos y representan una simplificación notable para la teoría de la plasticidad.

En el diagrama de la **figura 1.14**, las mayores y menores deformaciones superficiales en un punto crítico son evaluadas como las arrugas localizadas en una chapa deformada y los lugares de deformación que producirán fallas en las operaciones de conformado



*Figura 1.14: Diagrama Límite de conformabilidad de deformación de tiras rectangulares y circulares.[32].*

### **Utilización de los Métodos numéricos y la Inteligencia Artificial para estudiar los estados tensionales y de deformación que se generan en los procesos de estirado de chapas.**

Las fuentes consultadas reconocen y demuestran que la simulación de los procesos de conformación de chapas metálicas reduce los tiempos de elaboración e incrementa la eficiencia de los costos, en comparación con los métodos tradicionales de prueba y error. Los resultados de la simulación y los del método de prueba y error son comparables también en cuanto a precisión de las herramientas, sin embargo, la mayor ventaja de la simulación es que permite probar, en poco tiempo, diferentes soluciones para el diseño de las herramientas y del proceso de conformado ayudando a una correcta toma de decisiones.

La modelación de los procesos es una de las más importantes herramientas de la ingeniería mecánica actual, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible para analizar sus características. Esta modelación es, en algunos casos, indispensable y de vital importancia, pues sin este procedimiento todo el proceso productivo se haría más complicado y lento.

La gran evolución de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido afrontar la resolución de complejos modelos físicos-matemáticos cuya solución analítica sería prácticamente imposible. En la actualidad se tienen varias técnicas que se usan

para dar solución a los problemas ingenieriles y en este caso en la rama de la conformación de chapas metálicas por estirado profundo.

El método de los elementos finitos (MEF) es una herramienta útil que se viene usando hace años, la cual permite realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, capaz de resolver cualquier problema de la física formulable como un sistema de ecuaciones.

En contraste con el método anterior, los investigadores a nivel mundial no han dejado de introducir técnicas novedosas, algunas de los cuales ya han arrojado resultados significativos en el campo de estudio referente a la conformación de materiales, específicamente en chapas metálicas; ejemplo de ellas son las que conforman el grupo de técnicas de inteligencia artificial. Este grupo de técnicas permiten optimizar los procesos de conformación de chapas metálicas, facilitándole bases de datos de resultados experimentales anteriores y fijando parámetros de eficiencia, cada una de las técnicas tiene características que las diferencian de las otras, por lo que se debe seleccionar cuidadosamente la técnica a utilizar respecto a los resultados que se desean obtener.

Por otra parte, los métodos y técnicas utilizados para la simulación y/o optimización de los procesos de conformado, permiten el estudio y análisis de los estados tensionales y de deformación que se generan en estos, brindando datos que ayudan a su interpretación y entendimiento físico-mecánico.

### **1.3.- Herramientas básicas para los procesos de estirado.**

Los procesos tecnológicos de conformación de metales tienen como característica importante el alto costo de las herramientas que intervienen en el mismo. Estas generalmente están sometidas a severas condiciones de trabajo, tales como el desgaste en sus zonas de trabajo, cargas de impacto y el tensionamiento de su estructura debido a las configuraciones complejas de estas herramientas y por tanto la no uniformidad en la distribución de las cargas a que se someten, entre otros aspectos. [33]

Las herramientas que se utilizan para la fabricación de piezas por los procesos de conformado de chapas metálicas se llaman troqueles; el autor para facilitar su explicación, las clasificará a partir de la descripción realizada por [5] en cuatro conjuntos:

- **1<sup>er</sup>** conjunto: Según las operaciones que realizan

Troqueles simples (realizan una sola operación.)

Troqueles progresivos (realizan más de una operación en forma no simultánea.)

Troqueles combinados (realizan más de una operación en forma simultánea.)

- **2<sup>do</sup>** conjunto: Según el número de piezas terminadas.

Sencillos (una pieza terminada por carrera.)

Múltiples (más de una pieza terminada por carrera.)

- **3<sup>er</sup>** conjunto: Según el tipo de guía.

Troquel de corte libre

Troquel con placa guía

Troquel con armazón de columnas.

- 4<sup>to</sup> conjunto: según la diversidad de piezas que elaboran.

Troqueles especializados (sirven para fabricar solo un tipo de pieza.)

Troqueles universales (pueden ser empleados para fabricar diversos tipos de piezas)

Dentro del troquel, los elementos que se utilizan para realizar el embutido son el punzón, la matriz y el prensa chapa.

Los primeros llevan redondeos, en el caso de los redondeos de la matriz, desempeñan un papel importante en el proceso de embutido, pues su influencia se hace sentir sobre:

- Las tensiones y la fuerza de embutir.
- El valor de la relación de embutido.
- El peligro de formación de arrugas y grietas.

Para valores pequeños del radio de redondeo de la matriz  $r_z$  se tendrá un doblado más pronunciado, el factor  $Cd = \frac{Fd}{Fid}$  crece y la relación de embutido se hace mayor; a un radio mayor se tiene una situación más favorable en ese sentido.

Para calcular  $r_z$  se tiene:

- Para aceros  $r_z = 0.8\sqrt{(d_0 - d_1)s_0}$
- Para aluminios  $r_z = 0.9\sqrt{(d_0 - d_1)s_0}$  **(1.55)**

El radio de redondeo del punzón  $r_p$  tiene gran importancia pues para valores pequeños de él, aumenta considerablemente la disminución de espesor de la chapa en la zona peligrosa. Para embutidos en varios pasos se recomienda escoger  $r_p$  siguiendo los siguientes pasos:

- Primer embutido:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{s}{d_0} \geq 0.6\% \Rightarrow r_p = r_z \\ \frac{s}{d_0} = 0.6 - 0.3\% \Rightarrow r_p = 1.5r_z \\ \frac{s}{d_0} \leq 0.3\% \Rightarrow r_p = 2r_z \end{array} \right.$$

- Embutidos intermedios: con radios de punzón igual a la mitad de la variación de diámetro en el paso correspondiente, o con cantos inclinados 45°.
- Embutido final: el radio del punzón igual al buscado en la pieza terminada.

En todos los casos se recomienda que el radio del punzón sea igual o mayor que el de la matriz.

Entre el punzón y la matriz existe una dimensión  $z = \frac{(d_z - d_p)}{2}$  llamada juego de embutido, que debe ser mayor que el espesor de la chapa. Un valor grande de  $Z$  favorece la formación de arrugas, uno pequeño provoca un estirado de la pieza con el aumento de la fuerza necesaria para embutir y del peligro de formación de grietas. La posición del juego de embutido se determina según se deseen obtener dimensiones exteriores o interiores exactas.

La lubricación desempeña un papel importante en el proceso de embutido pues la fricción, además de provocar desgaste en las herramientas, aumenta el valor de  $Cr = \frac{Fr}{Fid}$  y con ello el valor de  $m$ . Los lubricantes que se utilizan son: grasas animales, emulsiones con relación media (aceite-agua) o dispersión de sustancias sólidas como grafito, talco, tiza, etc., en dependencia del material de la pieza y del valor de la relación de embutido.

El prensa chapa ejerce una presión que es de gran importancia a la hora del embutido, de ser insuficiente esta, aparecerán arrugas y si llega a ser excesivo puede provocar estiramientos indeseados y eventualmente roturas.

### **Aplicación de los métodos numéricos al diseño de estas herramientas.**

La utilización de métodos numéricos y de inteligencia artificial al diseño de las herramientas de fabricación de piezas por estirado profundo de chapas metálicas es de gran importancia, pues se logran optimizar estas sin necesidad de utilizar métodos prácticos de prueba y ensayo, logrando disminuir los costos de fabricación y reduciendo considerablemente los tiempos de producción, características estas que encarecen considerablemente los procesos productivos. Los científicos han desarrollado las técnicas de simulación y optimización no solo para interpretar fenómenos físico-matemáticos y mecánicos sino que también los han utilizado para perfeccionar las herramientas de manufactura.

#### **1.4.- Conclusiones Parciales**

1. En la actualidad se realiza la relación existente entre las invariantes de los tensores de la tensión y la deformación de la fluencia plástica del material para la interpretación de estados complejos de cargas, la fluencia del material, las tensiones que se generan en el proceso y las deformaciones asociadas a estas.
2. Para los estudios del comportamiento de tensiones y deformaciones en los materiales existen propiedades físico – mecánicas y tecnológicas que se destacan por su posterior empleo en la práctica, entre estas: el índice de anisotropía normal (R), el coeficiente de endurecimiento por deformación y la relación máxima de embutición.
3. En la literatura técnica que describe la teoría matemática del flujo asociada a los principios de la plasticidad se reconoce el criterio propuesto por Hill en 1948 por ser el más asociado a la descripción de los materiales de comportamiento ortotrópico, tales como chapas metálicas.
4. Internacionalmente la interpretación del comportamiento de los procesos de estirado de chapas y la optimización de diversos parámetros de estos ha suscitado el interés de investigadores físicos, matemáticos y metalurgistas para estudiar las deformaciones plásticas a escala atómica, así como la correlación entre las propiedades policristalinas y el cristal simple. Por otro lado los ingenieros y diseñadores desean predecir el rango límite de las deformaciones en relación con la resistencia del material.
5. Existe un interés creciente en el ámbito Nacional y foráneo de desarrollar y emplear técnicas y procedimientos computacionales que permitan optimizar e interpretar los procesos de estirado profundo y el comportamiento de tensiones y deformaciones asociados a estos.
6. Cuba, como país en vía de desarrollo debe invertir esfuerzos en el estudio de las características mecánicas y tecnológicas del material, así como en el comportamiento de las tensiones y deformaciones en los procesos de estirado profundo de chapas utilizando técnicas computacionales como las redes neuronales y los algoritmos genéticos para su optimización por las perspectivas de desarrollo que estas representan.

# Capítulo 2

Facultad de Ingeniería Mecánica

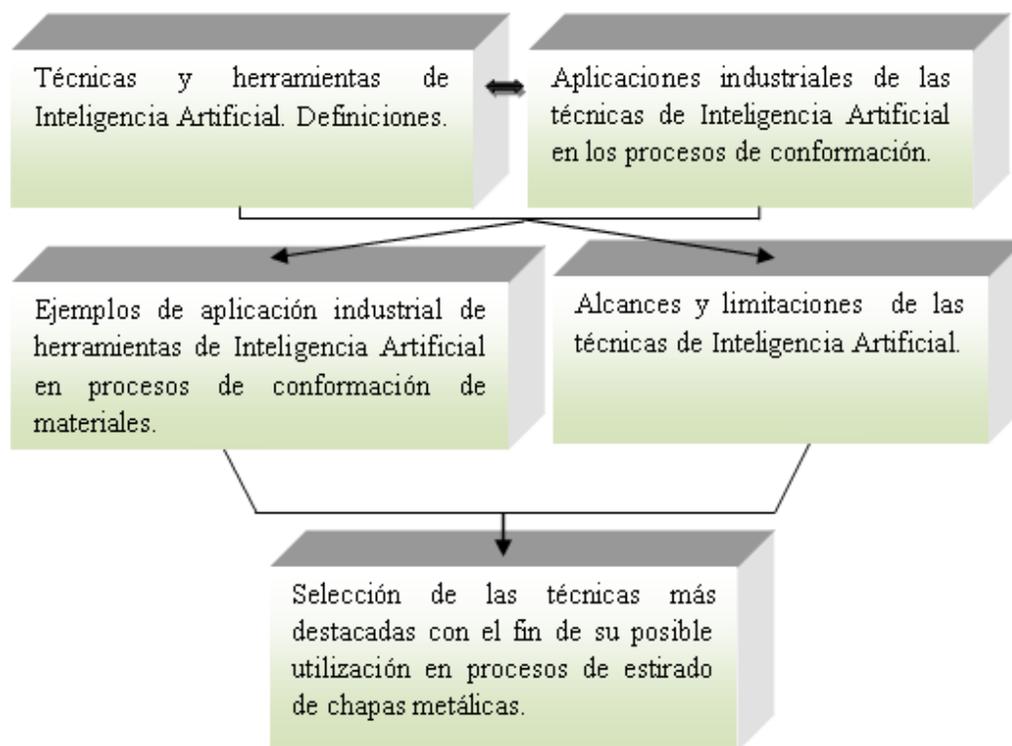


## 2.- Técnicas de Inteligencia Artificial y su vinculación a los procesos de conformación de chapas.

### 2.1.- Técnicas y herramientas de Inteligencia Artificial.

Para darle solución a los objetivos fijados con anterioridad, en este capítulo el autor pretende caracterizar las principales técnicas que conforman la Inteligencia Artificial (IA) así como la selección y descripción de las más viables para su aplicación en el campo de los procesos de conformación de metales, específicamente en los procesos de estirado profundo de chapas metálicas.

La **figura 2.1** muestra el esquema de análisis general previsto para el desarrollo del Capítulo.



**Figura 2.1:** Esquema de la estructuración principal del Capítulo II.

Según la literatura digital especializada, la Inteligencia Artificial (IA) en su sentido más amplio, indicaría la capacidad de un artefacto de realizar los mismos tipos de funciones que caracterizan al pensamiento humano. El término fue definido en 1956 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Estableciéndose las bases de la Inteligencia Artificial como un campo independiente dentro de la informática.

El término Inteligencia Artificial se ha aplicado a sistemas y programas informáticos capaces de realizar tareas complejas, simulando el funcionamiento del pensamiento humano, aunque todavía muy lejos de éste. En esta esfera los campos de investigación más importantes son el

procesamiento de la información, el reconocimiento de modelos, los juegos y las áreas aplicadas. Las técnicas computacionales, desde sus inicios, marcaron un paradigma en la creación. Sus aplicaciones, hoy día, van desde la industria de los juegos hasta las cadenas de producción de varias empresas. Para ello se han desarrollado múltiples técnicas como las relacionadas con la Inteligencia Artificial. [34]

Se han desarrollado múltiples técnicas en la rama de la Inteligencia Artificial (IA) por la necesidad de darle salida a diversos problemas de la vida diaria, de los cuales no pocos tienen soluciones sencillas, posteriormente se exponen los más renombrados y utilizados en múltiples esferas.

- Redes neuronales artificiales (Artificial Neural Networks)
- Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms)
- Colonia de hormigas
- Computación evolutiva (Evolutionary Computation)
- Lógica difusa (Fuzzy Logic)
- Recocido simulado (simulated annealing)
- Razonamiento basado en casos (Case-Based Reasoning)
- Sistemas expertos (Expert Systems)
- Visión artificial
- Aprendizaje Automático (Machine Learning)
- Ingeniería del conocimiento (Knowledge Engineering)
- Sistemas basados en reglas (Rule-Based Systems)

### **2.1.1.- Estrategias evolutivas**

Estas no son las únicas técnicas existentes, pero son las más destacadas en la revisión bibliográfica ejecutada, por las cuales se han obtenido resultados positivos. A continuación el autor explicará el funcionamiento de algunos de estos sistemas para ayudar al entendimiento de ellos.

