

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE DIPLOMA

Optimización del valor de la fuerza en el estampado incremental

Autor: Alberto Alian Delgado Hernández

Tutor: Dr. C. Ing. José Roberto Marty Delgado

Santa Clara

2013

"Año 55 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE DIPLOMA

Optimización del valor de la fuerza en el estampado incremental

Autor: Alberto Alian Delgado Hernández

Tutor: Dr. Ing., José Roberto Marty Delgado

Cotutor: Ing. Felipe Bacallao Mena

Santa Clara

2013

"Año 55 de la Revolución"

PENSAMIENTO

*Los científicos exploran lo que es.
Los ingenieros crean lo que nunca ha sido.*

T. von Karman

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, en especial, a mis padres, hermanos, abuelos, esposa y suegros por brindarme su apoyo siempre que los necesité, a toda mi familia en general porque siempre necesité de ella.

A mis amigos y compañeros de estudio por apoyarnos mutuamente en la larga y exitosa carrera que culmina con la realización de este trabajo; a todos los que directa o indirectamente me facilitaron su culminación.

A todos les dedico el resultado de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, esa fuente de energía positiva de la que todos hemos necesitado en distintos momentos de nuestras vidas; agradezco a mi país por las ventajas que nos proporciona y que gracias a ellas nos hacemos más humanos y mejores personas. Le agradezco a mi familia en general porque fueron muchos los que me apoyaron durante estos largos y exhaustivos años; quiero agradecer también a los amigos que conocí en este período y a los que siempre recordaré, a Frank Placencia porque gracias a él se pudo realizar el tercer capítulo de esta tesis; a mi tutor el Dr. José Roberto Marty Delgado porque nunca escatimó en hacernos llegar sus conocimientos, a todos ellos y a los que olvidé mencionar: mis más sinceros agradecimientos.

RESUMEN

El proceso de estampado incremental, según los estudios realizados hasta el momento, puede ser utilizado en nuestro país aplicándolo en producciones de pequeños lotes de piezas, por ser más económico que procesos convencionales desde el punto de vista de los costos de herramientas utilizadas. El presente trabajo tiene como objetivo presentar las principales características del proceso de estampado incremental de chapas, sus aplicaciones, ventajas y limitaciones con el fin de optimizar el valor de la fuerza de conformado mediante el empleo del software MATLAB. El trabajo es continuación de las investigaciones que se vienen desarrollando en el Departamento de Ingeniería Mecánica y, a partir de esos resultados, se utilizan las expresiones para el cálculo de la fuerza de conformación. Se detallan los parámetros técnicos que más influyen sobre el proceso tales como, forma y acabado de la herramienta, la estrategia de conformación, incrementos verticales y tipos de lubricantes. La optimización de los valores de fuerzas resultó ser satisfactoria.

Palabras claves: Estampado incremental, optimización, inteligencia artificial, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

The process of incremental forming, according to studies accomplished until now, it can be used at our country applying it in productions of little lots of pieces, to be more economic than conventional processes from the point of view of the costs of utilized tools. The present work aims at presenting the principal characteristics of the process of incremental forming of sheets, his applications, advantages and limitations with the aim of optimizing the value of the force of once the job of the software was conformed interveningly MATLAB. Work is continuation of the investigations that come over developing at the Engineering Department Mechanics and, as from those results, they utilize the expressions for the calculation of the force of conformation. They detail the technical parameters what else they act on the process such like, form and finishing of the tool, the strategy of conformation, vertical increments and types of lubricants. The results of optimization procedure was satisfactory.

Keywords: Incremental forming, optimization, artificial intelligence, genetic algorithms.

Índice de tablas

2.1. Diámetros de herramientas propuestos por algunos investigadores	32
3.1. Composición química del material	55
3.2. Propiedades mecánicas del material	55
3.3. Variables y sus restricciones	56
3.4. Parámetros seleccionados para el algoritmo genético	58
3.5. Nuevo intervalo para las variables a optimizar	60

Índice de figuras

1.1. Proceso de estampado incremental de chapas	5
1.2. Esquema del embutido profundo	5
1.3. Representación esquemática del diagrama límite de conformado	7
1.4. Curva del EICH vs estampado convencional	7
1.5. Variantes tecnológicas del EICH.....	8
1.6. Estampado incremental pr punto simple.....	9
1.7. Esquema del estampado incremental de dos puntos (partial die)	10
1.8. Esquema del estampado incremental de dos puntos (full die).....	10
1.9. Aplicaciones recientes en la industria automovilística	11
1.10. Elaboración de piezas de repuesto	12
1.11. Elaboración de piezas personalizadas.....	12
1.12. Piezas decorativas obtenidas por EICH.....	13
1.13. Máquina diseñada y construida para el EICH	13
1.14. Centro mecanizado utilizado en el proceso	14
1.15. Gráficas de costo vs prestación.....	17
1.16. Perceptrón de dos entradas	20
1.17. Diagrama de flujo de un algoritmo genético	25
2.1. Herramientas de carvuro cementado utilizadas en el EIPS	33
2.2. Herramientas obtenidas de acero de alta dureza.....	33
2.3. Marcas que surgen con el incremento vertical.....	34
2.4. Rugosidad bajo condiciones estándares de EICH	35
2.5. Proceso multietapas con herramientas de fijación rígida y rotando	35
2.6. Ley de los senos aplicada al proceso	37
2.7. Geometría de la herramienta y velocidad de conformado	39
2.8. Proceso de estampado incremental con lubricación	40
2.9. Ángulo máximo de la pared.....	41
2.10. Relación entre el ángulo de inclinación y el espesor de la chapa	42
2.11. Variación del ángulo de conformado.....	43
2.12. Curva de tensión vs deformación para acero y aluminio.....	44
2.13. Estamoado incremental y parámetros del proceso.....	48
3.1. Diagrama funcional de un algoritmo genético.....	53

3.2. Función objeto y parámetros escritos en MATLAB.....	58
3.3. Toolbox de optimización en MATLAB.....	59
3.4. Convergencia del algoritmo genético hacia la solución global de la fuerza de conformado	59
3.5. Convergencia del algoritmo genético hacia la solución global de la fuerza de conformado en condiciones reales de trabajo	60

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. Resultados de la revisión bibliográfica sobre los procesos de estampado incremental de chapas y las técnicas de optimización.....	4
1.1 Características generales de los procesos de estampado incremental de chapas	4
1.2 Posibilidad de introducción de la tecnología de estampado incremental en las condiciones de Cuba	11
1.2.1 Aplicaciones industriales de proceso de EICH.....	11
1.2.2 Máquinas herramientas empleadas en el proceso	13
1.2.3 Principales ventajas y desventajas de EICH.....	14
Ventajas del EICH	14
Desventajas del EICH.....	15
1.2.4 Posibilidades de introducción del EICH en la industria	15
1.3 Técnicas de optimización usadas en los procesos de conformado.....	16
1.3.1 Redes neuronales artificiales (RNA)	19
1.3.2 Algoritmos genéticos	21
1.3.3 Otras técnicas de inteligencia	25
Colonia de hormigas	25
Sistemas expertos.....	25
Lógica difusa.....	26
Recocido simulado.....	26
1.4 Conclusiones del capítulo	26
CAPÍTULO 2. Aspectos tecnológicos del proceso de estampado incremental por punto simple y metodología analítica para calcular la fuerza de conformado.....	28
2.1 Factores tecnológicos críticos que deciden sobre el estampado incremental por punto simple y sus limitaciones	28
2.1.1 Diámetro de la herramienta.....	28

2.1.2	Influencia del incremento vertical	31
2.1.3	Material de la chapa	33
2.1.4	Espesor de las chapas	34
2.1.5	Ángulo de conformado	34
2.1.6	Velocidad de conformación	35
2.1.7	Lubricación	36
2.1.8	Limitaciones del proceso de EICH	37
2.2	Modelo analítico para determinar la fuerza de conformado en el EICH	44
2.3	Conclusiones del capítulo	47
CAPÍTULO 3. Resultados de la optimización de los valores de la fuerza		48
3.1	Herramienta de inteligencia artificial a utilizar	48
3.1.1	Componentes de un algoritmo genético	48
3.1.2	Funcionamiento de un algoritmo genético	49
3.1.3	¿Por qué utilizar algoritmos genéticos y no otros métodos conocidos?	51
3.2	Metodología para optimizar la fuerza de conformado en MATLAB	52
3.3	Discusión de los resultados y su validación	54
3.4	Conclusiones del capítulo	57
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		59
Conclusiones Generales		59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		61
ANEXOS		64
Anexo I	Gráficas de la primera corrida del programa	64
Anexo II	Gráficas de la segunda corrida del programa	65
Anexo III	Listado de materiales con el máximo ángulo de deformación y su espesor inicial [5]	66

INTRODUCCIÓN

En busca de la mejoría continua y de mayor competitividad, las empresas exigen un desenvolvimiento continuo de nuevos procesos y técnicas de fabricación enfocado en la reducción del plazo, costo y aumento de la calidad.

El embutido convencional se hace muy complejo y engorroso para la producción de pequeños lotes de piezas fuera de la línea de producción.

Una alternativa para la fabricación de un pequeño lote piezas, como por ejemplo, prototipos, sería el estampado incremental; este proceso se presenta al mercado con el fin de disminuir los costos atribuidos al material de las herramientas utilizadas en el embutido tradicional.

En el proceso de estampado incremental una herramienta de geometría simple ejecuta la conformación de una chapa metálica a través de sucesivas deformaciones aplicadas localmente. Este proceso de fabricación posee variables que deben ser controladas y que afectan los resultados obtenidos.

El estudio de los procesos de conformado y del comportamiento de los diferentes tipos de materiales utilizados para estas operaciones está en pleno desarrollo en el mundo y han alcanzado en los últimos años una gran importancia industrial debido al papel que juegan en el desarrollo, por ejemplo, del transporte, en su rendimiento y el consumo de combustibles por la reducción de su peso.

Prácticamente desde sus orígenes, el estudio científico de los procesos de conformado se ha centrado en lograr procesos más eficientes para deformar chapas metálicas, que requieran de menores tiempos de elaboración y cuyos costos sean tan bajos como se pueda.

Se considera que la presente investigación tiene **importancia** en la actualidad ya que en los últimos años, destacados especialistas internacionales están dedicando atención a la tecnología de estampado incremental que pudiera sustituir, en parte, los procesos tradicionales de embutición de chapas. Gracias a la tecnología de estampado incremental de chapas, se puede dar una solución tecnológica y económica a las empresas que producen series cortas o prototipos y se ven obligadas en la actualidad a elaborar productos en otros materiales y a optimizar parámetros del proceso para disminuir los costos.

Surge así la **necesidad** de desarrollar estudios sobre la influencia de las variables tecnológicas del proceso de estampado incremental para conocer su influencia sobre la fuerza de conformación y así desarrollar una metodología satisfactoria para optimizar el valor de la misma con el empleo de los algoritmos genéticos.

Sobre esta base, el **problema científico** queda definido de la siguiente forma: dada la complejidad tecnológica del proceso de estampado incremental, no existe hasta el momento, una metodología para la optimización del valor de la fuerza de conformación necesaria para desarrollar el proceso.

Objetivo general

Establecer un procedimiento para la optimización de los valores de fuerza en el proceso de estampado incremental de chapas utilizando herramientas de inteligencia artificial.

Objetivos específicos

- 1) Estudiar mediante las técnicas de investigación documental las características de los procesos de estampado incremental de chapas.
- 2) Analizar los principales factores tecnológicos que influyen en el proceso de estampado incremental de chapas como alternativa para la optimización de los valores de fuerza en el proceso utilizando algoritmos genéticos como herramienta de inteligencia artificial.

La **hipótesis de investigación** plantea que, si se analizan los parámetros críticos más influyentes en el valor de la fuerza de estampado incremental de chapas, así como los intervalos para las restricciones de las variables influyentes, es posible establecer un procedimiento para la optimización del valor de la fuerza en el proceso

Esta tesis es continuación de los trabajos que se han realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica sobre el estampado incremental de chapas, especialmente de la tesis presentada en opción al grado de Máster en Ingeniería Mecánica por el Ing. Luis Enrique Rodríguez Sánchez titulada “Desarrollo de la tecnología de Estampado Incremental de Chapas para la elaboración de piezas conformadas de Al 3003”.

CAPÍTULO 1. Resultados de la revisión bibliográfica sobre los procesos de estampado incremental de chapas y las técnicas de optimización

Los procesos de deformación plástica se definen y clasifican conforme a sus características técnicas y aplicaciones. El forjado, la extrusión, el perfilado, el trefilado, laminado son ejemplos de procesos de deformación plástica.

El estampado incremental de chapas (EICH, por sus siglas), es un proceso de conformación innovador, el cual es capaz de producir piezas de geometrías complejas, utilizando la tecnología por control numérico (CNC) ya ampliamente difundida en los procesos de manufactura de metales. Presenta como principales ventajas: a) bajos costos de preparación de la máquina herramienta, b) utilización de máquinas CNC de tres ejes comunes, c) gran flexibilidad, ya que nuevos productos se obtienen al cambiar solo el modelo de diseño (CAD – Computer Aided Design) , permitiendo así la producción de pequeños lotes de piezas [1].

1.1 Características generales de los procesos de estampado incremental de chapas

En el EICH una fresadora convencional o CNC equipada con una herramienta sin filos, normalmente de punta esférica, va deformando localmente la chapa siguiendo una trayectoria que “dibuja” la forma final que se le quiere dar a la pieza sobre la chapa inicial. Ésta es sujeta en un marco, que puede ser móvil o fijo dependiendo del tipo de conformado que se quiera realizar [2].

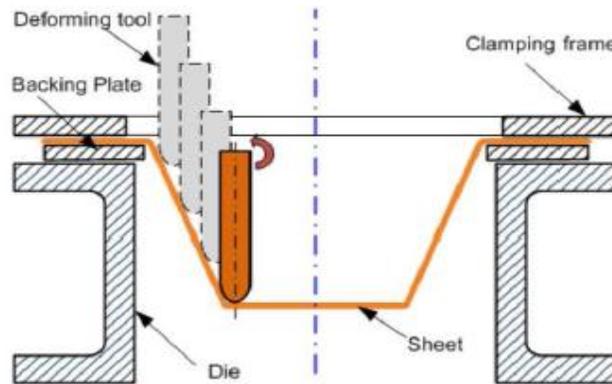


Figura 1.1. Proceso de estampado incremental de chapas [3]

Éste no es realmente un nuevo proceso de fabricación, pues en el estampado convencional existen otros procesos que pueden ser llamados estampado incremental. Un típico ejemplo es el de embutido en el que se efectúa el conformado de recortes de chapas hacia cuerpos huecos, llanos o profundos y de estos cuerpos hacia otras formas bajo el efecto fundamental de la fuerza de tracción [4].

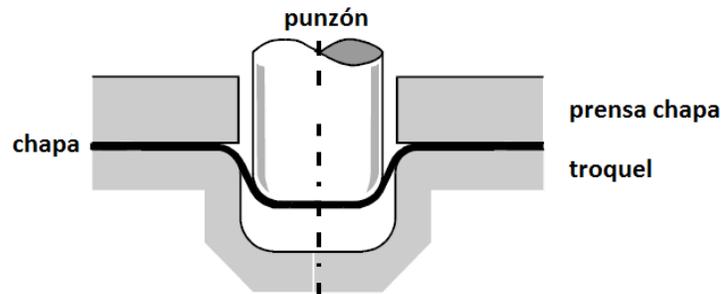


Figura 1.2. Esquema del embutido profundo [5]

La idea básica de las operaciones de conformado incremental es la obtención de una pieza con la forma deseada mediante una herramienta de pequeñas dimensiones cuyo movimiento sigue una trayectoria determinada por el usuario. Por tanto, ya no son necesarios punzones y matrices convencionales ya que la forma final de la pieza sólo depende de la trayectoria asignada a la herramienta y es obtenida al sumarse localmente las deformaciones plásticas inducidas por la herramienta a lo largo de su trayectoria [6].

Debido a la gran flexibilidad del EIC, se tornan viables sus aplicaciones a pequeños lotes de producción y también a lotes de piezas individuales ya que el costo de las herramientas

utilizadas en el proceso es menor que los costos de las normalmente utilizadas en los procesos de embutido tradicional [7].

El proceso de estampado incremental se puede utilizar para conformar todo tipo de metales, siempre y cuando sean lo suficientemente dúctiles. En la bibliografía se reportan piezas estampadas incrementalmente en aluminio, cobre, las diferentes variantes del acero y titanio, siendo también posible su aplicación en aleaciones especiales. El proceso es aplicable potencialmente en cualquier sector: automoción, aeronáutica, bienes de equipo, arte, etc [3].

Según las revisiones bibliográficas realizadas, se pueden resumir, a continuación, las características más importantes asociadas al EICH:

1. La conformabilidad en el estampado incremental por punto simple aumenta con la disminución en el tamaño de la herramienta así como el paso incremental vertical.
2. El coeficiente de anisotropía presenta una influencia marcada en la conformabilidad del material, se pueden lograr grandes deformaciones con herramientas de diámetro más pequeños en la dirección transversal.
3. La conformabilidad disminuye con el espesor de la chapa metálica.
4. Un paso incremental grande incrementa la rugosidad superficial.
5. Un aumento en el paso incremental vertical y el diámetro de la herramienta incrementa las fuerzas de conformación.
6. Existen limitaciones en el ángulo máximo a obtener en el proceso en una pasada, se recomienda la metodología de pasadas múltiples para la conformación de grandes ángulos.