#### **Redes neuronales (RNA). Definición**

Una red neuronal es un método de resolución de problemas basado en un modelo informático de la manera en que están conectadas las neuronas del cerebro. Una red neuronal consiste en capas de unidades procesadoras, llamadas nodos, unidas por conexiones direccionales: una capa de entrada, una capa de salida y cero o más capas ocultas en medio. [35]

### Funcionamiento de las redes neuronales.

A la capa de entrada se le presenta un patrón inicial, donde los nodos que se estimulen transmiten una señal a la siguiente capa. Si la suma de todas las entradas que entran en una de estas neuronas virtuales es mayor que el famoso umbral de activación de la neurona, esa neurona se activa, y transmite su propia señal a las neuronas de la siguiente capa. (Figura 2.2)

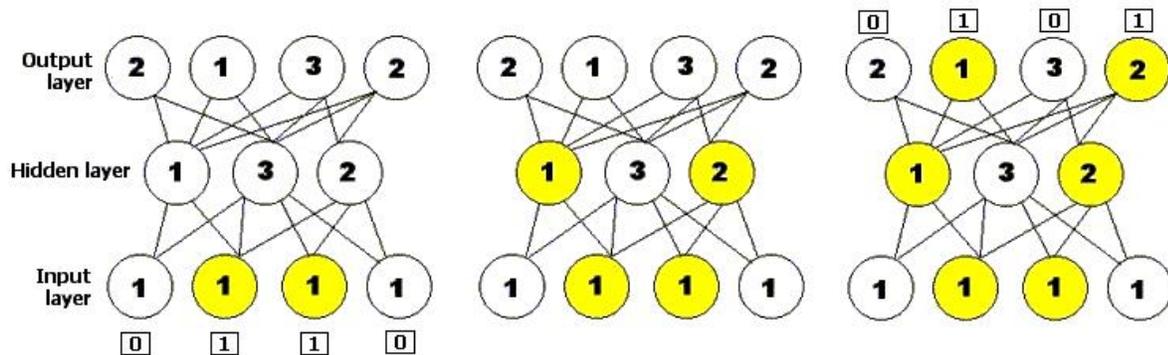


Figura 2.2: Se muestra una red neuronal anticipativa, con una capa consistente en cuatro neuronas, una capa oculta consistente en tres neuronas y una capa de salida de cuatro neuronas. El número de cada neurona representa su umbral de activación: solo se excitará si recibe al menos esa cantidad de entradas. El diagrama muestra como la red neuronal recibe una cadena de entrada y como la activación se extiende por la red hasta producir una salida.[35].

El patrón de activación, por tanto, se propaga hacia delante hasta que alcanza a la capa de salida, donde es devuelto como solución a la entrada presentada. Al igual que en el sistema nervioso de los organismos biológicos, las redes neuronales aprenden y afinan su rendimiento a lo largo del tiempo, mediante la repetición de rondas en las que se ajustan sus umbrales, hasta que la salida real coincide con la salida deseada para cualquier entrada dada. Este proceso puede ser supervisado por un experimentador humano, o puede correr automáticamente utilizando un algoritmo de aprendizaje. Se han utilizado Algoritmos Genéticos (AG) para construir y entrenar a redes neuronales.

Lo aplicar relaciones entre objetos y tramas de cosas propias del mundo real. En este sentido, se utilizan las Redes Neuronales importante en el desarrollo de la técnica de las Redes Neuronales (RNA) es su útil comportamiento al aprender, reconocer y (RNA) como una herramienta que podrá utilizarse para resolver problemas difíciles. [34]

### Principios de las redes neuronales.

En la actualidad se considera que el aprendizaje humano se logra mediante cambios en la intensidad de las conexiones de señal entre neuronas. Una red de alimentación positiva, totalmente desarrollada, es el tipo más común de red neuronal artificial, y se construye siguiendo ese principio, a través de varias capas de elementos de procesamiento que simulan las neuronas. [36]

Los elementos en la primera capa (entrada) se alimentan con datos, por ejemplo de fuerzas, velocidades y tensiones. Cada elemento suma todas sus entradas: una por elemento en la capa de entrada, muchas por elemento en las capas siguientes. Cada elemento en una capa transfiere entonces los datos de acuerdo con una función de transferencia a todos los elementos de la siguiente capa. Cada elemento de esa capa recibe, sin embargo, una señal distinta, a causa de los distintos factores de ponderación o pesos de conexión entre los elementos. La última capa es la de salida, dentro de la cual cada elemento se compara con la salida deseada. La diferencia entre la salida deseada y la calculada (el error) se realimenta a la red, cambiando los pesos de las conexiones en una forma tal que se reduce el error.

Después de haber repetido varias veces ese procedimiento, la red se ha adiestrado y ya se puede usar con datos de entrada que no se habían presentado antes a este sistema. La propiedad común de esas redes neuronales es que se deben adiestrar con ejemplos concretos. En consecuencia, es muy difícil formular en forma matemática relaciones entre entrada y salida y predecir el comportamiento de una red neuronal artificial cuando las entradas no se han adiestrado.

Hornik et al. (1989) mostró que una red neuronal compuesta por una capa de entrada, una capa oculta, y una capa de salida, era suficiente para modelar cualquier función continua con precisión con tal de que se usaran un número suficiente de neuronas ocultas. En una red totalmente conectada, cada neurona recibe las entradas de todos de los elementos en la capa precedente y no existe ninguna conexión entre las neuronas de una misma capa.

La entrada total a la neurona de la capa oculta se representa con  $U_j$ , y  $U_j$ , es la suma del peso multiplicada por el valor de la entrada, el  $x_i$ , se utiliza para cada camino de conexión.

$$U_j = W_{j0} + \sum_{i=1}^N W_{ji} * x_i \quad (2.1)$$

Donde  $N$  es el número de entradas, y  $W_{j0}$  es el prejuicio de la neurona que simplemente es otro peso en la red. El prejuicio le permite un grado extra de libertad a la neurona para aprender a ajustarse a la relación de la entrada-salida con precisión durante el entrenamiento.

La salida de la neurona de la capa oculta,  $V_j$ , esta dado por:

$$V_j = f(U_j) \quad (2.2)$$

Donde  $f$  es la función de activación.

[37] también mostró para las neuronas ocultas que en la función de activación de sigmoidal, o cualquier otro continuo es necesario modelar la función de la salida continua. Sin embargo, la función de activación lineal con una cuenta de uno es suficiente para las neuronas del rendimiento. Con estas dos funciones de activación, la salida dada, es  $y_K$ , basada en las entradas,  $x_i$  y los pesos de conexión, está dada por:

$$y_k = \sum_{j=1}^J \left\{ W_{ko} + W_{kj} f \left( W_{jo} + \sum_{i=1}^N W_{ji} x_i \right) \right\} \quad (2.3)$$

Donde  $J$  es el número total de neuronas ocultas.

Como se declaró anteriormente, deben entrenarse las redes neuronales primero para que puedan extraer la relación correcta de un número finito de pares de la entrada-salida correspondientes. Durante el entrenamiento, los números pares de entradas-salidas,  $Q$  se dan a la red y los pesos de los caminos de conexión se ajustan. La meta es conseguir las salidas,  $y_k$ , que son calculadas usando los pesos de la red neuronal como cierre a la posible salida deseada;  $d_k$ , es utilizada para los ejemplos de entrenamiento. Una medida de qué bien la red neuronal logra la meta es el Error Cuadrado Medio del proceso, dado por:

$$MSE = \frac{1}{Q * K} * \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K [d_k(q) - y_k(q)]^2 \quad (2.4)$$

Donde  $K$  es el número total de salidas.

**A continuación se exponen varias de las características de las redes neuronales:**

- Aprendizaje adaptativo: pueden comportarse en función de un entrenamiento con una serie de ejemplos ilustrativos, así no es necesario elaborar un modelo a priori, ni establecer funciones probabilísticas. Una red neuronal artificial es adaptativa porque puede modificarse constantemente con el fin de adaptarse a nuevas condiciones de trabajo.
- Auto organización: consiste en la modificación de la red completa a fin de llevar a cabo un objetivo específico. De esta forma una red puede responder a datos o situaciones que no ha experimentado antes, pero que puede inferir sobre la base de su entrenamiento. Esta característica es muy útil sobre todo cuando la información de entrada es poco clara o se encuentra incompleta.
- Tolerancia a fallos: poseen una alta capacidad de tolerancia a fallos. Las redes pueden reconocer patrones de información con ruido, distorsión o incompletos, pero que, además, pueden seguir trabajando aunque se destruya parte de la red (con cierta degradación).
- Operación en tiempo real: son las más indicadas para el reconocimiento de patrones en tiempo real, debido a que trabajan en paralelo actualizando todas sus instancias simultáneamente. Es importante destacar que esta característica solo se aprecia cuando se implementan redes con hardware especialmente diseñados para el procesamiento paralelo.
- Fácil inserción en la tecnología existente: Es relativamente sencillo obtener chips especializados para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas. Ello facilita la integración modular en los sistemas existentes.

### **Algoritmos Genéticos. Definición.**

Los Algoritmos Genéticos son algoritmos matemáticos de optimización de propósito general, basados en mecanismos naturales de selección y genética, proporcionando excelentes soluciones en problemas complejos con gran número de parámetros. [38]

Un Algoritmo Genético (AG) es una técnica de programación con el objetivo de buscar dentro de un espacio de hipótesis candidatas la mejor de ellas, que imita a la evolución biológica como estrategia para resolver problemas. [39]

### **Funcionamiento de los Algoritmos Genéticos.**

Dado un problema específico a resolver, la entrada del Algoritmos Genéticos (AG) es un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, codificadas de alguna manera, y una métrica llamada función de aptitud que permite evaluar cuantitativamente a cada candidata. Estas candidatas pueden ser soluciones que ya se sabe que funcionan, con el objetivo de que el Algoritmos Genéticos (AG) las mejore, pero se suelen generar aleatoriamente. [35]

El Algoritmos Genéticos (AG) evaluará a cada candidata según su función de aptitud. En un conjunto de candidatas generadas aleatoriamente, la mayoría no funcionarán en absoluto, y serán eliminadas. Sin embargo, por puro azar, unas pocas pueden ser promisorias hacia la solución del problema.

Las candidatas prometedoras se reproducirán, haciéndose múltiples copias de ellas, pero las copias no son perfectas; se introducen cambios aleatorios durante el proceso de copia. Luego, esta descendencia digital prosigue con la siguiente generación, formando un nuevo acervo de soluciones candidatas, y son sometidas a una ronda de evaluación de aptitud. Las candidatas que han empeorado o no han mejorado con los cambios en su código son eliminadas de nuevo; pero, de nuevo, por puro azar, las variaciones aleatorias introducidas en la población pueden haber mejorado a algunos individuos, convirtiéndolos en mejores soluciones del problema, más completas o más eficientes. De nuevo, se seleccionan y copian estos individuos vencedores hacia la siguiente generación con cambios aleatorios, y el proceso se repite. Las expectativas son que la aptitud media de la población se incrementará en cada ronda y, por tanto, repitiendo este proceso cientos o miles de rondas, pueden descubrirse soluciones muy buenas del problema.

### **Métodos de selección.**

Un Algoritmo Genético puede utilizar muchas técnicas diferentes para seleccionar a los individuos que deben copiarse hacia la siguiente generación, pero abajo se listan algunos de los más comunes. Algunos de estos métodos son exclusivos, pero otros pueden utilizarse en combinación, algo que se hace a menudo.

- Selección elitista: garantiza la selección de los miembros más aptos de cada generación.
- Selección proporcional a la aptitud: los individuos más aptos tienen más probabilidad de ser seleccionados, pero no la certeza.

- Selección por rueda de ruleta: la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es proporcional a la diferencia entre su aptitud y la de sus competidores. (Conceptualmente, esto puede representarse como un juego de ruleta: cada individuo obtiene una sección de la ruleta, pero los más aptos obtienen secciones mayores que las de los menos aptos. Luego la ruleta se hace girar, y en cada vez se elige al individuo que "posea" la sección en la que se pare la ruleta).
- Selección escalada: al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de la presión selectiva también aumenta y la función de aptitud se hace más discriminadora. Este método puede ser útil para seleccionar más tarde, cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distinguen pequeñas diferencias en la aptitud.
- Selección por torneo: se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos. Sólo se elige a un individuo de cada subgrupo para la reproducción.
- Selección por rango: a cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud, y la selección se basa en este ranking, en lugar de las diferencias absolutas en aptitud.
- Selección generacional: la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación se convierte en toda la siguiente generación.
- Selección por estado estacionario: la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación vuelven al acervo genético preexistente, reemplazando a algunos de los miembros menos aptos de la siguiente generación.
- Selección jerárquica: los individuos atraviesan múltiples rondas de selección en cada generación. Las evaluaciones de los primeros niveles son más rápidas y menos discriminatorias, mientras que los que sobreviven hasta niveles más altos son evaluados más rigurosamente.

### **Métodos de cambio.**

Existen tres métodos de cambio: selección, cruce, mutación, los cuales serán explicados por el autor a continuación:

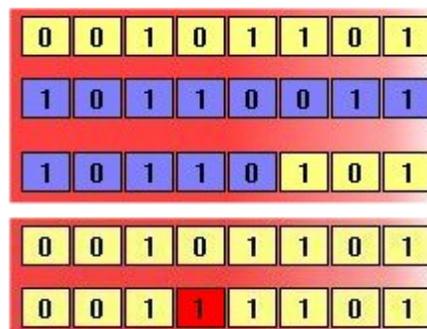
- Selección: es el mecanismo por el cual las soluciones más próximas al óptimo (individuos mejor adaptados) tienen mayor probabilidad de sobrevivir y ser elegidos (seleccionados) para reproducirse.

Una vez que la selección ha elegido a los individuos aptos, éstos deben ser alterados aleatoriamente con la esperanza de mejorar su aptitud para la siguiente generación. Existen dos estrategias básicas para llevar esto a cabo. La primera y más sencilla se llama mutación.

- Mutación: Al igual que una mutación en los seres vivos cambia un gen por otro, una mutación en un Algoritmo Genético también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos del código de un individuo.

- Cruzamiento: El segundo método se llama cruzamiento, e implica elegir a dos individuos para que intercambien segmentos de su código, produciendo una "descendencia" artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres. Este proceso pretende simular el proceso análogo de la recombinación que se da en los cromosomas durante la reproducción sexual. Las formas comunes de cruzamiento incluyen al cruzamiento de un punto, en el que se establece un punto de intercambio en un lugar aleatorio del genoma de los dos individuos, y uno de los individuos contribuye todo su código anterior a ese punto y el otro individuo contribuye todo su código a partir de ese punto para producir una descendencia, y al cruzamiento uniforme, en el que el valor de una posición dada en el genoma de la descendencia corresponde al valor en esa posición del genoma de uno de los padres o al valor en esa posición del genoma del otro padre, elegido con un 50% de probabilidad.

En la **figura 2.3** se observan dos ejemplos que caracterizan el comportamiento de los métodos de cambio por mutación y cruzamiento en los Algoritmos Genéticos.



**Figura 2.3: Ejemplo de los Métodos de Cruzamiento y Mutación. [35]**

El diagrama anterior ilustra el efecto de estos dos operadores genéticos en los individuos de una población de cadenas de 8 bits. El diagrama superior muestra a dos individuos llevando a cabo un cruzamiento de un punto; el punto de intercambio se establece entre las posiciones quinta y sexta del genoma, produciendo un nuevo individuo que es híbrido de sus progenitores. El segundo diagrama muestra a un individuo sufriendo una mutación en la posición 4, cambiando el 0 de esa posición de su genoma por un 1.