Los valores a los que pueden llegar las deformaciones sin que se produzca la rotura o fractura de las piezas brutas se pueden conocer en los diagramas límites de conformado (véase la figura 1.3), estos diagramas consisten en la unión de un conjunto de puntos dados por las deformaciones principales que pueden ocurrir en el plano y son considerados como propiedades de los materiales y dependen también de los parámetros del proceso.

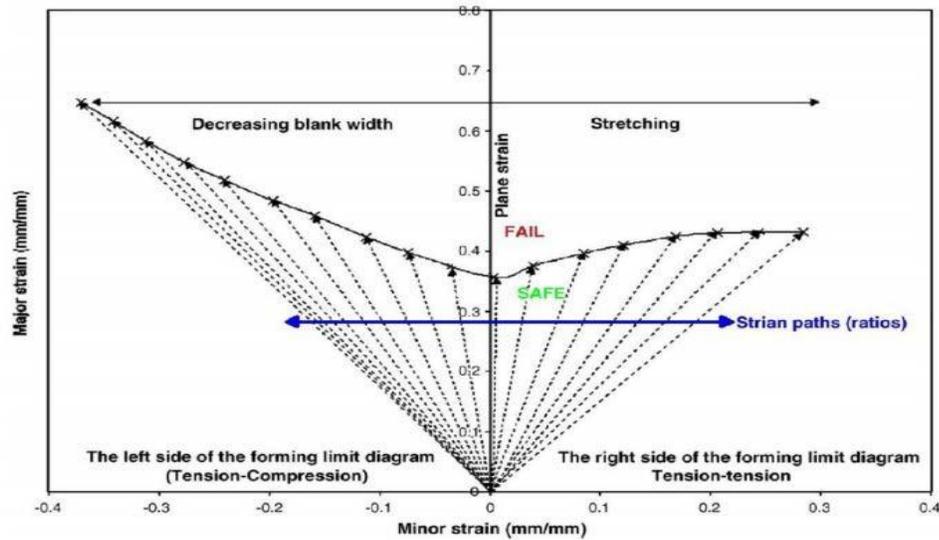


Figura 1.3. Representación esquemática del diagrama límite de conformado [6]

La figura 1.4 representa un gráfico donde se comparan las deformaciones que pueden lograrse en el proceso de estampado incremental y las obtenidas en un proceso de estampado tradicional. Como se puede observar hay una gran diferencia entre ambos procesos debido a la peculiaridad de los procesos mecánicos que ocurren en el estampado incremental; esa diferencia está dada porque la deformación plástica inducida por la herramienta es muy localizada y está confinada en el área de contacto vecino y va progresando incrementalmente con la trayectoria asignada a la herramienta por el usuario. Como resultado se alcanzan entonces mayores deformaciones en el material antes que se produzca la rotura del mismo.

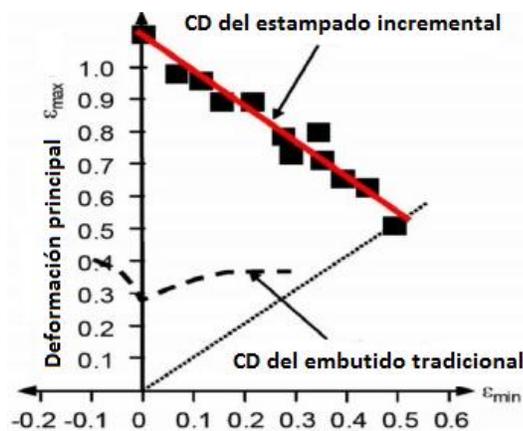


Figura 1.4. Curva de deformación del EICH vs Estampado convencional [6]

Mediante la búsqueda bibliográfica realizada sobre el proceso de estampado incremental se conoció que el mismo tiene variantes tecnológicas: el estampado incremental negativo sin matriz, también conocido como estampado incremental por punto simple; el estampado incremental positivo sin matriz, que también es llamado como estampado incremental de dos puntos; y por último el estampado incremental positivo y negativo con matriz.

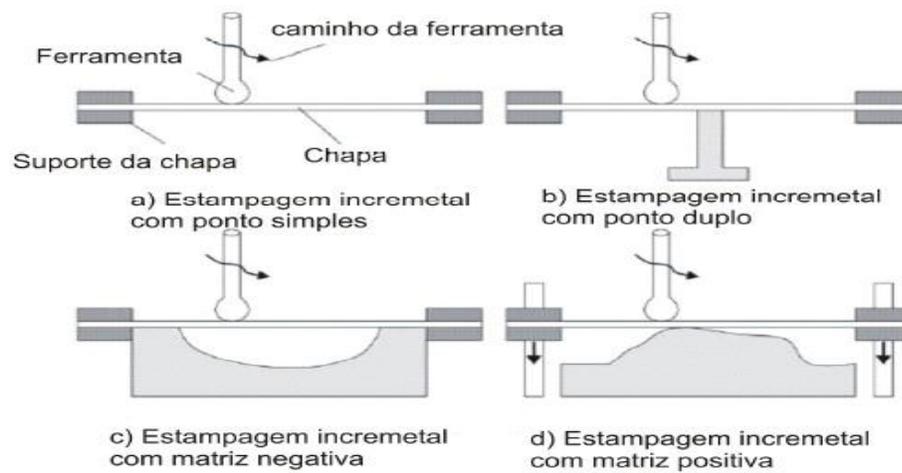


Figura 1.5. Variantes tecnológicas de EICH [3]

Mediante un análisis de los resultados se comprobó que variando la inclinación de la chapa a lo largo de la profundidad se logra una mayor capacidad de estampado que si se utiliza una inclinación constante. Hasta el momento se han conseguido para chapas de 1 mm de espesor paredes con ángulos de 80° en aluminio y de 70° en acero inoxidable, y se está trabajando en el desarrollo de estrategias que permitan alcanzar valores de 90° . En cuanto a los espesores de chapa, los valores máximos dependen fundamentalmente en las prestaciones de la máquina herramienta utilizada. Se han llegado a conformar con buena calidad espesores de 2,5 mm en aluminio y de 2 mm en acero inoxidable [4].

El estampado incremental por punto simple

Debido a la gran flexibilidad del estampado incremental de punto simple (SPIF- single point incremental forming), se toma como viable su aplicación a pequeños lotes de producción y así mismo a lotes de piezas individuales, ya que el costo de herramientas utilizadas en el proceso es mucho menor que el normalmente utilizado en los procesos de

estampado tradicional. Considerando que el estampado puede ser realizado con matriz bastante simplificada o sin matriz, con apenas una herramienta de conformación, el proceso se torna también viable para prototipados rápidos para materiales no metálicos y también para trabajos artísticos [7].

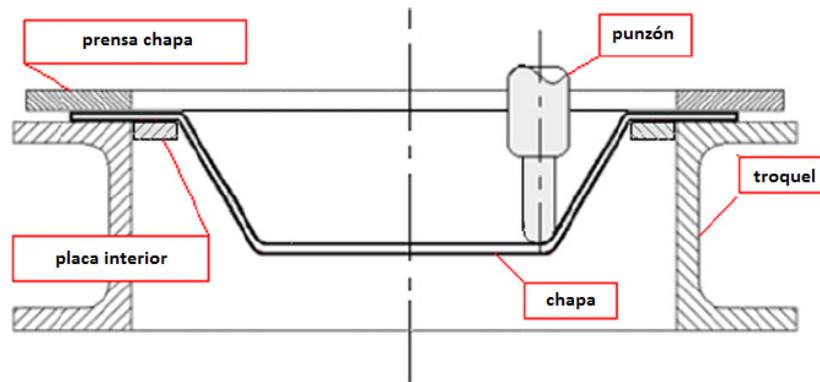


Figura 1.6. Estampado incremental por punto simple [7]

El proceso de estampado incremental con punto simple, se basa en la conformación de una chapa, el cual depende del tipo de material y sus características mecánicas. Esta chapa es puesta en un dispositivo móvil, deslizándose paralelamente en el eje z de un sistema CNC (eje vertical), el elemento de fijación evita el movimiento de la chapa mientras se está realizando el proceso de estampado, creando así una deformación plástica en la chapa, esa deformación plástica es generada por una herramienta rotatoria que se encuentra acoplada al husillo de una fresadora o centro de mecanizado CNC, que inicia el proceso de estampación de la chapa deslizándose sobre su superficie deformándola gradualmente[4, 7].

El estampado incremental de dos puntos (partial die)

En este proceso el uso de un troquel parcial tiene la misma función que la placa de apoyo utilizada en el proceso de estampado incremental por punto simple, apoyando solamente áreas esenciales de la chapa y también mejorando su exactitud geométrica. Con geometrías no uniformes el mismo troquel parcial puede ser utilizado para obtener diferentes piezas con geometrías similares [8].