### **Descripción Algorítmica.**

A continuación se describe un algoritmo genético básico, evidenciándose las similitudes de este con el proceso natural de la evolución. En primer lugar, debe definirse el problema. Para que el Algoritmos Genéticos (AG) funcione, será necesario dar una función que permita medir cómo de acertada es una solución respecto a otra. En otros términos, el problema debe poder definirse como un problema de minimización (o maximización) de una función objetivo, que representa la presión selectiva del medio.

En segundo lugar, deberá especificarse el carácter de codificar las soluciones, donde lo más usual es seleccionar una representación en forma de cadena de bits. La interpretación que se dé a esa

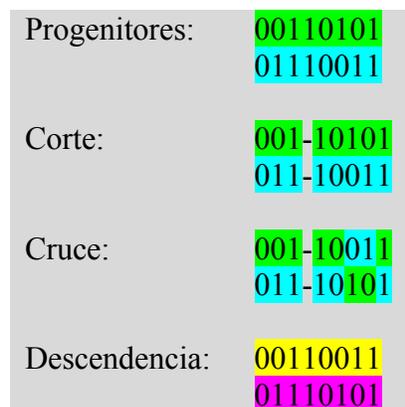
cadena dependerá de la naturaleza de la solución (codificación de un valor entero, de un real, de varios valores).

Una vez se conoce el problema y la manera de representar sus soluciones, se procede a implementar el Algoritmo Genético. Para facilitar la comprensión de la explicación que sigue, se expondrá mediante un pseudocódigo, el cual se mostrará en la **figura 2.4**.

1. Inicializar la población
2. Selección
  - 2.1 Aplicar función objetivo
  - 2.2 Ordenar según el valor obtenido
  - 2.3 Seleccionar individuos para el cruce
3. Cruce
4. Mutación
5. Inserción
6. Si ningún individuo cumple el criterio de parada, se vuelve al paso 2

**Figura 2.4: Pseudocódigo que representa los pasos a seguir en la utilización de un Algoritmo Genético.[40].**

El primer paso (1) es proceder a la inicialización de la población. Para cada individuo de la población se selecciona un valor completamente aleatorio. Después se aplica a cada individuo la función objetivo (2.1), lo que da una medida de lo adaptado que está cada uno de ellos. En función del valor obtenido se ordena la población (2.2), quedando así en primer lugar los individuos más adaptados. Se seleccionan entonces los individuos que se van a cruzar (2.3). Suponiendo que se han seleccionado dos, se procede a cruzarlos (3): donde se escoge un punto de corte, y la tira de bits que representa a cada progenitor se divide en dos por ese punto. A continuación se generan dos individuos nuevos uniendo las subcadenas generadas como se muestra en la **figura 2.5**:



**Figura 2.5: Creación de dos nuevos individuos a partir del corte y cruce entre sus predecesores.[40].**

En el paso 4, (**Figura 2.6**) se genera en la descendencia una mutación en un gen (bit) aleatorio. Esto sucede con un por ciento de probabilidades bajas (en la mayoría de los casos, este paso (4) no tiene efecto).



**Figura 2.6: Método de cambio a partir de una mutación en el segundo bits de la cadena.[40].**

Una vez se que ya se ha generado la descendencia, esta deberá insertarse en la población (5). Una de las políticas que existe para la inserción de individuos en la población, consiste simplemente en eliminar los dos individuos con peor adaptación e insertar los recién generados.

Por último, en el paso 6 se comprueba si alguno de los individuos disponibles satisface los criterios establecidos y se puede considerar como solución al problema. En este paso también se puede comprobar si se ha excedido un número de iteraciones o un límite de tiempo. Si no es así y ningún individuo cumple los criterios de parada, se vuelve al paso 2.

### **Ventajas de los Algoritmos Genéticos.**

- La ventaja más importante de los Algoritmos Genéticos es que son intrínsecamente paralelos. La mayoría de los otros algoritmos son en serie y sólo pueden explorar el espacio de soluciones hacia una solución en una dirección al mismo tiempo, y si la solución que descubren resulta subóptimas, no se puede hacer otra cosa que abandonar todo el trabajo hecho y empezar de nuevo. Sin embargo, ya que los Algoritmos Genéticos (AG) tienen descendencia múltiple, pueden explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones a la vez. Si un camino resulta ser un callejón sin salida, pueden eliminarlo fácilmente y continuar el trabajo en avenidas más prometedoras, dándoles una mayor probabilidad en cada ejecución de encontrar la solución.
- El Algoritmos Genéticos (AG) puede dirigirse hacia el espacio con los individuos más aptos y encontrar el mejor de ese grupo. En el contexto de los algoritmos evolutivos, esto se conoce como teorema del esquema, y es la ventaja principal de los AG sobre otros métodos de resolución de problemas. [41]
- Debido al paralelismo que les permite evaluar implícitamente muchos esquemas a la vez, los Algoritmos Genéticos funcionan particularmente bien resolviendo problemas cuyo espacio de soluciones potenciales es realmente grande. El paralelismo implícito de los AG les permite encontrar con éxito resultados óptimos o muy buenos en un corto periodo de tiempo, tras muestrear directamente sólo regiones pequeñas del vasto paisaje adaptativo. [42]
- Otra ventaja notable de los Algoritmos Genéticos (AG) es que se desenvuelven bien en problemas con un paisaje adaptativo complejo: aquellos en los que la función de aptitud es discontinua, ruidosa, cambia con el tiempo, o tiene muchos óptimos locales. La mayoría de los problemas prácticos tienen un espacio de soluciones enorme, imposible de explorar exhaustivamente; el reto se convierte entonces en cómo evitar los óptimos locales -soluciones que son mejores que todas las que son similares a ella, pero que no

son mejores que otras soluciones distintas situadas en algún otro lugar del espacio de soluciones. Muchos algoritmos de búsqueda pueden quedar atrapados en los óptimos locales: si llegan a lo alto de una colina del paisaje adaptativo, descubrirán que no existen soluciones mejores en las cercanías y concluirán que han alcanzado la mejor de todas, aunque existan picos más altos en algún otro lugar del mapa.

- Los Algoritmos Genéticos (AG) tienen gran habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente. Muchos problemas de la vida real no pueden definirse en términos de un único valor que hay que minimizar o maximizar, sino que deben expresarse en términos de múltiples objetivos, a menudo involucrando contrapartidas: uno sólo puede mejorar a expensas de otro. Los AG son muy buenos resolviendo estos problemas: en particular, su uso del paralelismo les permite producir múltiples soluciones, igualmente buenas, al mismo problema, donde posiblemente una solución candidata optimiza un parámetro y otra candidata optimiza uno distinto y luego un supervisor humano puede seleccionar una de esas candidatas para su utilización. [43]
- Finalmente, una de las cualidades de los Algoritmos Genéticos que a primera vista puede parecer un desastre, resulta ser una de sus ventajas: los Algoritmos Genéticos (AG) no saben nada de los problemas que deben resolver. En lugar de utilizar información específica conocida a priori para guiar cada paso y realizar cambios con un ojo puesto en el mejoramiento, como hacen los diseñadores humanos, realizan cambios aleatorios en sus soluciones candidatas y luego utilizan la función de aptitud para determinar si esos cambios producen una mejora. La virtud de esta técnica es que permite a los Algoritmos Genéticos comenzar con una mente abierta, por así decirlo. Como sus decisiones están basadas en la aleatoriedad, todos los caminos de búsqueda posibles están abiertos teóricamente a un Algoritmos Genéticos (AG).

### **Limitaciones de los Algoritmos Genéticos.**

Aunque los algoritmos genéticos han demostrado gran eficiencia y potencia como estrategia de resolución de problemas tienen ciertas limitaciones; sin embargo, se demostrará que todas ellas pueden superarse y que ninguna de ellas afecta a la validez de la evolución biológica.

- La más importante consideración al crear un Algoritmo Genético es definir una representación del problema. El lenguaje utilizado para especificar soluciones candidatas debe ser capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores o resultados sin sentido.

Existen dos maneras para conseguir esto. La primera, utilizada por la mayoría de los algoritmos genéticos, es definir a los individuos como listas de números -binarios, enteros o reales- donde cada número representa algún aspecto de la solución candidata.

El otro método, la programación genética, el propio código del programa sí cambia la Programación Genética representa a los individuos como árboles de código ejecutables que pueden mutar cambiando o intercambiando subárboles. Ambos métodos producen representaciones robustas ante la mutación, y pueden representar muchos tipos diferentes de problemas.

- La manera de escribir la función de aptitud debe considerarse cuidadosamente para poder alcanzar una mayor aptitud y verdaderamente signifique una solución mejor para el problema dado. Si se elige mal una función de aptitud o se define de manera inexacta, puede que el Algoritmo Genético sea incapaz de encontrar una solución al problema, o puede acabar resolviendo el problema equivocado. (Esta última situación se describe a veces como la tendencia del Algoritmo Genético (AG) a "engañar", aunque en realidad lo que está pasando es que el Algoritmo Genético (AG) está haciendo lo que se le pidió hacer, no lo que sus creadores pretendían que hiciera).
- Se deben elegir cuidadosamente otros parámetros del Algoritmo Genético (AG): el tamaño de la población, el ritmo de mutación y cruzamiento, el tipo y fuerza de la selección. Si el tamaño de la población es demasiado pequeño, puede que el Algoritmo Genético no explore suficientemente el espacio de soluciones para encontrar buenas soluciones consistentemente. Si el ritmo de cambio genético es demasiado alto o el sistema de selección se escoge inadecuadamente, puede alterarse el desarrollo de esquemas beneficiosos y la población puede entrar en catástrofe de errores, al cambiar demasiado rápido para que la selección llegue a producir convergencia.
- Un problema que puede surgir con un Algoritmo Genético (AG) se conoce como convergencia prematura. Si un individuo que es más apto que la mayoría de sus competidores emerge muy pronto en el curso de la ejecución, se puede reproducir tan abundantemente que merme la diversidad de la población demasiado pronto, provocando que el algoritmo converja hacia el óptimo local que representa ese individuo, en lugar de rastrear el paisaje adaptativo lo bastante a fondo para encontrar el óptimo global. Esto es un problema especialmente común en las poblaciones pequeñas, donde incluso una variación aleatoria en el ritmo de reproducción puede provocar que un genotipo se haga dominante sobre los otros.

Los métodos más comunes implementados por los investigadores en Algoritmo Genético (AG) para solucionar este problema implican controlar la fuerza selectiva, para no proporcionar tanta ventaja a los individuos excesivamente aptos. La selección escalada, por rango y por torneo, discutidas anteriormente, son tres de los métodos principales para conseguir esto; algunos métodos de selección escalada son el escalado sigma, en el que la reproducción se basa en una comparación estadística de la aptitud media de la población, y la selección de Boltzmann, en la que la fuerza selectiva aumenta durante la ejecución.

- Varios autores, [41], [42] aconsejan no utilizar Algoritmos Genéticos en problemas resolubles de manera analítica. El fundamento no es que los Algoritmos Genéticos (AG) no puedan encontrar soluciones buenas para estos problemas; simplemente es que los métodos analíticos tradicionales consumen mucho menos tiempo y potencia computacional que los Algoritmos Genéticos (AG) y, a diferencia de los Algoritmos Genéticos, a menudo está demostrado matemáticamente que ofrecen la única solución exacta. Por supuesto, como no existe una solución matemática perfecta para ningún problema de adaptación biológica, este problema no aparece en la naturaleza.

### **Sistemas Expertos. Definición.**

Los sistemas expertos tradicionales intentan reproducir el razonamiento humano de forma simbólica. Es un tipo de programa de aplicación informática que adopta decisiones o resuelve problemas de un determinado campo, como los sistemas de producción, las finanzas o la medicina, utilizando los conocimientos y las reglas analíticas definidas por los expertos en dicho campo.

Los expertos solucionan los problemas utilizando una combinación de conocimientos basados en hechos y en su capacidad de razonamiento. En los sistemas expertos, estos dos elementos básicos están contenidos en dos componentes separados, aunque relacionados: una base de conocimientos y una máquina de deducción, o de inferencia. La base de conocimientos proporciona hechos objetivos y reglas sobre el tema, mientras que la máquina de deducción proporciona la capacidad de razonamiento que permite al sistema experto extraer conclusiones. [44]

Los sistemas expertos facilitan también herramientas adicionales en forma de interfaces de usuario y los mecanismos de explicación. Las interfaces de usuario, al igual que en cualquier otra aplicación, permiten al usuario formular consultas, proporcionar información e interactuar de otras formas con el sistema. A experiencia de uno de los autores, el hardware en que se fundamentan estos sistemas, que son circuitos integrados digitales, son muy eficaces y de durabilidad de por vida si se les da correcto uso.

### **Lógica Difusa. Definición.**

Es una herramienta que permite emular el razonamiento humano. Los seres humanos pensamos y razonamos por medio de palabras y en grados entre dos estados por ejemplo blanco y negro ó frío y caliente, etc. Estos sistemas de lógica difusa son una mejora a los sistemas experto tradicionales, en el sentido de que permiten utilizar lenguaje humano como nosotros razonamos. [44]

### **Recocido Simulado. Definición.**

La idea toma prestado su nombre del proceso industrial en el que un material se calienta por encima de su punto de fusión y luego se enfría gradualmente para eliminar defectos en su estructura cristalina, produciendo un entramado de átomos más estable y regular.

En el recocido simulado, como en los Algoritmos Genéticos, existe una función de aptitud que define un paisaje adaptativo; sin embargo, en lugar de una población de candidatas como en los Algoritmos Genéticos (AG), sólo existe una solución candidata. El recocido simulado también añade el concepto de "temperatura", una cantidad numérica global que disminuye gradualmente en el tiempo. En cada paso del algoritmo, la solución muta (lo que es equivalente a moverse hacia un punto adyacente en el paisaje adaptativo).