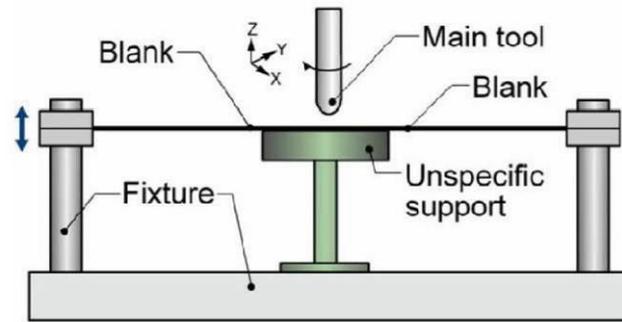


Figura 1.7. Esquema del estampado incremental de dos puntos (partial die) [8]

El estampado incremental de dos puntos (full die)

Esta variante del proceso tiene la ventaja de la buena exactitud geométrica que se alcanzan en las piezas, porque la chapa durante la conformación es presionada por la herramienta y el troquel [2, 4, 6, 8].

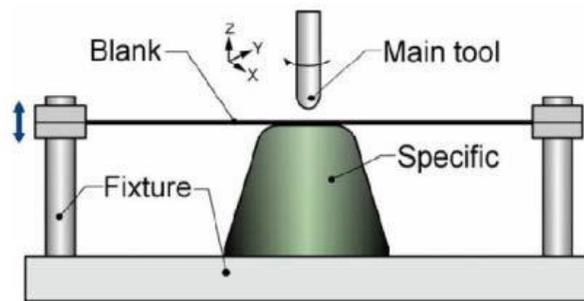


Figura 1.8. Estampado incremental de dos puntos (full die) [8]

Como desventaja el costo de este proceso es mayor debido a los costos asociados al material del troquel y su fabricación. Otra desventaja es la baja flexibilidad que presenta el proceso debido a la necesidad de troquel para cada pieza en específico [8].

El estampado incremental con múltiples puntos o de punto doble es denominado así debido a que tiene dos puntos de contacto entre la herramienta de conformado y la chapa. En este proceso la chapa es sujeta por el prensa-chapa el cual se fija en el eje Z. La herramienta de conformación es similar a la herramienta utilizada en el proceso de estampado incremental por punto simple y describe una trayectoria por la superficie externa de la pieza, desde la parte superior hasta la parte inferior de la geometría.

1.2 Posibilidad de introducción de la tecnología de estampado incremental en las condiciones de Cuba

Como todo proceso tecnológico novedoso cuando se quiere introducir en un país es necesario estudiar las aplicaciones que tiene, los tipos de piezas que se pudieran obtener con él, las ventajas y desventajas que presenta, máquinas herramientas que se emplean, y para todo ello es que se realiza este epígrafe.

1.2.1 Aplicaciones industriales del proceso de EICH

Después de conocer las variantes tecnológicas del proceso de EICH se sabe que permiten la fabricación de piezas con formas características en pequeñas cantidades con cambios constantes en su geometría en cortos períodos de tiempo desde el diseño hasta la fabricación, posibilitando así flexibilidad y economía ya que en él se utilizan herramientas simples si se compara con el estampado convencional. A continuación diferentes aplicaciones según [6-7, 9]:

Industria Automovilística: en la fabricación de chapas de automóviles (interiores y exteriores). La ventaja en este caso sería la gran flexibilidad de alteración del diseño y el costo básico, ya que no sería necesaria la producción con nuevos moldes.



Figura 1.9. Aplicaciones recientes en la industria automovilística [2, 10]

Piezas de repuesto: la fabricación de piezas de repuesto, en situaciones en las que el fabricante original ya no hace parte de ella o no tiene las herramientas de estampado convencional disponible. Un ejemplo típico es la fabricación de piezas para vehículos más antiguos.



Figura 1.10. Elaboración de piezas de repuesto [3]

Industria mobiliaria: en la fabricación de muebles de acero con formas redondas, de difícil producción comercial, debido a su costo.

Utensilios domésticos de pequeño porte: en objetos metálicos de espesor fino y forma geométrica compleja.

Pequeños lotes: la producción de pequeños lotes por el método de impresión convencional requiere la fabricación de la herramienta que se utiliza en una prensa. Por lo tanto, el costo final de cada parte del lote será alto debido a la distribución del coste de fabricación de las herramientas. Como el proceso EICh presenta un costo herramental bajo, el precio unitario de cada pieza es significativamente menor.

Industria médica: en la fabricación de prótesis metálicas para sustituir partes de huesos perdidos en accidentes.

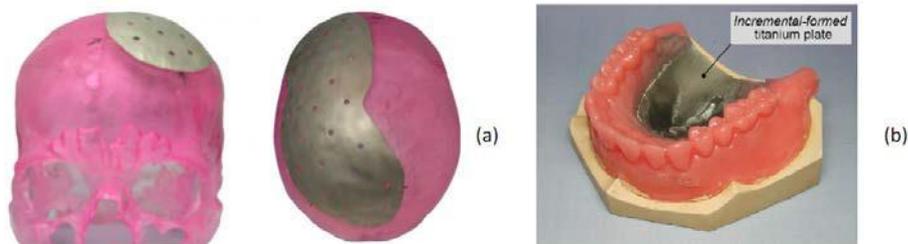


Figura 1. 11. Elaboración de piezas personalizadas en la medicina. a) Prótesis craneal; b) Prótesis dental. [8]

Piezas decorativas: en la fabricación de piezas exclusivas que son muy utilizadas en el campo artístico. También constituye una importante aplicación comercial del proceso de

estampado incremental en la restauración de antigüedades. También pueden ser reproducidas obras de arte y objetos decorativos.

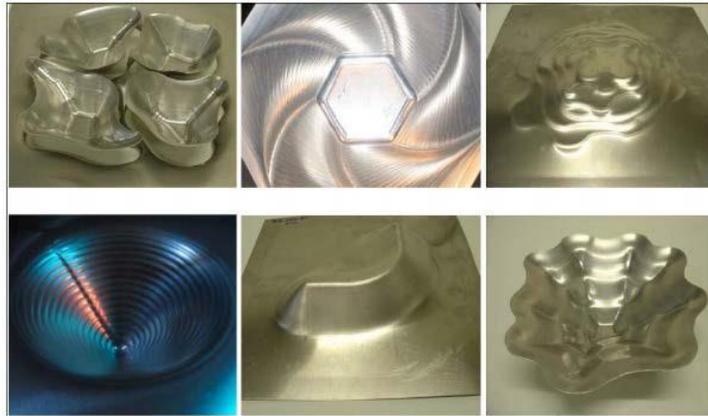


Figura 1.12. Piezas decorativas obtenidas por el EICH [11]

1.2.2 Máquinas herramientas empleadas en el proceso

El principal requisito para la ejecución del estampado incremental es que debe ser controlado numéricamente y tener al mínimo tres ejes de comandos. Aunque existan fabricantes de equipamiento específico para este proceso, como presenta la figura 1.13, la utilización del centro de mecanizado (observar figura 1.14) o fresadoras *CNC* posibilitan el empleo de esta técnica en la mayoría de las industrias actualizadas tecnológicamente [12]. Otras tecnologías del proceso utilizan fresadoras convencionales sin comandos *CNC*.



Figura 1.13. Máquina herramienta diseñada y construida para el EICH [13]



Figura 1.14. Centro mecanizado utilizado en el proceso [14]

El Control Numérico Computacional es el control de una máquina herramienta usando números y letras. Es un sistema en el cual los valores numéricos programados son directamente insertados y almacenados en alguna forma de medio de entrada, y automáticamente leídos y decodificados para provocar el movimiento correspondiente en la máquina que se está controlando [9].

La gran ventaja en la utilización de un centro de mecanizado para aplicaciones de estampado incremental es que la misma máquina es utilizada para fabricación de herramientas utilizadas en el proceso [12].

1.2.3 Principales ventajas y desventajas de EICH

Ventajas del EICH

Este proceso gracias a las ventajas que presenta es una gran alternativa para el conformado en nuestro país. Su velocidad de producción no es tan alta como los ya existentes; pero las ventajas que ofrece, como la alta flexibilidad, el bajo costo de las herramientas y el alto grado de deformación alcanzado en el estado de deformación plana lo hace rentable para la fabricación de pequeños lotes para varias aplicaciones. Se pueden citar las siguientes ventajas concretas [14]:

1. Producciones de partes directamente de ficheros CAD.
2. Incrementos en la conformabilidad del material.
3. Línea de producción flexible, sujeto a constantes cambios.

4. Prototipado rápido: utilizando EI resulta un proceso económico.
5. Este método produce grandes regiones con una deformación homogénea y evita grandes gradientes de tensión y de deformación.
6. Pueden ser realizados en máquinas convencionales de CNC.
7. Debido a la naturaleza incremental del proceso las fuerzas son menores.
8. Las dimensiones de las partes son solamente limitadas por la herramienta de conformar.
9. Se alcanza una elevada calidad superficial de la pieza.