Luego, la aptitud de la nueva solución se compara con la aptitud de la solución anterior; si es mayor, se conserva la nueva solución. En caso contrario, el algoritmo toma la decisión de

conservarla o descartarla en base a la temperatura. Si la temperatura es alta, como lo es al principio, puede conservarse incluso cambios que causan decrementos significativos en la aptitud, y utilizarse como base para la siguiente ronda del algoritmo. Pero al disminuir la temperatura, el algoritmo se hace más y más propenso a aceptar sólo los cambios que aumentan la aptitud. Finalmente, la temperatura alcanza el cero y el sistema se "congela"; cualquiera que sea la configuración que exista en ese punto se convierte en la solución. El recocido simulado tiene a menudo aplicaciones en la ingeniería del diseño, como determinar la disposición física de los componentes en un chip informático. [35]

### **Colonia de hormigas. Definición.**

Otro sistema, relativamente reciente en comparación con los demás descritos es el sistema de Optimización de colonia de hormigas (ant colony optimization o ACO) el cual está inspirado en el rastro y seguimiento de feromonas realizado por las hormigas como medio de comunicación. Los caminos de feromonas sirven como información distribuida que las hormigas usan en forma probabilística para construir soluciones a un problema y que las hormigas adaptan para reflejar su experiencia. [45]

Resulta realmente interesante analizar como las hormigas buscan su alimento y logran establecer el camino más corto para luego regresar a su nido. Para esto, al moverse una hormiga, deposita una sustancia química denominada feromona como una señal odorífera para que las demás puedan seguirla. Las feromonas son un sistema indirecto de comunicación química entre animales de una misma especie, que transmiten información acerca del estado fisiológico, reproductivo y social, así como la edad, el sexo y el parentesco del animal emisor, las cuales son recibidas en el sistema olfativo del animal receptor, quien interpreta esas señales, jugando un papel importante en la organización y la supervivencia de muchas especies. [46]

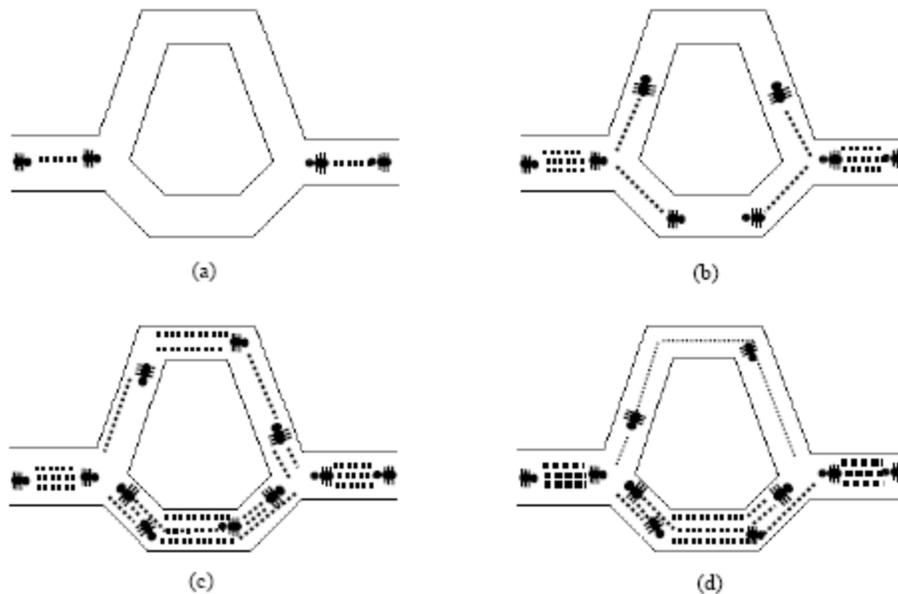
Al iniciar la búsqueda de alimento, una hormiga aislada se mueve a ciegas, es decir, sin ninguna señal que pueda guiarla, pero las que le siguen deciden con buena probabilidad seguir el camino con mayor cantidad de feromonas. Considere la **Figura 2.7** en donde se observa como las hormigas establecen el camino más corto.

En la figura (a) las hormigas llegan a un punto donde tienen que decidir por uno de los caminos que se les presenta, lo que resuelven de manera aleatoria. En consecuencia, la mitad de las hormigas se dirigirán hacia un extremo y la otra mitad hacia el otro extremo, como ilustra la figura (b).

Como las hormigas se mueven aproximadamente a una velocidad constante, las que eligieron el camino más corto alcanzarán el otro extremo más rápido que las que tomaron el camino más largo, quedando depositado mayor cantidad de feromona por unidad de longitud, como ilustra la figura (c).

La mayor densidad de feromonas depositadas en el trayecto más corto hace que éste sea más deseable para las siguientes hormigas y por lo tanto la mayoría elige transitar por él (d). Considerando que la evaporación de la sustancia química hace que los caminos menos transitados sean cada vez menos deseables y la realimentación positiva en el camino con más

feromonas, resulta claro que al cabo de un tiempo casi todas las hormigas transiten por el camino más corto.



**Figura 2.7: Comportamiento de las hormigas reales. [46].**

Optimización de colonia de hormigas (ACO) es una estrategia de construcción, donde la solución se forma probabilísticamente al ir añadiendo componentes de soluciones parciales considerando:

1. Heurísticas para resolver el problema particular
2. Trazas de feromona.

Para la representación de un problema se requiere definir:

1. Un conjunto de componentes
2. Estados definidos en términos de secuencias de componentes (transiciones entre estados).

El método consiste en simular computacionalmente la comunicación indirecta que utilizan las hormigas para establecer el camino más corto, guardando la información aprendida en una matriz de feromonas.

La Optimización de colonia de hormigas construye soluciones moviéndose en un grafo de construcción, donde los vértices son componentes del problema y los arcos conexiones entre estos componentes. Para construir una solución siguen cierta política dada por las restricciones del problema. Los componentes y las conexiones pueden tener asociadas cierta cantidad de feromona e información heurística acerca del problema. Al añadir un componente en una solución parcial, puede actualizar la cantidad de feromona (on-line step-by-step pheromone trail). También al llegar a una solución completa, puede ver todos los pasos que se siguieron y

también actualizar los niveles de feromona del camino (online delayed pheromone update). Las hormigas se mueven concurrentemente e independientemente.

Además la Optimización de colonia de hormigas incluye dos procedimientos adicionales:

1. Evaporación (pheromone trail evaporation): El proceso de evaporación define como decrecer la cantidad de feromona en el tiempo.
2. Demonios (daemon actions): Acciones tipo demonio pueden usarse para acciones centrales/globales que no pueden lograrse con las hormigas individuales.

Esta novedosa técnica se inspira en el comportamiento de las hormigas, animales casi ciegos pero con la habilidad de optimizar el camino hasta llegar a la fuente de su alimento y regresar al nido. El algoritmo utiliza agentes muy simples (llamados hormigas) que deben establecer el camino más corto para visitar todas las ciudades del problema una sola vez y regresar a la ciudad origen, para lo cual utilizan la información acumulada en una matriz de feromonas. [47]

El autor ha considerado un conjunto de  $n$  ciudades que deben ser visitadas por las  $m$  hormigas del sistema. Para satisfacer la restricción de que una hormiga visite todas las ciudades una sola vez, se asocia a cada hormiga  $k$  una pequeña estructura de datos llamada lista tabú, que guarda información relativa a las ciudades ya visitadas por dicha hormiga. Una vez que todas las ciudades hayan sido recorridas, el trayecto o viaje es completado volviendo a la ciudad origen. La lista tabú se vacía y nuevamente la hormiga está libre para iniciar un nuevo viaje, independientemente del estado en que se encuentren las demás hormigas del sistema, lo que sugiere un alto grado de paralelismo asíncrono.

En este contexto, se define como tabuk ( $n$ ) al elemento  $n$ -ésimo de la lista tabú de la hormiga  $k$  y como  $J(i, k)$  al conjunto de ciudades que aún no visitó la hormiga  $k$  ubicada en la ciudad  $i$ .

Dado el conjunto de  $n$  ciudades, denominamos  $d_{ij}$  a la longitud del camino entre las ciudades  $i$ ,  $j$ . El punto de partida para la solución del problema simétrico del cajero viajante, es la matriz de distancias  $D = \{d_{ij}, \text{distancia entre ciudades } i \text{ y } j\}$ , a partir de la cual se calcula la visibilidad  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ .

Por su parte, se denota como  $\tau = \{\tau(i, j)\}$  a la matriz de feromonas a ser utilizada para consolidar la información que va siendo recogida por las hormigas. En otras palabras,  $\tau(i, j)$  representa la cantidad de feromona que se va almacenando entre cada par de ciudades  $(i, j)$ . Esta es inicializada con un valor  $\tau_0$  definida como:

$$\tau_0 = (n * L_{nn})^{-1} \quad (2.5)$$

Donde  $L_{nn}$  es a la longitud de un viaje típico, obtenido inicialmente por alguna otra heurística o por pruebas aleatorias y que puede tratarse simplemente de una mala aproximación a la longitud

óptima del viaje, pues el algoritmo final no es muy sensible a la elección de este parámetro inicial.

La intensidad de las feromonas del arco  $(i, j)$ , es actualizada localmente mientras las hormigas construyen su viaje, esto es, al moverse de la ciudad  $i$  a la ciudad  $j$ , cada hormiga deposita una cantidad de feromonas en el arco correspondiente, calculado conforme:

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) * \tau(i, j) + \rho * \tau_0 \quad (2.6)$$

Donde  $0 < \rho < 1$  es un parámetro que puede entenderse como de evaporación de las feromonas de  $\tau$ . Además, se procede a una actualización global de  $\tau$  según la ecuación 2.7, la cual se realiza cuando todas las hormigas de una colonia terminaron su viaje y se puede establecer la mejor solución del ciclo.

$$\tau(i, j) = (1 - \alpha) * \tau(i, j) + \alpha * \Delta\tau(i, j) \quad (2.7)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de evaporación de las feromonas, que determina el grado de influencia de una buena solución en la actualización de la matriz de feromonas, mientras que la cantidad de feromona depositada en un arco  $(i, j)$ , esta dada por:

$$\Delta\tau(i, j) = \begin{cases} (L_{gb})^{-1} & \text{si } (i, j) \in \text{al mejor tour global} \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (2.8)$$

Donde  $L_{gb}$  es la longitud del mejor viaje global, hallado desde el mismo inicio de la corrida.

Durante la ejecución del Sistema de Colonia (ACS), una hormiga ubicada en la ciudad  $i$  debe elegir la próxima ciudad  $j$  a visitar, para lo cual elige de entre las ciudades no visitadas, con una probabilidad  $q_0$  la ciudad con mayor cantidad de feromonas en  $\tau$  (explotación). Esto puede ser expresado de la siguiente manera:

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_K(i)} \{[\tau(i, u)] * [\eta(i, u)]^\beta\}, & \text{si } q \leq q_0 \text{ (explotación)} \\ R, & \text{de otra manera (basado en exploración)} \end{cases} \quad (2.9)$$

Donde  $q$  es un número aleatorio uniformemente distribuido entre  $[0 \dots 1]$  obtenido al momento de la decisión,  $q_0$  es un parámetro  $0 < q_0 < 1$  que representa una probabilidad y  $R$  es una variable aleatoria seleccionada de acuerdo con la probabilidad dada por la ecuación 2.10.

$$P_R(i, j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)] * [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{u \in J_K(i)} [\tau(i, u)] * [\eta(i, u)]^\beta} & \text{si } j \in J_K(i) \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad 2.10$$

Donde  $\beta$  es un parámetro que determina la importancia relativa de las feromonas respecto a la distancia ( $\beta > 0$ ). Por consiguiente, el algoritmo del Sistema de Colonia (ACS) secuencial puede expresarse como se muestra en la figura 2.8.

En resumen, el algoritmo del Sistema de Colonia (ACS) se inicia ubicando  $m$  hormigas en  $n$  ciudades de acuerdo a una regla de inicialización. Cada hormiga construye su propio viaje, eligiendo la próxima ciudad a visitar aplicando las ecuaciones 2.9 y 2.10. Mientras construyen su viaje, las hormigas actualizan feromonas al moverse de la ciudad  $i$  a la ciudad  $j$  según la ecuación 2.6. Cuando todas las hormigas volvieron a su ciudad de origen, se calcula la mejor distancia hallada en ciclo, y nuevamente se realiza una actualización de las feromonas, esta vez teniendo en cuenta, solo la mejor solución global  $L_{gb}$  según la ecuación 2.7. El proceso se repite iterativamente hasta que se cumpla algún criterio de parada.

Debido a la forma en que se calculan las probabilidades en 2.9 y 2.10, las hormigas son guiadas en la búsqueda de soluciones por información heurística, prefiriendo elegir los arcos con menor distancia y mayor cantidad de feromonas, lo que a su vez sirve para incrementar la cantidad de feromonas en los caminos que van resultando óptimos a medida que avanza la corrida del algoritmo.

---

1. Fase de inicialización

Inicializar contador de ciclos NC

Para cada arco  $(i, j)$ :

Valor inicial de  $\tau_{ij}(t) = \tau_0$

Para cada hormiga

Elegir ciudad origen

2. Repetir hasta llenar  $tabu_K$

Si es la última posición de  $tabu_K$

Para cada hormiga:

Insertar ciudad origen en  $tabu_K$

Sino

Para cada hormiga:

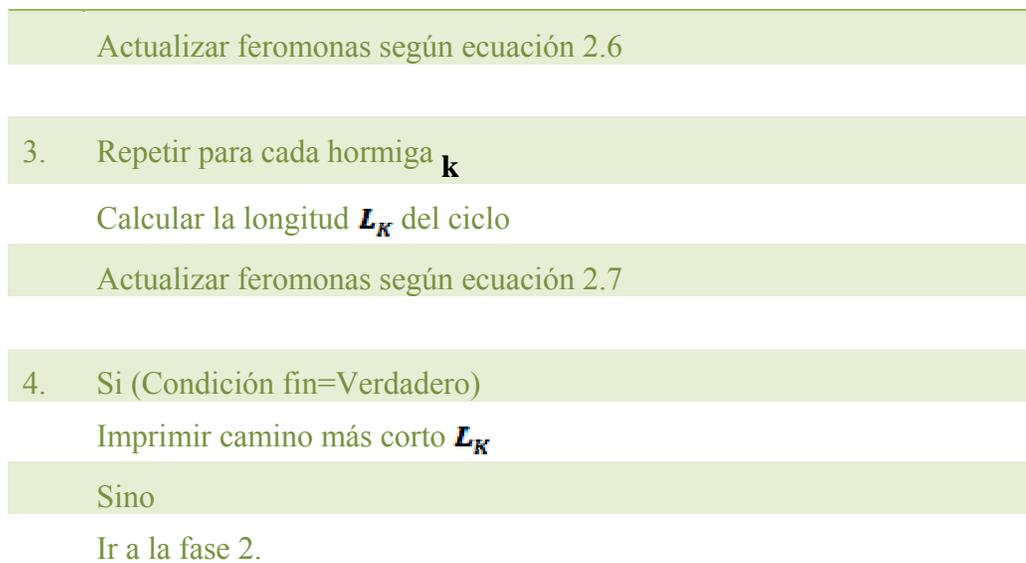
Elegir próxima ciudad a ser visitada según ecuaciones 2.9 y 2.10

Mover la hormiga a la próxima ciudad

Insertar ciudad seleccionada en  $tabu_K$

Para cada hormiga:

---



**Figura 2.8: Pseudocódigo de un Algoritmo Colonia de Hormigas secuencial. [47]**

## **2.2.- Aplicaciones industriales de las herramientas de Inteligencia Artificial a los procesos de conformación.**

### **Ejemplos de aplicaciones Industriales de las herramientas de Inteligencia Artificial a los procesos de conformación de materiales.**

Es de suma importancia ilustrar mediante ejemplos la utilización de las diferentes técnicas de Inteligencia Artificial asociadas a los procesos de conformación, pues visualizará las soluciones a que se pueden acceder con la práctica de estas.

Mientras el poder de la evolución gana reconocimiento cada vez más generalizado, los algoritmos genéticos se utilizan para abordar una amplia variedad de problemas en un conjunto de campos sumamente diverso, demostrando claramente su capacidad y su potencial. Esta sección analizará algunos de los usos más notables en los que han tomado parte.

Como resultado de la aplicación de los Algoritmos Genéticos al caso particular del diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos, se plantearon un sistema que permitiera al diseñador buscar aquella solución que satisface no solo un compromiso razonable entre los indicadores de eficiencia cuantificables que resultan de su interés, sino también otros indicadores de carácter subjetivo, es decir, el troquel que más le agrada desde todo punto de vista. En este caso se hizo necesaria la conciliación de las tareas de distribución de piezas en la chapa con la tarea de diseño del troquel. La conciliación de decisiones entre tareas y sistemas interrelacionados tiene presencia universal, pues está determinada por la interdependencia de los procesos y fenómenos del mundo real. [48]

La aplicación exitosa de los Algoritmos Genéticos a la tarea del diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado sugiere 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.