Desventajas del EICH

Como todo proceso tecnológico existente, sigue siendo un proceso que necesita ser estudiado con mayor detenimiento. Existen varios estudios relacionados con este tipo de procesos, pero aún no se ha alcanzado su completo entendimiento. Por lo que también presenta una serie de limitaciones las cuales se presentan a continuación:

1. Gran tiempo de conformación comparado con los procesos convencionales de estampado.
2. El proceso está limitado a producciones pequeñas.
3. La conformación de grandes ángulos tiene que ser realizada en múltiples pasos.
4. Menos exactitud geométrica, particularmente en radios convexos y áreas de superficies curvas.

Esta última desventaja puede ser reducida utilizando diferentes estrategias en el recorrido de la herramienta o alterando otros parámetros del proceso como el tamaño o la velocidad de la herramienta, variando el incremento vertical o variando el lubricante utilizado [15].

1.2.4 Posibilidades de introducción del EICH en la industria

Una vez estudiadas las variantes del proceso, así como sus características fundamentales, las aplicaciones industriales, máquinas herramientas utilizadas en el proceso, ventajas y desventajas del mismo, se está en condiciones de analizar las posibilidades que existen

para introducirlo en nuestro país. A continuación se analizan los requisitos expuestos por [12] que son de gran importancia:

1. Debe existir un debido conocimiento tanto científico como técnico del proceso (conocer sus ventajas, desventajas, alcance, etc.).
2. Debe existir una adecuada preparación del personal técnico debido a la novedad del proceso en nuestro país.
3. La tecnología tiene la necesidad de un equipamiento en lo referente a máquinas herramientas para su implementación. Esta requiere de una máquina-herramienta CNC, ya sea una fresadora o alguna máquina en específico, vale aclarar que no todos los talleres de las industrias cubanas cuentan con máquinas-herramientas de este tipo.
4. Se debe tener en cuenta el diseño de una herramienta adecuada (punzón) capaz de llevar a cabo este proceso.
5. Se debe contar con software capaces de diseñar la pieza y de generar la trayectoria de la herramienta de conformación (Tecnología CAD/CAM).
6. Tener en cuenta el tipo de producción, ya que la tecnología es rentable en producción de pequeños lotes de piezas y prototipos.

1.3 Técnicas de optimización usadas en los procesos de conformado

En este epígrafe se realizará una revisión bibliográfica sobre las más modernas tecnologías que se utilizan en el mundo de las grandes empresas de procesos y manufactura, las cuales utilizan técnicas para lograr altos índices de rendimiento y óptimos diseños de piezas, logrando con estas avanzadas técnicas bajos costos de fabricación.

Podría decirse que hay dos tipos de problemas: unos con solución conocida, y otros de solución desconocida. Los primeros pueden resolverse en base a información que se encuentra en libros, revistas técnicas, o lograrse basándose en el conocimiento de expertos dentro del área. En tales casos, la solución sigue un camino convencional: A partir de la solución estándar desarrollada para este tipo de problema, el ingeniero, simplemente por cálculo, desarrolla una solución particular adaptada al problema

específico. Puede decirse que esta es una vía de solución inercial, afincada en la experiencia existente [16].

Pero, en ciertos casos, con apropiado estudio del problema y de las soluciones existentes, es posible desarrollar pequeñas mejoras, y excepcionalmente mejoras importantes. En estos casos, se busca aprovechando otros principios, producir un cambio mayor en la solución. En este camino el ingeniero aporta en mayor o menor medida una dosis de creatividad en la solución de los problemas por medio de la optimización [16].

Cuando se va a realizar una optimización, solo puede hablarse de solución, si se da cumplimiento al requerimiento o especificación, o al conjunto de objetivos fijados para el diseño. Surgen así los dos aspectos que siempre deben ser considerados según [16]:

1. **1. Criterios de optimización:** características, condición o regla a satisfacer, la cual puede ser de carácter puramente técnico o económico, aunque usualmente los dos aspectos interactúan entre sí. En el aspecto técnico se considera englobado todo lo que hace a la prestación operativa. En el aspecto económico está todo lo que tienda a formar el costo: tecnologías, componentes, procesos, controles, etc.
2. **2. Variables del sistema:** las cuáles pueden ser divididas en dos categorías:
 - a) **a) Variables dependientes,** cuando están asociadas directamente al cumplimiento de una especificación;
 - b) **b) Variables independientes,** cuando pueden ser establecidas para ajustarse a los criterios de diseño.

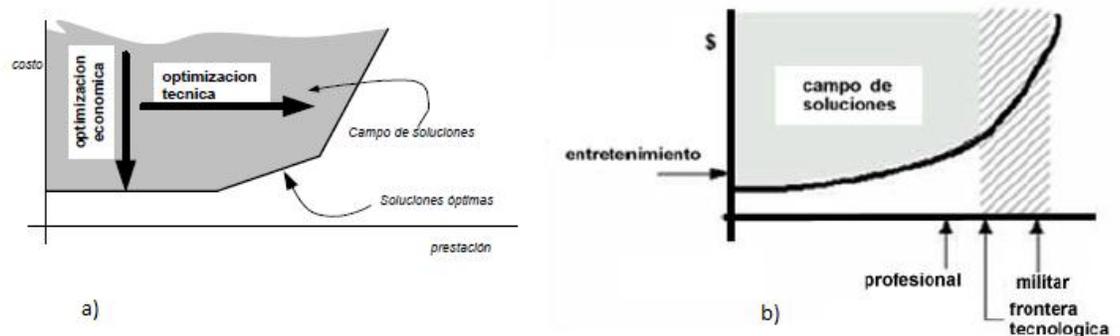


Figura 1.15. Gráficas de costo vs prestación. a) Optimización económica. b) Campo de soluciones. [16]

Tal como se muestra en la figura 1.15, en la solución de los problemas se llega siempre a un compromiso entre los aspectos económicos y el técnico, que no es única. Existirá siempre la posibilidad de cumplir una misma prestación con distintos esfuerzos económicos. Es claro luego que, para una prestación dada, una sola de las soluciones será óptima (la de menor esfuerzo económico). Esta curva es solo una idealización; por un lado, debe verse como algo muy dinámico: lo que es óptimo en un momento puede no serlo en otro, porque el costo relativo entre los componentes cambia, porque aparecen nuevos componentes, o nuevas tecnologías y procesos, etc., y por otro lado lo que es óptimo en un país puede no serlo en otro. Influyen en ello la estructura productiva propia de cada país, su idiosincrasia, sus regulaciones, impuestos, barreras aduaneras, etc. Por ello la curva solo sirve para materializar un concepto.

Los problemas de optimización según [16] son de dos tipos:

- **Problemas de criterio simple:** El objetivo es minimizar o maximizar una sola función objetivo.
- **Problemas multicriterios:** El objetivo es minimizar o maximizar más de una función objetivo en forma simultánea.

La inteligencia artificial (IA) según la información especializada, en su sentido más simple, mostraría la capacidad de un equipo de realizar las mismas funciones que caracterizan al pensamiento humano. El término fue definido en 1956 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Estableciéndose las bases de Inteligencia Artificial (IA) como campo independiente dentro de la información.

Este término se ha aplicado a programas y sistemas 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 van desde la industria de los juegos hasta las cadenas de producción de múltiples industrias. Se han desarrollado múltiples tecnologías y técnicas en la rama de la IA por la necesidad de darle solución a variados problemas de la vida

cotidiana, los cuales tienen soluciones que por los métodos tradicionales se hacen casi imposibles de realizar o su solución incurre en costos significativos. A continuación, las técnicas por [17-19].

1.3.1 Redes neuronales artificiales (RNA)

a) 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 [17-18].

b) Funcionamiento de las redes neuronales artificiales

Las *redes neuronales* consisten en una simulación de las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales (como un circuito integrado, un ordenador o un conjunto de válvulas). El objetivo es conseguir que las máquinas den respuestas similares a las que son capaces de dar el cerebro, que se caracterizan por su generalización y su robustez.

Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones según [17-18]:

1. Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en la sumatoria de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina *excitatoria*; si es negativo, se denomina *inhibitoria*.
2. Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
3. Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son

la función sigmoidea (para obtener valores en el intervalo $[0,1]$) y la tangente hiperbólica (para obtener valores en el intervalo $[-1,1]$).

A la capa de entrada se le presenta un patrón inicial, donde hay nodos que se estimulan y transmiten una señal a la capa siguiente. Si la suma de todas las entradas que entran en una de las neuronas virtuales es mayor que el umbral de activación de la neurona, esa neurona se activa, y transmite su propia señal a las neuronas de la siguiente capa. (Figura 1.16) [17-18].

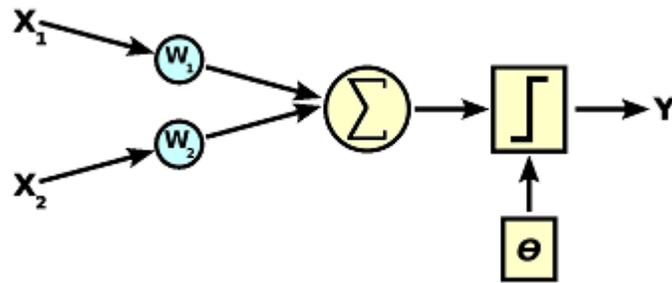


Figura 1.116. Perceptrón con dos entradas [18]

El patrón de activación 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 biológico, 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 [17-18].

c)Diseño y programación de una RNA

Con un paradigma convencional de programación en ingeniería del software, el objetivo del programador es modelar matemáticamente (con distintos grados de formalismo) el problema en cuestión y posteriormente formular una solución (programa) mediante un algoritmo codificado que tenga una serie de propiedades que permitan resolver dicho problema. En contraposición, la aproximación basada en las RNA parte de un conjunto de datos de entrada suficientemente significativo y el objetivo es conseguir que la red aprenda

automáticamente las propiedades deseadas. En este sentido, el diseño de la red tiene menos que ver con cuestiones como los flujos de datos y la detección de condiciones, y más que ver con cuestiones tales como la selección del modelo de red, la de las variables a incorporar y el pre procesamiento de la información que formará el conjunto de entrenamiento. Asimismo, el proceso por el que los parámetros de la red se adecuan a la resolución de cada problema no se denomina genéricamente programación sino que se suele denominar entrenamiento neuronal [17-18].

1.3.2 Algoritmos genéticos

Los *algoritmos genéticos* (AG) 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. Un AG es un método de programación con el objetivo de buscar dentro de un espacio de hipotéticas candidatas la mejor de ellas, que imita a la evolución biológica como estrategia para resolver problemas [17-18].

a)Funcionamiento de los Algoritmos genéticos

Dado un determinado problema a resolver, la entrada del AG es un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, las cuales se codifican, y la función de aptitud la cual permite evaluar cuantitativamente a cada candidata, las cuales pueden ser soluciones que ya se sabe que funcionan, con el objetivo de que este obtenga las mejores candidatas, pero se suelen generar aleatoriamente [18, 20-23].

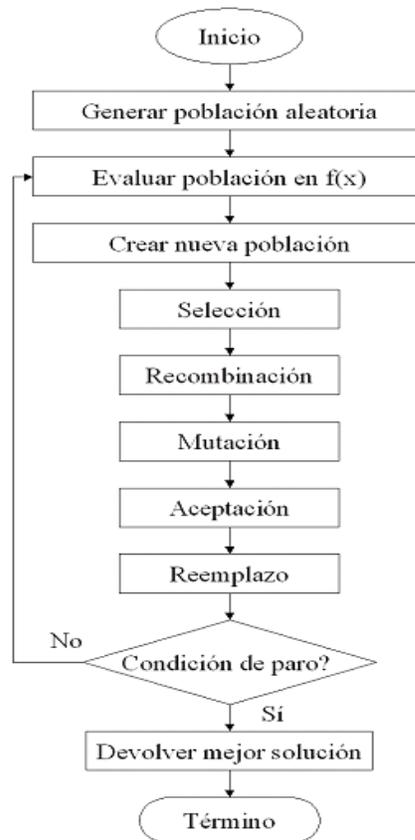


Figura 1.17. Diagrama de flujo de un algoritmo genético [18, 20]

El AG evaluará a cada candidata según su función de aptitud donde en un grupo de ellas generadas aleatoriamente, la mayoría pueden no funcionar y serán eliminadas. De lo contrario, por puro azar, unas pocas pueden ser prometedoras para la solución del problema. Estas últimas se reproducirán y se realizarán múltiples copias de ellas, pero las mismas no son perfectas, introduciéndose cambios aleatorios durante el proceso de copia. Después, esta descendencia digital prosigue con la siguiente generación, formando un nuevo conjunto de soluciones candidatas, y se someten a una ronda de evaluación de aptitud y se realiza el mismo proceso con las expectativas de 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 las mejores soluciones del problema.

b) Métodos de selección

Un Algoritmo Genético puede utilizar muchas técnicas diferentes para seleccionar a los individuos que deben copiarse hacia la siguiente generación algunos de los cuales son según [18, 20-23]:

Selección elitista: garantiza la selección de los miembros más aptos de cada generación. Selección proporcional a la aptitud: de los individuos más aptos los cuales 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 es útil 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.

c) Métodos de cambio

Según [18, 20-23], existen tres métodos de cambio: selección, cruce y mutación, los cuales consisten en:

Selección: es el mecanismo por el cual las soluciones más próximas al óptimo tienen mayor probabilidad de sobrevivir y ser elegidos para reproducirse. Después de la selección de los más aptos deben ser alterados aleatoriamente para mejorar su aptitud en la próxima generación. Este proceso se logra mediante dos estrategias básicas. La primera es la mutación.

Mutación: La mutación al igual que en los seres vivos cambia un gen por otro, una mutación en un AG 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 realiza la recombinación de la misma forma que se realiza en los cromosomas durante la reproducción sexual. Entre las formas comunes de cruzamiento tenemos el cruzamiento en un punto, el cual consiste en un intercambio en un punto aleatorio del genoma de los dos individuos, y uno de los individuos contribuye con todo su código anterior a ese punto y el otro individuo contribuye todo su código a partir de ese punto para producir una descendencia. También tenemos el cruzamiento uniforme, el cual consiste en que la posición del valor del genoma dado de la descendencia corresponde con el valor en esa posición del genoma de uno de los progenitores o al valor en esa posición del genoma del otro progenitor, elegido con un 50% de probabilidad.

1.3.3 Otras técnicas de inteligencia

Colonia de hormigas

El sistema de optimización de colonia de hormigas (ant colony optimization o ACO) 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 [18, 24-25].

Las primeras hormigas que son la que realizan el primer camino no saben a ciencia cierta el lugar hacia donde van toman el camino más largo pero las que le siguen son capaces de tomar caminos más cortos y entonces la mayoría de las hormigas toman ese último camino aumentando la concentración de feromonas. 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 [18, 24-25].

Sistemas expertos

Los *sistemas expertos* tradicionales intentan reproducir el razonamiento humano de forma simbólica. Es un programa de aplicación informática que toma decisiones o resuelve problemas de un campo determinado, como sistemas de producción, las finanzas o la medicina, utilizando los conocimientos y las reglas analíticas definidas por los expertos en dicho campo [17-18].

Dichos expertos le dan soluciones a los problemas utilizando una combinación de conocimientos basados en hechos y en su capacidad de razonamiento. En los sistemas expertos, estos dos factores básicos están contenidos en componentes separados, pero 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 le permiten al sistema experto extraer conclusiones [17-18].

Estos sistemas facilitan el uso de herramientas adicionales en forma de interfaces de usuario y mecanismos de explicación. Las interfaces de usuario, le permiten al usuario

desarrollar consultas, proporcionar información e interactuar de variadas formas con el sistema.

Lógica difusa

La *lógica difusa* es un método de proceder similar al razonamiento humano. Estos sistemas de lógica difusa son una mejora a los sistemas experto tradicionales, en el sentido de que permiten utilizar lenguaje humano razonando de forma similar a los seres humanos [17-18].

Recocido simulado

Este método toma 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 una red cristalina más estable y regular.

En el recocido simulado, como en los AG, existe una función de aptitud que define un paisaje adaptativo; en lugar de una población de candidatas como en los 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.

Después, 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 cambios significativos en la aptitud, y se utilizan como base para la siguiente ronda del algoritmo. Al disminuir la temperatura, el algoritmo se hace más propenso a aceptar nada más los cambios que aumentan la aptitud. Al finalizar 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 [17-18].

1.4 Conclusiones del capítulo

- El proceso de EIC se puede poner en marcha en nuestro país puesto que en determinadas empresas existen los software (MATLAB, GibbsCAM, Inventor y

Solidworks) y máquinas necesarias; además de ello, la revisión bibliográfica destaca que es más económico para la producción de pequeñas series de piezas y prototipos que el embutido tradicional.

- En esta tecnología, dado el mecanismo de deformación incremental de embutición pueden alcanzarse mayores deformaciones en las chapas que en los procesos tradicionales de embutición.
- Las herramientas de optimización pueden solucionar problemas en este proceso tales como el tiempo de conformación, el ángulo de conformado, el espesor de la chapa inicial y la fuerza de conformación.

CAPÍTULO 2. Aspectos tecnológicos del proceso de estampado incremental por punto simple y metodología analítica para calcular la fuerza de conformado

2.1 Factores tecnológicos críticos que deciden sobre el estampado incremental por punto simple y sus limitaciones

Como en cualquier proceso de fabricación, existen algunos parámetros y variables que resultan de interés estudiarlos para luego controlarlos durante el proceso y garantizar plenamente la productividad, este es un paso importante porque de ellos depende la productividad del proceso y que las piezas cumplan con la calidad necesaria. A continuación se conocerán cuáles son estos parámetros y su influencia en el proceso según la bibliografía existente acerca del tema.