Obayashi, S., Daisuke S., Takeguchi, Y. y Hirose, utilizaron un algoritmo genético de múltiples objetivos para diseñar la forma del ala de un avión supersónico. Hay tres consideraciones principales que determinan la configuración del ala: minimizar la resistencia aerodinámica a velocidades de vuelo supersónicas, minimizar la resistencia a velocidades subsónicas y minimizar la carga aerodinámica (la fuerza que tiende a doblar el ala). Estos objetivos son mutuamente exclusivos, y optimizarlos todos simultáneamente requiere realizar contrapartidas.

El cromosoma de este problema es una cadena de 66 números reales, cada uno de los cuales corresponde a un aspecto específico del ala: su forma, su grosor, su torsión, etcétera. Se simuló una evolución con selección elitista durante 70 generaciones, con un tamaño de población de 64 individuos. Al final de este proceso había varios individuos paretianos, cada uno representando una solución no dominada del problema. El artículo comenta que estos individuos ganadores tenían características "físicamente razonables", señalando la validez de la técnica de optimización (p. 186). Para evaluar mejor la calidad de las soluciones, las seis mejores fueron comparadas con un diseño de ala supersónica producido por el Equipo de Diseño del Laboratorio Aeroespacial Nacional de Japón. Las seis fueron competitivas, con valores de resistencia y carga aproximadamente iguales o menores a los del ala diseñada por humanos; en particular, una de las soluciones evolucionadas superó al diseño de los humanos en los tres objetivos. Los autores señalan que las soluciones del AG son similares a un diseño llamado "ala flecha", sugerido por primera vez a finales de los años 50, pero que finalmente fue abandonado en favor del diseño más convencional con forma de delta. [49]

En un artículo posterior [50], los autores repitieron el experimento añadiendo un cuarto objetivo: minimizar el momento de torsión (un conocido problema en los diseños de alas flecha en el vuelo supersónico). También se añadieron puntos de control adicionales para el grosor al conjunto de variables de diseño. Tras 75 generaciones de evolución, se compararon dos de las mejores soluciones paretianas con el diseño de ala que el Laboratorio Aeroespacial Nacional japonés realizó para el avión supersónico experimental NEXST-1. Se descubrió que ambos diseños (además de un diseño óptimo de la simulación anterior, explicada arriba) eran físicamente razonables y superiores al diseño de los humanos en los cuatro objetivos.

Ashley, S., en conjunto a, empresas de la industria aeroespacial, automovilística, fabril, turbo maquinaria y electrónica están utilizando un sistema de software propietario conocido como Engineous, que utiliza algoritmos genéticos, para diseñar y mejorar motores, turbinas y otros dispositivos industriales, muchos de los cuales están compuestos o fabricados en su totalidad por medio de procesos de estirado y estirado profundo de chapas. En un ensayo del sistema, Engineous consiguió producir un incremento del 0,92 por ciento de la eficiencia de una turbina experimental en sólo una semana, mientras que diez semanas de trabajo de un diseñador humano sólo produjeron un 0,5 por ciento de mejora.

El software no sólo cuenta con algoritmos genéticos; también emplea técnicas de optimización numérica y sistemas expertos. Sin embargo, estas técnicas dependen mucho de información específica del dominio, carecen de aplicabilidad general, y son propensas a quedar atrapadas en

óptimos locales. En contraste, el uso de algoritmos genéticos permite a Engineous explorar regiones del espacio de búsqueda que pasan por alto los otros métodos. [51]

### **2.2.1.- Limitaciones y alcance de las técnicas de IA en relación a los procesos de conformación de chapas.**

Posteriormente de haber descrito las características de las técnicas que conforman la Inteligencia Artificial, se hace necesario analizar sus alcances y limitaciones en relación a los procesos de conformación de chapas metálicas, pues a partir de este análisis se seleccionará la técnica idónea para su posterior uso en los procesos de conformación por estirado profundo de chapas metálicas, considerando sus ventajas y detrimentos.

Es necesario aclarar que las técnicas que se han expuesto hasta ahora tienen características que las hacen diferentes de las demás, cada una con sus alcances y desventajas, han demostrado su valía en algún caso objetivo. Existen algunas técnicas que son derivaciones de los Algoritmos Genéticos como es el caso del Recocido Simulado, Sistemas Expertos, Lógica Difusa, pues adoptan conceptos y teorías de los algoritmos. Estos últimos, gozan de gran popularidad gracias a las posibilidades de trabajo que brindan y a los resultados que múltiples investigadores del mundo han obtenido con ellos.

Después de haber realizado una profunda y analítica revisión de la literatura existente, el autor distingue a los Algoritmos Genéticos (AG), Redes Neuronales (RNA) y Colonia de Hormigas (ACS) como las técnicas más integrales y profundas que se pueden utilizar en el campo de la conformación de chapas metálicas y fundamentalmente en el estirado profundo de chapas metálicas.

### **2.3.- Conclusiones Parciales**

1. Las técnicas computacionales, desde sus inicios, marcaron un paradigma en la creación; sus aplicaciones, hoy día, van desde la industria de los juegos hasta las cadenas de producción de varias empresas. Para ello se han desarrollado múltiples técnicas como las relacionadas con la Inteligencia Artificial.
2. Dentro de las técnicas más difundidas a nivel mundial se destacan los Algoritmos Genéticos, las Redes Neuronales, Las Colonias de Hormigas, los Sistemas Expertos, la Lógica Difusa, el Recocido Simulado y el Razonamiento Basado en Casos.
3. La revisión bibliográfica realizada describe a los Algoritmos Genéticos y las Redes Neuronales como las técnicas más utilizadas en el campo de la conformación de metales y en el caso específico del estirado de chapas metálicas se observan algunos trabajos foráneos con resultados significativos.
4. El sector industrial y manufacturero esta apoyándose grandemente en el uso de las técnicas de Inteligencia Artificial por la gran cantidad de opciones que les brindan dentro de ellas se encuentran la reducción del tiempo de fabricación así como la optimización y predicción de diversos parámetros de elaboración de piezas.
5. La compilación de datos a utilizar en el empleo de una técnica de Inteligencia Artificial requieren de una serie de regularidades desde el punto de vista técnico del proceso de conformación de chapas metálicas dentro de las que se encuentran las dimensiones de las piezas, tipo de troquel, distribución de piezas en la chapa, tipo de estirado, número de pasadas, tipo de matriz, material de la matriz y el punzón, además del aprovechamiento de la chapa, la productividad de la prensa, fuerza de corte, el costo de fabricación de cada pieza, durabilidad del troquel y su precisión.

# Capítulo 3

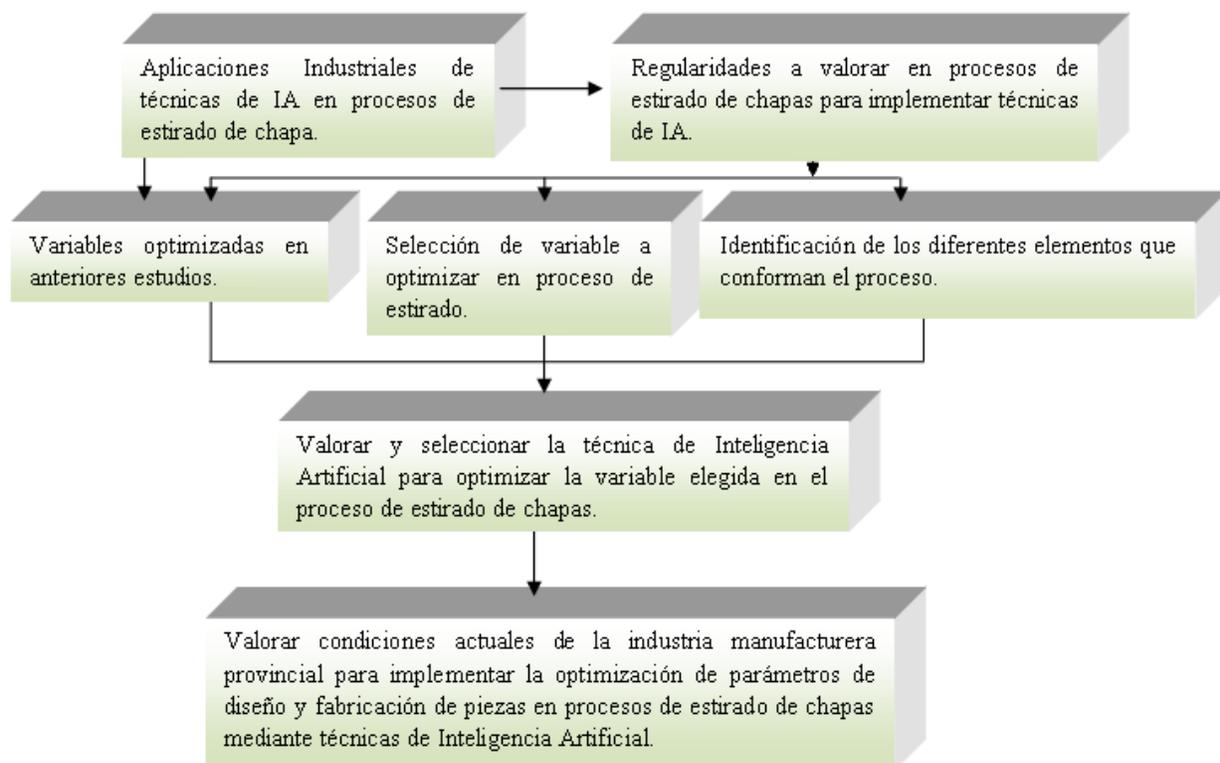


Facultad de Ingeniería Mecánica

### 3.- Posibilidades de empleo de las técnicas de Inteligencia Artificial en los procesos de estirado de chapas.

En el presente capítulo el autor requiere mencionar las aplicaciones de las técnicas de Inteligencia Artificial ya vinculadas al proceso de estirado de chapas metálicas para determinar las regularidades que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar una técnica específica para su implementación. Después de haber determinado dichas regularidades en el proceso de estirado de chapas se valorarán las posibilidades del empleo de la inteligencia artificial (IA) en este, para las condiciones actuales de la producción en la provincia.

A partir de ahí se decidió organizar un esquema de trabajo que facilite el desarrollo de este punto de la investigación. La **figura 3.1** muestra el esquema general para el análisis y desarrollo del tercer capítulo.



**Figura 3.1:** Procedimiento para el análisis y selección de la variable de optimización así como la determinación de regularidades a tener en cuenta en el uso de técnicas de inteligencia artificial.

En la **figura 3.1** se consideran:

1. Las experiencias Nacionales e Internacionales en cuanto a la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial en los procesos de estirado de chapas metálicas.

2. Elementos físico-matemáticos sobre las operaciones de conformación de materiales, con especial énfasis en los parámetros técnicos del proceso de estirado de chapas.
3. Las regularidades a tener en cuenta en el desarrollo de los procesos de estirado para lograr la aplicación de los Métodos Numéricos e Inteligencia Artificial de estas.

### **3.1.- Aplicaciones industriales de las herramientas de Inteligencia Artificial (IA) en los procesos de estirado de chapas.**

#### **Ejemplos de la utilización de Inteligencia Artificial a procesos de estirado de chapas.**

En el capítulo anterior se analizaron las aplicaciones de las diversas técnicas de Inteligencia Artificial para el caso general de los procesos de conformación de chapas, destacándose el uso de los Algoritmos Genéticos, las Redes Neuronales y el Método de Elementos Finitos. Se necesitan ver las aplicaciones de dichas técnicas ya vinculadas al proceso de estirado de chapas.

Hambli, R., y Guerin, F., propusieron una metodología para la obtención del óptimo diseño del punzón y su posterior simulación por medio de Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales y Elementos Finitos en el proceso de estirado de chapas. Los investigadores tuvieron en cuenta las propiedades mecánicas y microestructurales de las piezas a optimizar, así como los más importante parámetros de la geometría de esta, obteniendo resultados relevantes. [52]

Wei, L., et. al han utilizado métodos de optimización para la recuperación elástica en procesos de conformación por estirado a partir de la implementación de Algoritmos Genéticos, todos encontrando soluciones excelentes para los objetivos planteados. [53]

Son varios los científicos que han utilizado las redes neuronales en estudios realizados con el objetivo de optimizar algunos parámetros en los procesos de conformación por estirado de chapas metálicas, tal es el caso de investigadores como [54] y [55], los cuales han obtenido resultados satisfactorios en este campo de la mecánica. Los últimos realizaron un estudio donde entrenaron redes neuronales para la posterior predicción de los radios de doblados en los procesos de estirado de chapas. El máximo error en cinco predicciones realizadas fue de 16%, siendo un buen resultado, teniendo en cuenta que se estaba entrenando la red. Los investigadores aclararon que el error podía ser disminuido, reduciendo los límites de tolerancia en el entrenamiento. El estudio permitió obtener otros datos de suma importancia en los procesos de conformado como es el caso de la recuperación elástica, las tensiones plásticas que se produjeron y las tensiones residuales.

Viswanathan, V. (2008) utilizó un sistema de redes neuronales con el objetivo de controlar la recuperación elástica en el proceso de deformación de chapas usando como factor primario la trayectoria de la perforadora y examinó las variaciones que resultan de propiedades de materiales, grosor de estos y coeficientes de fricción como respuestas. Por los datos recogidos se determinó utilizar un polinomio de 3er grado capaz de correlacionar las variables de entrada de los diferentes materiales, grosor y condiciones de fricción de estos. La red neuronal fue capaz de determinar la trayectoria de fuerza andada de la máquina para guardar la recuperación elástica deseada en el entrenamiento de los datos. Luego introdujeron aceros y coeficientes de fricción no vistos en el entrenamiento. Cuando este pasó, la recuperación elástica fue predicha muy cerca de

la variedad deseada. Sin esta red neuronal, los ángulos predichos de la recuperación elástica variaron de 4 grados a 30 grados para la misma variedad de fuerzas. Los investigadores introdujeron y analizaron cada sistema experimental y calcularon cada predicción usando un Pentium II. Cada cálculo total tardó 5 milisegundos para completar. Este experimento demostró que una ecuación de control de red neuronal puede controlar el ángulo de recuperación en el proceso de deformación de chapas. Incluso aunque esto requiriera de un período de aprendizaje para una red neuronal. [56]

Vallellano, C., rce, J.J. y García Lomas, F.J., analizaron la capacidad para predecir el fallo en productos de chapa conformada de diferentes criterios de fallo por fractura dúctil. Para ello modelaron mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) un proceso de embutición axial simétrica, implementándose numéricamente criterios de fallos existentes en la literatura. Para ello, consideraron no sólo su facilidad para predecir el instante y zona de fallo, sino también su capacidad para reproducir el proceso físico de fallo de acuerdo con la evidencia experimental. Entre los criterios explorados están los propuestos por Cockcroft y Latham, Brozzo et al., Oyane et al. y Chaouadi et al. Las simulaciones realizadas suponen un comportamiento isótropo de la chapa, lo cual es una aproximación razonable dado que la anisotropía de las chapas no es muy elevada. [57]

El diseño mediante técnicas de Inteligencia Artificial para piezas axisimétricas realizadas por estirado profundo es un campo muy importante dentro de las investigaciones sobre la conformación de chapas metálicas, y la determinación del tiempo real y los parámetros del proceso son importantes para la tecnología en el diseño de piezas mediante Inteligencia Artificial. Por lo cual Zhao, J.y.W., F. realizaron una investigación y presentaron el modelo de una red neuronal, basada y entrenada por un algoritmo. Esta red neuronal fue establecida para comprender e identificar el tiempo real de las propiedades de los materiales y el coeficiente de fricción para piezas fabricadas por estirado profundo. El modelo propuesto por dichos investigadores fue comparado con otros modelos ya existentes como es el caso del modelo BP (Neural Network basado en un algoritmo de propagación anterior) y GA-ENN (Evolutionary Neural Network basado en un Algoritmo Genético). Los resultados arrojados por este nuevo modelo la comparación hecha con modelos existentes demuestran un paso de avance hacia otro nivel pues se logró la identificación exacta del parámetro que proporciona las condiciones previas en el proceso de diseño de piezas de estirado profundo. [58]

Regularidades que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar una técnica de inteligencia para la optimización de variables en el proceso de estirado de chapas.