2.1.1 Diámetro de la herramienta

El diámetro de la herramienta para conformar utilizada en el proceso determina la calidad superficial de la pieza fabricada y también el tiempo de fabricación. Cuanto mayor sea el diámetro de la herramienta mejor será la calidad superficial de la pieza obtenida para un mismo valor del paso vertical [26].

Diversas pesquisas fueron realizadas por [26] con herramientas de varios diámetros; en la tabla 2.1 se muestran las herramientas utilizadas.

Tabla 2.1. *Diámetros de herramientas propuestos por algunos investigadores [26]*

Investigadores	Diámetro de herramienta	Forma de la herramienta
Ambrógio, 2006	10 y 20	Semiesférica
Duflou, 2007	10	Semiesférica
Allwood, 2005	10; 20 y 30	Semiesférica
Hirt, 2003	6; 10 y 30	Semiesférica
Duflou, 2005	12,7	Semiesférica
Ambrógio, 2007	12 y 24	Semiesférica
Carrino, 2004	5 y 10	Semiesférica
Pohlak, 2004	12 y 20	Semiesférica
Lamminem, 2003	10 y 20	Semiesférica
Jeswiet, 2005	12,5	Semiesférica
Kim y Park, 2002	5; 10 y 15	Semiesférica

Los autores de [14] coinciden con [26] en que el diámetro de la herramienta influyen en el tiempo de conformación y la calidad superficial de la pieza obtenida y aseguran que esto se debe a la fricción que aumenta o disminuye a medida que aumentamos o disminuimos los diámetros de la herramienta respectivamente. Los diámetros más comunes usados por estos autores en el proceso para conformar aceros inoxidables son 12 y 12,5 mm.



Figura 2.1. Herramientas de carburo cementado utilizadas en el EIPS [14]

En la figura 2.2 se muestran herramientas obtenidas de aceros de alta dureza y tratadas térmicamente hasta obtener una dureza de 64 HRC; estas herramientas son recomendadas por [8] y los diámetros de las mismas son 50, 30, 20, 12 y 8 mm en el mismo orden que se muestran.



Figura 2.2. Herramientas obtenidas de aceros de alta dureza [8]

Según [27] con relación a la herramienta de estampado, es necesario definir su diámetro, formato y material, ya que un menor diámetro de la misma va a estar relacionado con un menor radio existente en la pieza conformada. La combinación de estos datos interfiere en el tiempo de manufactura, acabado superficial y las limitaciones geométricas del producto final.

El autor [28] realizó estudios conformando chapas de Al 99.5 y espesor de 1,5 mm con herramientas de diámetros 5 y 15 mm. Obtuvo como resultado que cuando aumentaba el diámetro de las herramientas la rugosidad superficial disminuyó considerablemente.

También [29] está de acuerdo con los planteamientos anteriores y agrega además que cuando aumentamos los radios de las herramientas, aumenta con ellos la fuerza de

conformado dando lugar al crecimiento de las temperaturas por la fricción, estas altas temperaturas en cierto punto pueden provocar la rotura de la pieza por lo que la selección del diámetro de la herramienta es un paso importante del proceso.

Queda demostrado entonces que las herramientas más pequeñas (menores diámetros) logran niveles de deformación más altos que las más grandes. Estas tienen una zona de deformación altamente concentrada experimentando grandes deformaciones para mejorar la conformabilidad del material.

2.1.2 Influencia del incremento vertical

El incremento vertical o paso vertical en el estampado incremental afecta principalmente dos factores del proceso: la calidad superficial y el tiempo de conformación.

Pequeños incrementos verticales favorecen el acabado superficial de las piezas conformadas, pero aumentan significativamente los tiempos de conformación [26]. En una investigación realizada por [4] se observó que en cada incremento del paso vertical la herramienta deja una pequeña marca en la superficie de la pieza, esta marca puede ser reducida disminuyendo el valor del incremento vertical.

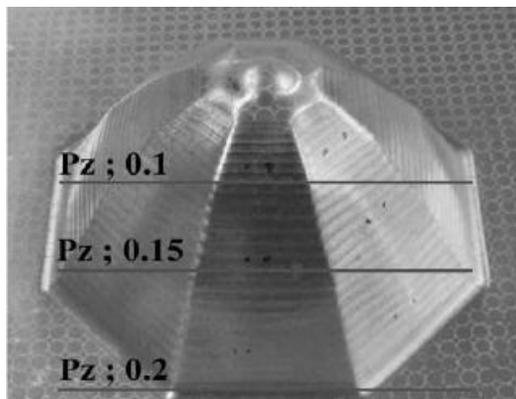


Figura 2.3. Marcas que surgen con el incremento vertical [30]

En el año 2005 [3] realizó una investigación para evaluar la influencia del incremento vertical en el proceso de estampado incremental. En la pesquisa fueron ensayados pasos verticales de 0,1 a 1 mm con herramientas de 5 y 15 mm de diámetro. En ella se verificó que el aumento del paso vertical reduce la calidad superficial y esto se puede observar en la figura 2.3.

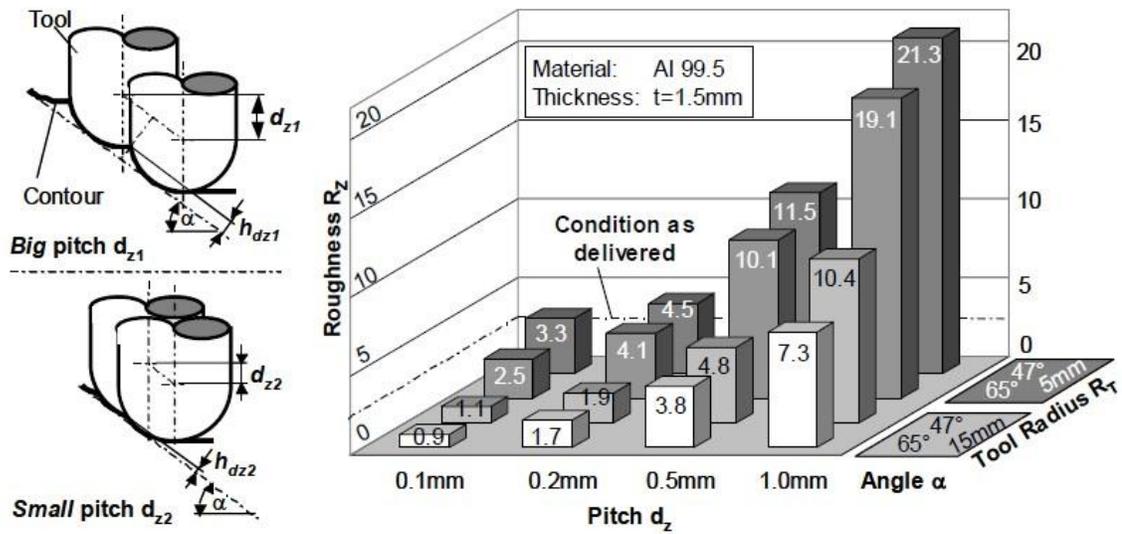


Figura 2.4. Rugosidad bajo condiciones estándares de EICH [4, 28]

Mediante un análisis realizado a la figura anterior se puede observar que la calidad superficial de la pieza aumenta con un incremento vertical decreciente y con diámetros de herramientas crecientes, es decir, si disminuimos el incremento vertical mejoramos la calidad superficial del producto final.