Desde 1993 se reportan numerosos trabajos de investigación sobre simulación numérica de los procesos de conformado de chapas, particularmente los procesos de corte, doblado, laminación y embutición. El comportamiento de la distribución de tensiones y deformaciones, valores de fuerza, el análisis de la recuperación elástica, las variaciones en el espesor de la chapa y la secuencia de elaboración del proceso, son algunos de los elementos que se han tratado hasta el momento. [59], [2], [60], [61], [62], [48], [63],

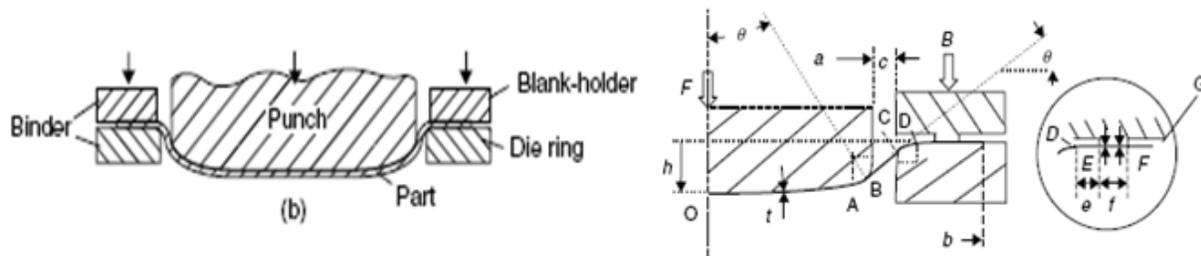
Otros trabajos han estado dirigidos a determinar la influencia de la forma inicial del semiproducto sobre la calidad de la pieza terminada y en la simulación. Los resultados de tales

trabajos no pueden ser generalizados porque, como se sabe, los procesos de embutido se asocian a complejos parámetros del proceso. La forma inicial rectangular es una de las más empleadas, pero se le asocian varios defectos tales como la aparición de arrugas en los bordes de la pieza. [65], [66],[67]

Especial atención han recibido los estudios 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 [19]. 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.

Como se ha podido constatar, existen múltiples elementos y variables que intervienen en el resultado y calidad final de una pieza fabricada por un proceso de conformado; haciéndose más compleja la tarea de definir y restringir estas variables en el proceso de estirado profundo de chapas.

En la **figura 3.2** 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 simulación que posibiliten conocer y comprender con anticipación las características y el desarrollo de la operación, así como la optimización del proceso.



**Figura 3.2** a) Elementos representativos de un proceso de embutido, b) ampliación de la sección de contacto. Adaptada de [68].

En la **figura 3.2**: **a**, ancho del punzón (punch width); **b**, ancho (diámetro) inicial de la chapa (blank width); **c**, juego de embutido ( side clearance); **e**, Ancho del prensachapa ( blank Holder ); **f**, freno (width of frictional, clamping, simulating a draw-bead); **h**, penetración del punzón (punch penetration or part depth); **t**, espesor inicial de la chapa (blank thickness);  $R_F$ , diámetro del punzón (punch face radius);  $R_P$ , radio del fondo del punzón (punch corner radius);  $R_D$ , radio de la matriz (die corner radius).

### 3.2 - Selección de la variable a optimizar en proceso de estirado de chapa.

Después de haber realizado un exhaustivo trabajo de revisión bibliográfica, un análisis de la situación existente en el diseño y fabricación de piezas mediante el proceso de estirado profundo en el sector industrial villaclareño y la insuficiencia de datos por parte de investigadores provinciales, se ha decidido seleccionar la fuerza máxima de embutición ( $F_D$ ) como variable a optimizar, debido a la importancia que presenta esta en la fabricación de piezas y la gran cantidad de elementos que dependen de ella.

La fuerza máxima de embutición interviene en el cálculo de las tensiones que se generan en el proceso de conformación por estirado, así como el comportamiento del material a embutir tiene un estrecho vínculo con dicha fuerza. Con la fuerza máxima de embutición se pueden calcular fuerzas, deformaciones, tensiones, se pueden determinar la deformación máxima en la pieza, los esfuerzos a los que está sujeta la herramienta así como es un factor determinante a la hora de seleccionar la máquina herramienta con la que se fabrica el producto.

La elección de esta variable además de lo anteriormente explicado obedece al deseo de obtener la menor fuerza de embutición con la cual se alcance la variación de deformaciones deseada antes que ocurra la rotura en el material. Dicho en otras palabras, alcanzar la deformación deseada en el diseño con la menor fuerza de embutición posible.

La fuerza máxima de embutición ( $F_D$ ) esta estrechamente relacionada con parámetros de conformación como es el caso de las deformaciones ( $\epsilon$ ) y tensiones ( $\sigma$ ), así como otros que dependen del comportamiento y las características del material, como son la resistencia a la conformación y el coeficiente de endurecimiento. La fuerza de embutición no es constante a lo largo del proceso por lo que al trabajar con ella como variable a mejorar, no se espera optimizarla hasta alcanzar un valor numérico exacto, sino que se optimizaría el proceso de embutición de manera general.

Para poder utilizar una herramienta de Inteligencia Artificial en el proceso de embutición sería necesario poner el fenómeno en función del tiempo, para poder segmentar ese tiempo y analizar el comportamiento de las deformaciones en función de la fuerza de embutición que se está ejerciendo a cada instante, de esa manera ver como se resuelve el problema desde el punto de vista matemático.

La **figura 3.3** muestra mediante un esquema la interrelación que existe entre la variable fuerza de embutición ( $F_D$ ) y el resultado por el cual se pretende optimizar el proceso, que en este caso es la variable de variación de espesor, la cual se busca alcanzar la deformación deseada antes que ocurra la rotura ( $\epsilon = \epsilon_{max}$ ).

Además se muestran las fórmulas matemáticas y propiedades físico-mecánicas que intervienen en el proceso de conformación, las cuales presentan una interdependencia en sentido general con la variable de fuerza de embutición.

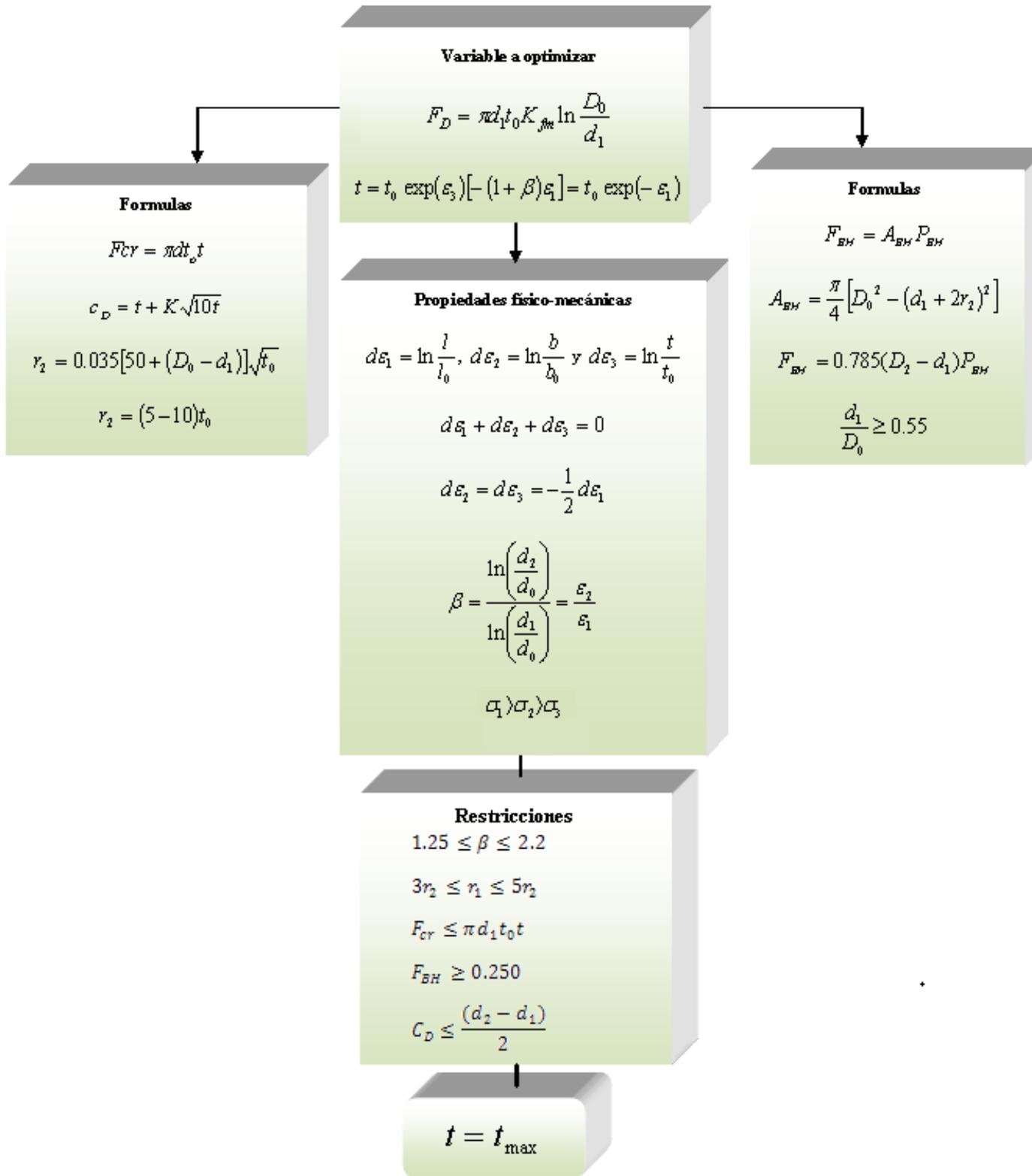


Figura 3.3: Esquema representativo mediante formulas de la variable que se desea optimizar en un proceso de estirado.

Estas fórmulas y propiedades físico-mecánicas están sujetas a restricciones establecidas con el objetivo de establecer fronteras a la hora de implementar una técnica de Inteligencia Artificial al fenómeno mecánico de conformación.

### **Recopilación de datos**

A la hora de utilizar una técnica de Inteligencia Artificial se deben tomar en cuenta una serie de regularidades para la planeación y posterior ejecución de la técnica. Desde el punto de vista objetivo, se deben reunir una serie de elementos indispensables para darle comienzo al desarrollo del trabajo. Por otro lado es de suma importancia definir los elementos que se necesitan para implementar una técnica de inteligencia artificial en el proceso de estirado profundo de chapas en la producción manufacturera provincial, pues dichos elementos ayudarán al autor para darle salida al objetivo principal de esta investigación, el cual pretende elaborar una metodología para el diseño de piezas por estirado profundo mediante técnicas de Inteligencia Artificial, de ahí que el primer paso es la confección de una base de datos que responda a los intereses de la investigación.

### **Base de datos**

Un sistema eficiente de manufactura integrada por computadora requiere de una base de datos, estas son indispensables para la toma de parámetros a la hora de aplicar cualquier técnica de Inteligencia Artificial. Las bases de datos consisten en la actualización de datos detallados y exactos acerca de productos, diseños, máquinas, procesos, materiales, producción, compras, ventas, mercadotecnia e inventario, etc. En sentido general, una base de datos consiste en la recopilación de los siguientes elementos, algunos de los cuales se clasifican como técnicos y otros como no técnicos:

1. Datos del producto, como forma, dimensiones y especificaciones de la pieza.
2. Atributos de administración de datos, como propietario, nivel de revisión y número de piezas.
3. Datos de operación, como calendarización, tamaños de lote y requisitos de ensamblaje.
4. Datos de los recursos, como capital, equipo, herramientas y personal, así como sus posibilidades.

Una base de datos  a utilizar que recopile información acerca del proceso de estirado profundo de chapas metálicas para la implementación de una técnica de Inteligencia Artificial debe presentar una serie de variables, las cuales aportarán antecedentes a dicha técnica.

Las **tablas 3.1 y 3.2** muestran como ejemplo, el formato de recopilación de datos de piezas, para obtener la mayor información posible acerca de operaciones de conformado de chapas metálicas. Este ha sido confeccionado por estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas con el fin de compilar información que posteriormente se utilizará para la elaboración de una base de datos en la EINPUT “1<sup>o</sup> de Mayo”.

Pieza o componente	Operaciones totales	Operaciones de conformado					Otros procesos
		Embutido	Otras oper. embutido	corte	Punzonado	Recalcado	

*Tabla 3.1: Determinación de cantidad y tipo de operaciones.*

En la **tabla 3.1** se determinarán la cantidad de operaciones que realiza un componente, en este caso un troquel o los pasos por los cuales se obtiene una pieza determinada.

Denominación del Troquel del embutido	Pieza	Elementos constructivos. Tipo / cantidad					
Troquel de Embutido Bandeja de Derrame Hornilla Eléctrica	Bandeja de Derrame						

*Tabla 3.2: Determinación de elementos constructivos de cada componente.*

Para la creación de una Base de Datos y el uso de de estas en la implementación de cualquier tipo de técnica de IA, se debe crear un equipo multidisciplinario de Ingenieros Mecánicos, Diseñadores y Programadores, así como la creación de las condiciones materiales de estos, dígame computadoras y software que le permitan el desarrollo de una investigación de este tipo.

Según Kobayashi [32], para proyectar e interpretar adecuadamente una operación de conformación, hay que valorar los elementos siguientes:

- Establecer las relaciones cinemáticas del proceso (forma, velocidades, relación de deformaciones) entre la parte deformada (blank) y la parte no deformada.
- 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. (Ver figura 3.4 del anexo 3)
- Prever la fuerza y las tensiones necesarias para ejecutar la operación de conformación.

La complejidad de la operación de embutido demanda el uso de las técnicas inversas para su optimización. Una posible vía para resolver los problemas que aquí se presentan parte de la representación multiobjetiva, multicriterial y de la toma de decisiones, sobre las variables que intervienen en el proceso y su relación con el método de elementos finitos y las técnicas de optimización. Esto es:

- a) La utilización de los métodos de elementos finitos (MEF) en el análisis paramétrico del proceso.
- b) Optimización del proceso mediante técnicas de inteligencia artificial (IA), Redes Neuronales Artificiales (RNA), Algoritmos Genéticos (AG), Sistema Experto (SE),



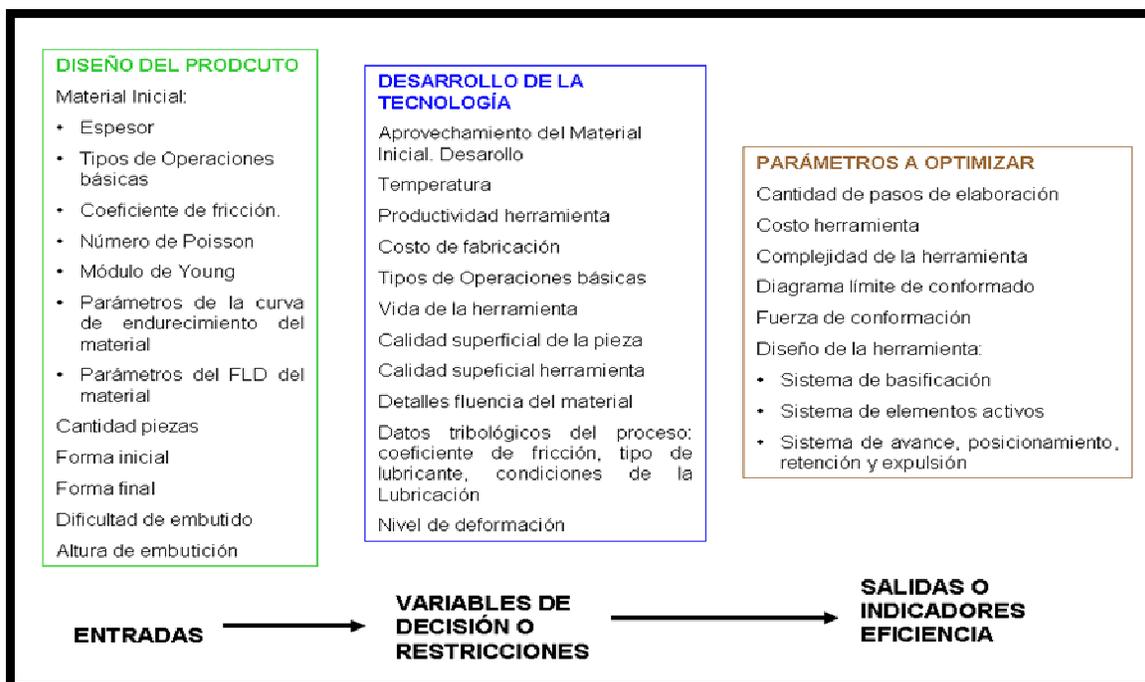
constitutivos de la herramienta. Tampoco existen criterios uniformes en cuanto a los elementos a optimizar en la operación.

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

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

1. Las características del material (propiedades, tamaño del grano, acritud, coeficiente de anisotropía)
2. Espesor del material (variaciones)
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

En la **figura 3.8** el autor propone 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, en la misma se consideran elementos propios del diseño del producto (pieza), del desarrollo de la tecnología de elaboración por embutido y los parámetros que representan los indicadores de eficiencia y los elementos a optimizar.



**Figura 3.8. 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 chapa.**

El trabajo con el sistema de variables que se propone puede ser complejo, de ahí que el autor proponga la siguiente metodología de trabajo:

Paso 1	Simulación del proceso de embutido de chapas empleando el MEF.	
	1.1	Definir variables de entrada con las que se trabajará (forma geométrica, material, parámetros del proceso, diagrama limite de conformado.)
	1.2	Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros.
	1.3	Definir las variables de salida que interesan (a los de la figura 4 se pueden añadir, por ejemplo, criterios para determinar los valores de tensiones, variaciones en el espesor del material.
	1.4	Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia. Habría que definir los niveles de esta experimentación.
	1.5	Validación del MEF.
Paso 2	Seleccionar de forma apropiada una herramienta de inteligencia artificial para modelar el efecto de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.	
Paso 3	Modelar la herramienta de IA para cada indicador de eficiencia seleccionado.	
Paso 4	Comparar los resultados de la simulación por MEF y por IA.	

La herramienta de inteligencia artificial se debe emplear para encontrar las condiciones óptimas de los parámetros del proceso, parámetros geométricos de la pieza ó los parámetros de operación de la máquina para el embutido profundo de piezas cilíndricas en lugar de los tradicionales métodos de prueba y error que actualmente se utilizan en las industrias del país.

### **3.3.- Valoración de las posibilidades del empleo de la Inteligencia Artificial para los procesos de estirado de chapas para las condiciones concretas en la región central.**

Selección de una herramienta de Inteligencia Artificial para modelar el efecto de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.

Después de haber destinado el Capítulo II al estudio de diversas técnicas que pertenecen a la rama de la Inteligencia Artificial y examinado el uso de ellas por diversos investigadores en la revisión bibliográfica que se realizó, el autor recomienda el uso de los Algoritmos Genéticos (GA) para la tarea de optimización de la variable fuerza máxima de embutición ( $F_D$ ) perteneciente esta al proceso de estirado profundo de chapas metálicas.

La decisión de utilizar esta técnica se origina de la cantidad de opciones que ofrece al ser utilizada, destacándose en la solución y optimización de problemas en procesos de

conformación. Ejemplo de esto es la posibilidad de explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones a la vez. Dirigirse hacia el espacio con los individuos (datos) más aptos y encontrar el mejor de ese grupo. Otra causa por la cual se destacan es que tienen gran habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente, cosa que es realmente complicada en el proceso de conformación por embutido.

### **Evaluación de las condiciones de implementación de Algoritmos Genéticos como herramienta de Inteligencia Artificial en la optimización de procesos de estirado.**

A la hora de evaluar las condiciones existentes en la provincia para la implementación de una técnica de Inteligencia Artificial, como es el caso de los Algoritmos Genéticos se deben tener en cuenta las ventajas que ofrecen dichas herramientas, las cuales se aprecian en el rico contenido obtenido mediante la revisión bibliográfica, demostrando el gran interés que le prestan países del primer mundo y naciones emergentes como es el caso de China y Brasil al tema.

Un punto importante por el cual se utilizan técnicas de este tipo en el mundo entero, es además de obtener productos con calidad elevada es el ahorro que representa su uso. La utilización de estas técnicas permite prescindir de técnicas de ensayo y error para obtener los parámetros deseados, técnicas que por demás consumen materia prima, energía eléctrica y tiempo. La provincia y en general el país deberían considerar el uso de las técnicas de Inteligencia Artificial como alternativa de ahorro en a la situación existente debido a la crisis mundial.

Por otra parte existen las condiciones para promover el uso de técnicas de Inteligencia Artificial en la provincia, pues existe la base productiva; al poseer varias fábricas de producción, tal es el caso de la EINPUD “1<sup>ra</sup> de Mayo” y la investigación demuestra que para la ejecución de una técnica de Inteligencia Artificial es necesario crear un equipo multidisciplinario, compuesto por especialistas de las ramas correspondientes al experimento que se desee hacer, que en este caso, ese equipo debe estar compuesto por Ingenieros Mecánicos, Diseñadores, Metalurgistas y Programadores Cibernéticos. De ahí que las condiciones para este punto estén creadas, al existir un extenso grupo de profesores e investigadores capacitados en la provincia para conformar un grupo con estas características.

### **3.4.- Conclusiones Parciales**

1. El tema de la Inteligencia Artificial, y el uso de diversas técnicas de esta rama han tenido un impacto positivo en naciones del primer mundo, dándole solución a diversos problemas de disímiles índoles, y en el caso particular de la conformación por estirado de chapas metálicas se pudo constatar lo provechoso de su uso.
2. Para la optimización del proceso tecnológico de estirado de chapas hay que considerar elementos propios del diseño del producto (pieza), del desarrollo de la tecnología de elaboración por embutido y los parámetros que representan los indicadores de eficiencia.
3. Con la fuerza máxima de embutición se pueden calcular fuerzas, deformaciones, tensiones, se pueden determinar la deformación máxima en la pieza, los esfuerzos a los que está sujeto la herramienta así como, es un factor determinante a la hora de seleccionar la máquina herramienta con la que se fabrica el producto, por lo que se seleccionó para optimizarla.
4. La metodología propuesta servirá de guía para la posterior implementación de los Algoritmos Genéticos en la optimización de la variable seleccionada del proceso de conformación por estirado.
5. Se puede afirmar que en la actualidad en la provincia de Villa Clara existen las condiciones objetivas para la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial en el sector industrial.

# Conclusiones



Facultad de Ingeniería Mecánica

## *Conclusiones Generales*

---

1. Existen importantes estudios en el campo de los procesos de conformación de metales por estirado que brindan una valiosa teoría acerca de las propiedades plásticas de los materiales, así como herramientas para el cálculo de deformaciones, tensiones, variaciones de espesor y fuerzas.
2. Los parámetros que conforman el proceso de estirado de chapas, dígame fuerzas, variaciones de espesor, tensiones y deformaciones, presentan una estrecha interrelación lo que eleva la complejidad de este tipo de procesos.
3. En el mundo entero han tenido gran impacto el uso de las herramientas propuestas por la Inteligencia Artificial, dígame Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales, Sistemas basados en casos, Recocido simulado, etc., por el extenso campo de soluciones que ofrecen.
4. La industria manufacturera utiliza muchas de las técnicas de Inteligencia Artificial por las ventajas que estas ofrecen, pues reducen el tiempo de fabricación así como optimizan y predicen diversos parámetros de elaboración de piezas, que inciden directamente en la calidad del producto.

# Recomendaciones



Facultad de Ingeniería Mecánica

1. Este trabajo deja sentadas las bases, sirviendo de guía para la posterior implementación de la técnica de Algoritmos Genéticos, lo que el autor recomienda dar seguimiento pues evidenciaría la teoría descrita en esta investigación.
2. Luego de alcanzar resultados en la optimización de la variable seleccionada, sería de interés seguir explorando el fenómeno de estirado pero utilizando otros parámetros, con el objetivo de seguir indagando en el comportamiento del proceso de embutición.

# Bibliografía



Facultad de Ingeniería Mecánica

1. Gao, J.X., Tang, Y.S., y Sharma, R., A feature model editor and process planning system for sheet metal products. *Journal of Materials Processing Technology.*, 2000. Vol. 107(1-3): p. pp. 88-95.
2. Carvalho, J.L., Simulación Numérica de Procesos de Estampado de Chapas Metálicas, in Departamento de Ingeniería Mecánica. 2003, Universidad de Minho, Guimarães.: Brasil.
3. Marty, J.y.Y.B., “Breve caracterización del estado del arte en la simulación del conformado de la chapa”, in V Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica. 2008: Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
4. Xie, S.Q., Tu, P.L., Aitchison, D., Dunlop, R. y Zhou, Z.D., A www - based integrated product development platform for shett metal parts intelligent concurrent design and manufacturing. . *Int. J. Prod. Res*, 2001. Vol. 39(17): p. pp. 3829-3852.
5. Gallardo, M., ed. Conformación de Metales. Editorial Pueblo y Educación. ed. 1997: México.
6. García, O., Principios básicos para el estudio de la modelación de los procesos de conformación de materiales, in Departamento de Ingeniería Mecánica. 2002, Universidad Marta Abreu: Villa Clara, Cuba.
7. Marty, J.R., Procedimientos metodológicos para determinar características de formabilidad en las chapas metálicas, in Departamento de Procesos Tecnológicos. 1999, Universidad “Marta Abreu”: Villa Clara, Cuba.
8. Szcepinski, W., Introduction to the Mechanics of Plastic Forming of Metal. Polish Scientific Publishers, 1979.
9. Rossi, M., ed. Estampado en frio de la chapa. Editorial Científico Médica ed. 1966: Barcelona.
10. Chauvelin, G., ed. Trabajos de los metales por deformación en frio. Editorial Blume ed., ed. M.d.l. Heros. 1968.
11. Dieter, G., ed. Metalurgia Mecánica. Mc. Graw Hill Book Co ed. 1967.
12. Nyung, D.y.K.I., Calculation of Yield Stresses and Plastic Strain Ratios. *Journal of Materials Science*, 1998. Vol 23: p. pp. 4013-4021.
13. Fernández, V., (1986). Diagramas Limites de Conformado de Chapas Metálicas. *Deformación Metálica*. No.116, 1986: p. pp. 21-26.

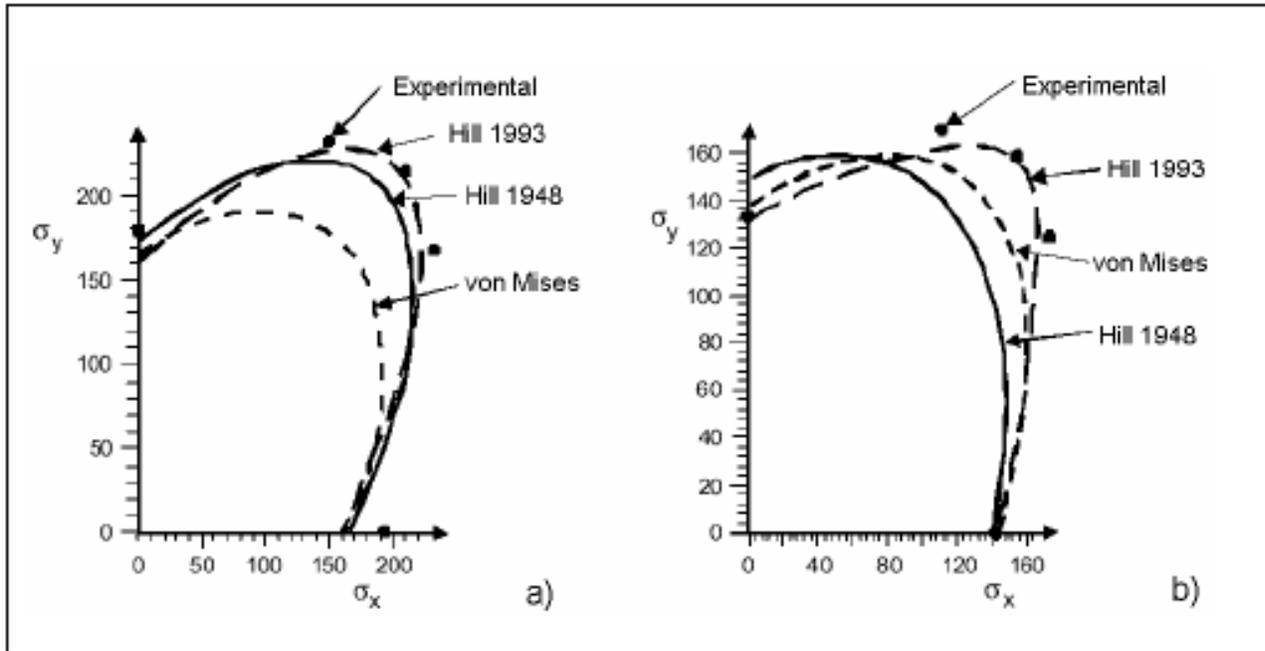
14. Estrin, Y.y.L.P.E., (1991). Plastic Instabilities: Phenomenology and Theory. *Materials Science and Engineering*, 1991. Vol. A.137: p. pp.125-134.
15. Marciniak, Z.y.E.K., (1967). Limit Strains in the Problems of Stretch Forming Sheet Metal. *International Journal Mechanical Science*, 1967. Vol. 9(No. 9): p. pp.609-614.
16. Chokshi, A.H.y.L., T.G, (1989). The Influence of Rolling Direction on the Mechanical Behavior and deformation of Cavity Stringers in the Super plastic Zn2296 Al Alloy. *Acta Metallurgical.* , 1989. Vol. 37(No. 2.).
17. Houbaert, Y., *Desarrollos recientes en aceros para embutición profunda.* 2000, Universidad de Gent: Bélgica.
18. Ochler, G., ed. *Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir.* ed. E.G.G. S. 1977: Barcelona.
19. Firat, M., *Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part III: Stamping die-face design.* *Materials and Design* 2007. Vol. 28: p. pp. 1311-1320.
20. Dieter, G.E., “*Mechanical Metallurgy*” McGraw-Hill Book Company, 1986. 3ra edición.
21. Habraken, A.M., *Modelling the plastic anisotropy of metals by finite element method*, in Departamento MSM. 2000, Universidad de Liege. Bélgica.
22. Hill, R., *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic materials.* *Proceedings Mathematical, Physical and Engineering Science*, Royal Society London, 1948. A.193: p. pp. 281-297.
23. Hill, R., (1979) *Theoretical plasticity of textured aggregates.* *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.*, 1979. Vol. 75: p. pp. 179-191.
24. Hill, R., (1990). *Constitutive modeling of orthotropic plasticity in sheet metals.* *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* , 1990. Vol. 38: p. pp. 405-417.
25. Bassani, J., *Yield characterization of metals with transversally isotropic plastic properties.* *International Journal of Mechanical Science*, 1977. Vol 19: p. pp. 651-654.
26. Budiansky, B., *Anisotropic plasticity of plane-isotropic sheet.* *Mechanics of materials Behaviour.*, 1984: p. pp.15-29.
27. Karafillis, A.P.y.B., M.C., *A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor.* *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1993. Vol. 41: p. pp.1859-1886.

28. Vegter, H., An, Y., Pijlman, H.H, Carleer, B.D. y Huetink, J., Different approaches to describe the plastic material behavior of steel and aluminium-alloys in sheet forming. , in ESAFORM Conference on Material Forming. 1999, Eds Covas J.A.: Guimaraes.
29. Banabic, D., Sheet metal formability predicted by using the new Hill's yield criterion. Advanced Methods in Materials Processing Defects, Predeleanu M & Gilormini P, 1997: p. pp.257-264.
30. Almeida, J.J., Lopez, A.B. y Rauch, E.F., Unstable flow of Aluminium Sheets During Complex Forming Operations., in Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica 1997: La Habana.
31. Crain, L.M., Metalworking is not Problem for Nonlinear FEA. Machine Desing, 1996: p. pp.65-68.
32. Kobayashi, S., S.I., Oh and T. Altan., Metal Forming and Finite Elements Method. 1989, Oxford University: New York.
33. Ortiz, T.M.D., E. y J. Pozo (2008) "Estado del arte en la temática de la recuperación por soldadura de herramientas de conformación". Volume,
34. Sotolongo, G., "Aplicaciones de las redes neuronales. El caso de la Bibliometría". Revistas Ciencias de la Información, 2001. Vol. 32(No. 1): p. pp. 27-34.
35. Marczyk, A., "Algoritmos genéticos y computación evolutiva", in Mathematics Department. 2004, Macquarie University: Sydney, .
36. Moro, M., (2002), Tecnologías de Fabricación, 2002.
37. Hornik, K., Stinchcombe, M., y White, H., Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. Neural Networks., 1989. Vol. 2: p. pp. 359-66.
38. Holland, J. (1999) "Home Page sobre Algoritmos Genéticos". Algoritmos Genéticos Volume,
39. Crevillén, G.y.D.D. (2008) "Home page sobre Algoritmos Genéticos" en Nexus 7. Volume,
40. Castro, Y.C.A., R. y K.Zutta "Algoritmos Genéticos", in Escuela Académica Profesional de Informática 2008, Universidad Nacional de Trujillo: Perú.
41. Holland, J., ``Genetic algorithms.". Scientific American, 1992: p. p. 66-72.
42. Forrest, S., ``Genetic algorithms: principles of natural selection applied to computation.". Science, 1993. vol.261: p. p.872-878.

43. Coello, C., "An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques." *ACM Computing Surveys*, 2000. vol.32 (no.2): p. p.109-143.
44. Vargas, A. (2008) "Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Problemas de Producción" *Gestiopolis.com Volume*,
45. Morales, E. (2009) "Optimización basada en: Colonia de Hormigas". *Volume*,
46. M., B.B.y.A. "Colonias distribuidas de hormigas en un entorno paralelo asíncrono". in *XXVI Conferencia Latinoamericana de Informática – CLEI'00*. 2000. México.
47. L., D.M.y.G., "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem". *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 1997. Vol. 1(No.1): p. pp. 53-66.
48. Ruiz, J.A.y.S., R. E., "Aplicación de los Algoritmos Genéticos al Diseño Óptimo Multiobjetivo de Troqueles de Corte y Punzonado Simples y Progresivos". *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2002. Vol. 22(No. 2).
49. Obayashi, S., Daisuke S., Takeguchi, Y. y Hirose., "Multiobjective evolutionary computation for supersonic wing-shape optimization." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2000. Vol.4 (no.2): p. pp.182-187.
50. Sasaki, D., Morikawa, M., Obayashi, y Nakahashi, K. "Aerodynamic shape optimization of supersonic wings by adaptive range multiobjective genetic algorithms." in *Evolutionary Multi-Criterion Optimization: First International Conference, EMO*. 2001. Zurich, Switzerland: Computer Science.
51. Ashley, S., "Engineous explores the design space." *Mechanical Engineering*, 1992. Pp.49-52.
52. Hambli, R., y Guerin, F., "Application of a neural network for optimum clearance prediction in sheet metal blanking processes" *Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam*, 2003. Vol. 39: p. pp. 1039-1052.
53. Wei, L., Yuying, Y., Zhongwen, X., Lihong, Z. (2008) "Springback control of sheet metal forming based on the response-surface method and multi-objective genetic algorithm" *Materials Science and Engineering: A*, In Press, Corrected Proof Volume,
54. Viswanathan, V., Kinsey, B. y Cao, J., Experimental Implementation of neural network Control for Sheet Metal Forming. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2001.
55. Pathak, K.K., Panthi, S., y Ramakrishnan, N., (2005) Application of Neural Network in Sheet Metal Bending Process. April, Application of Neural Network in Sheet Metal Bending Process. *Defence Science Journal*, 2005. Vol. 55(No. 2 ): p. pp. 125-131.

56. Viswanathan, V. (2008) "Sheet Metal Forming: Springback Control". BookRags Student Essays Volume,
57. Vallellano, C., rce, J.J. y García Lomas, F.J., Predicción del fallo en el conformado plástico de chapas mediante criterios de fractura dúctil, in Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales. 2005, Universidad de Sevilla: Sevilla.
58. Zhao, J.y.W., F., "Parameter identification by neural network for intelligent deep drawing of axisymmetric workpieces". Journal of Materials Processing Technology, 2005. Vol. 166: p. pp. 387–391.
59. Ahmed, M.y.G.S.S., Finit Element Simulation of Sheet Metal Forming Processes. Science Journal, 2005. Vol. 55: p. pp. 389-401.
60. Souza, T.y.B.R., Multivariate modelling of variability in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology, 2008. Vol. 203: p. pp. 1-12.
61. Guo, Y., Q et al, Finte element procedures for strain simulstion of sheet metal forming parts. 1990: p. pp. 1385-101.
62. Mackerle, J., Finite Elements analyses and simulation of sheet metal forming processes. International Journal of Plasticity, 2004. Vol. 21: p. pp. 891-940
63. Sousa, L.C., "Optimal Design of V and U Bending Processes Using Genetic Algorithms". Journal of Materials Processing Technology, 2006. Vol.172: p. pp. 35–41.
64. 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.
65. Moreno, M.E., Desenvolvimento e Implementacao de Metodologia de Otimizacao da Geometria do Blank em Processos de Conformacao de Chapas Metálicas, in Departamento de Engenharia Mecánica. 2000, Universidade de Sao Paulo: Sao Paulo. Sao Carlos.
66. Bae, W.-B., H.-Y. Kim and B.-C. Hwang, Experimental Determination of the Optimum Blank Shape in Rectangular Cup Drawing. International Journal of the Korean Society of Precision Engineering,, 2003. Vol. 4.
67. Santos, A.D.a.P.T., Geometrías de Referencia Experimental en Procesos de Conformación Plástica de Chapas y su Modelación Numérica. Información Tecnológica, 2006: p. pp. 51-54.
68. Marciniak, Z., J.L. Duncan, and S.J. Hu, Mechanics of Sheet Metal Forming E. Science. Oxford: Butterworth-Heinemann., 2002.
69. Huang, J., J. Rao, and X. Li, Study on Process Parameters Optimizations of Sheet Metal Forming Based on PFEA/ANN/AG. Journal Material Science Technology, 2003. Vol. 19(1).

Anexo I



**Figura 1.9.- Comparación entre los lugares de plasticidad obtenidos experimentalmente y los obtenidos a partir de los criterios de Von Mises, Hill 1948 y Hill 1993. (Los valores están dados en Mpa) a) acero ST 1405 b) liga de aluminio AL Mg Si.**

Anexo II

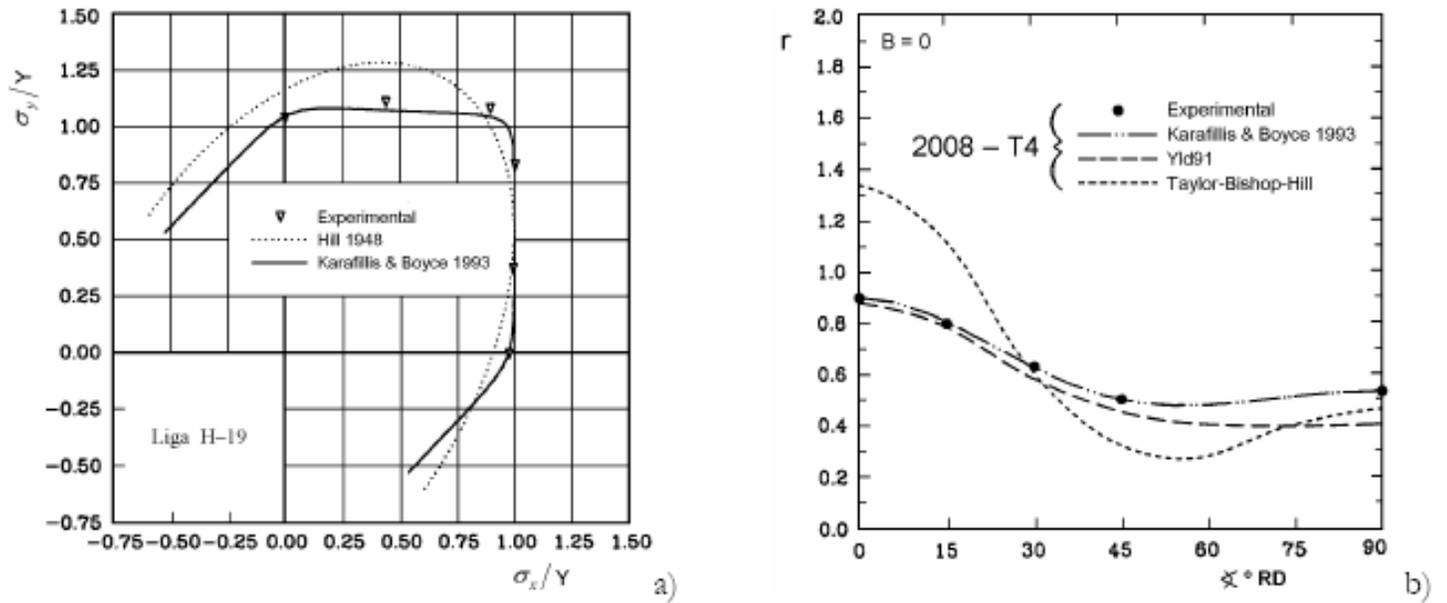


Figura 1.11.- Comparación entre las superficies de plasticidad y los valores de  $r$  experimentales y los propuestos por Karafillis & Boyce 1993, TBH, Balart et al.1991 y Hill 1948. [2]

Anexo III

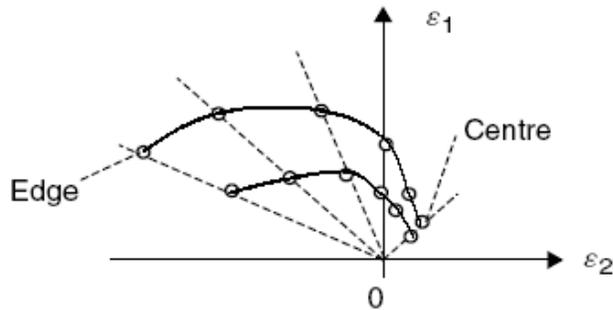


Figura 3.4. Diagrama Límite de Deformación. Relación entre las tensiones para dos zonas de una pieza embutida.

Anexo IV

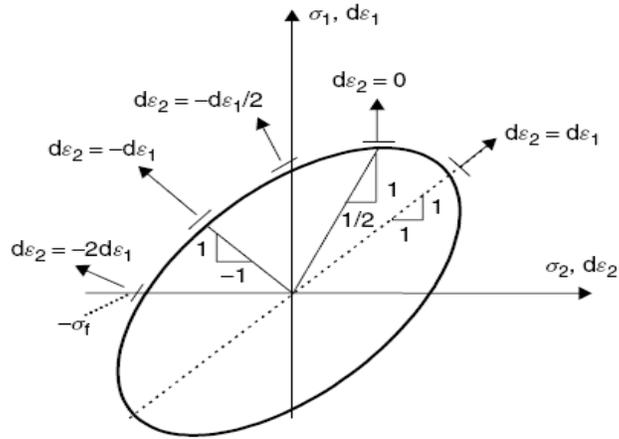


Figura 3.6. Diagrama mostrando los componentes del incremento de la deformación para diferentes estados de tensiones alrededor de los lugares de fluencia de von Mises

Anexo V

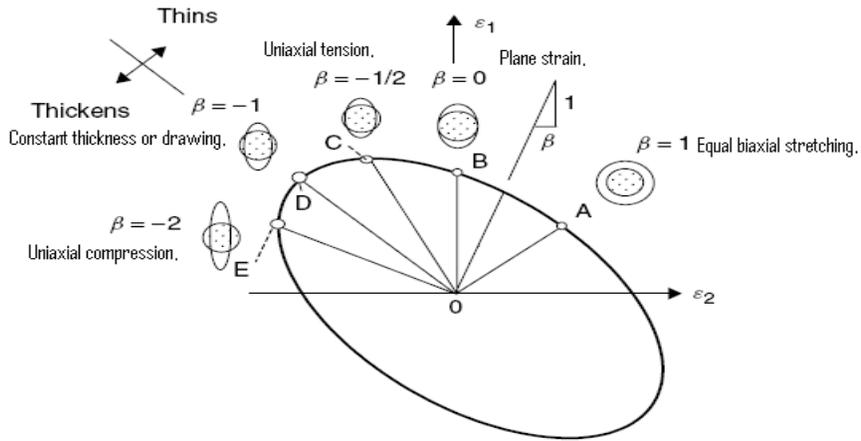


Figura 3.7. Diferentes modos de deformación en función de la relación entre las deformaciones