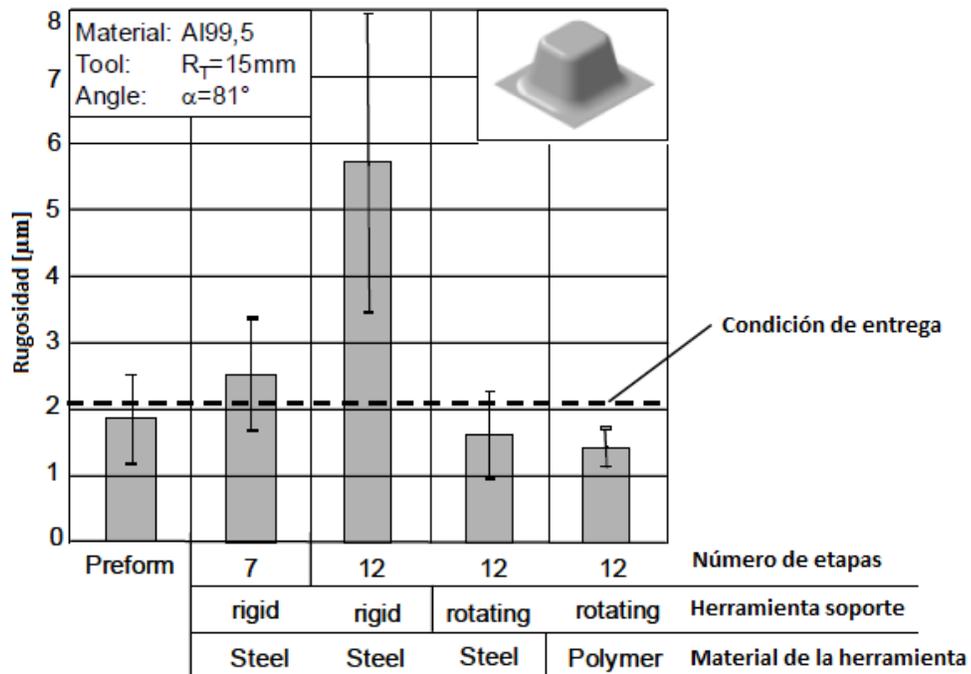


Figura 2.5. Proceso multietapas con herramienta de fijación rígida y rotando [28]

El autor [28] está de acuerdo con lo antes expuesto pero realizó experimentos diferentes; su investigación consiste en obtener piezas en varias etapas, o sea, con varios incrementos verticales y también haciendo girar la herramienta soporte. Los resultados obtenidos están mostrados en la figura 2.5. La chapa metálica llega con una rugosidad superficial al taller, se realizaron cuatro pruebas con 7 y 12 etapas (incrementos verticales), dos pruebas con la herramienta soporte fija y dos más con la herramienta soporte girando. En las dos pruebas con el soporte rígido se utilizaron herramientas de acero e incrementos verticales de 7 y 12, se puede observar en la figura que la prueba de mayor número de etapas resultó tener menor calidad superficial que la de menores etapas de fabricación; mientras que en las pruebas con el soporte que rota se obtuvieron piezas en 12 etapas y la calidad superficial de las piezas mejoró significativamente por lo que es un método nuevo a tener en cuenta en la ejecución de este proceso.

2.1.3 Material de la chapa

Es conocido que la propiedad de conformabilidad difiere entre los materiales y que está influenciada por las propiedades de cada material. Sobre esta propiedad influye también el coeficiente de endurecimiento n , así como su relación con el coeficiente de plasticidad K . Generalmente un alto coeficiente de endurecimiento conlleva a una alta conformabilidad del material [29].

$$\sigma = K * \varepsilon^n \text{ en MPa} \quad (2.1)$$

Donde σ representa la resistencia a la conformación o la tensión verdadera como suelen llamarle en algunas bibliografías, los parámetros K , n y ε se conocen como la constante de plasticidad, el coeficiente de endurecimiento y el grado de conformación respectivamente; esta ecuación es válida mientras el material se deforma sin un cambio apreciable de volumen.

El exponente n es una propiedad relacionada con la capacidad de estiramiento de un metal durante un proceso de conformado. Mientras más grande es este valor menor es la tendencia del material a causar deformaciones localizadas, lo que posibilita un mejor conformado. Según [31] también brinda una medida del incremento de la resistencia del

material debido a la deformación plástica; los valores de n para metales dúctiles a temperatura ambiente varían generalmente entre 0,02 y 0,5.

Por tanto el coeficiente de endurecimiento del material afecta en el proceso: la fuerza de conformado, el tiempo de conformado y el tipo de pieza que se pueda obtener.

2.1.4 Espesor de las chapas

Tanto en el EICh como en otros procesos de conformado existen valores máximos de ángulos que definen ciertas regiones de la pieza de trabajo, con el fin de que sea posible su fabricación. Si llegara a superarse este valor se vuelve muy frecuente la rotura de las chapas o en el mínimo de los casos la disminución brusca del espesor de la chapa, causando una baja resistencia mecánica localizada [14, 29].

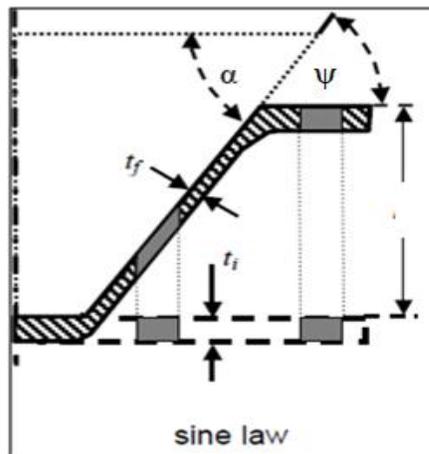


Figura 2.6. Ley de los senos aplicada al proceso[14]

De la figura anterior se puede obtener el espesor final t_f de la pieza partiendo siempre del ángulo de conformado ψ y del espesor inicial t_i de la chapa aplicando la ley de los senos y quedaría de la siguiente forma:

$$t_f = t_i * \text{sen } \psi \text{ en mm} \quad (2.2)$$

2.1.5 Ángulo de conformación

El ángulo de conformación es el ángulo de la zona de la chapa que es conformada con la horizontal (plano x-y). Es conocido que el comportamiento a la máxima conformabilidad de un material en el estampado incremental de chapas puede estar descrito por el valor

máximo del ángulo de conformado $\psi_{\text{máx}}$ [32]; cuando aumentamos el ángulo el espesor se reduce y se puede llegar a un espesor mínimo en el que ocurre la rotura como consecuencia. Esto está relacionado con la ecuación 2.2. Sabiendo el parámetro $\psi_{\text{máx}}$ para un material en un espesor específico, un diseñador puede dar el primer paso diciendo si una pieza puede obtenerse de una chapa metálica en un paso sin romperse o si el espesor final de la chapa sería o no el adecuado.

En el anexo III se observan ejemplos de espesores iniciales y ángulos máximos de conformado para algunos materiales recomendados por algunos investigadores. Una investigación realizada por [14] obtuvo las siguientes expresiones para dos aluminios aleados:

$$\text{AA 3003-O } \psi_{\text{máx}} = 8,5t_0 + 60,7^\circ \quad (2.3)$$

$$\text{AA 5754-O } \psi_{\text{máx}} = 3,3t_0 + 58,3^\circ \quad (2.4)$$

A pesar de tener a la mano los datos de la tabla anterior y las expresiones 2.3 y 2.4 este parámetro todavía está abierto al debate, y nunca hasta el momento se han obtenido piezas con un ángulo de conformado de 90° por lo que es necesario conocer la relación existente entre él y la conformabilidad de las piezas.

2.1.6 Velocidad de conformación

La influencia de la velocidad de conformación (velocidad de rotación en rpm) y de traslación de la herramienta (en mm/min) ha originado muchas controversias en los trabajos de estampado incremental por punto simple. Un aspecto indiscutible es que la rotación de la herramienta y su velocidad de traslación influyen en la fricción y el calor generado debido al rozamiento entre la chapa y la herramienta. El movimiento relativo entre la herramienta y la chapa es directamente proporcional al calor originado por la fricción. Debido a esto es lógico pensar que existe un incremento de la conformabilidad con el aumento de la velocidad por el efecto del calor, y es importante tener en cuenta que un aumento de la velocidad puede generar resultados negativos como la rotura, obtención de altas rugosidades y con ello la aparición de ondulaciones. También por utilizar altas velocidades los lubricantes pudieran alcanzar la temperatura de fundición de los materiales, o pudieran

también perder propiedades facilitando así el contacto entre la herramienta y la chapa y aumentando con ello la fricción [29].

La expresión matemática 2.5 será utilizada para calcular la velocidad de rotación de la herramienta y la misma fue obtenida mediante el estudio realizado por [29] en la figura 2.7.

$$\omega = \frac{v}{\pi * r \sqrt{\frac{1}{2} * (1 - \cos 2\phi)}} \text{ en rpm} \quad (2.5)$$

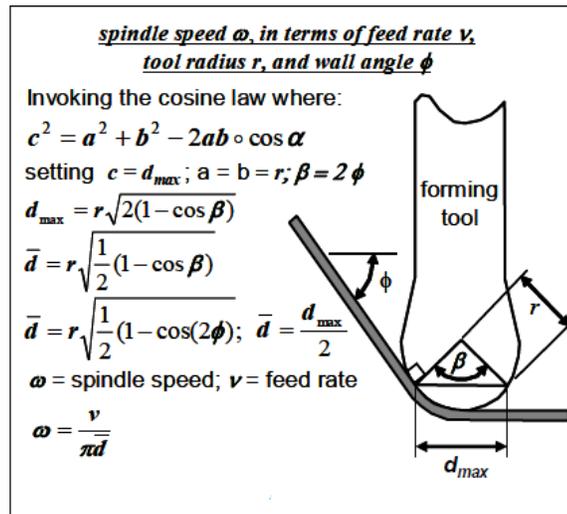


Figura 2.7. Geometría de la herramienta y velocidad de conformado [29]

2.1.7 Lubricación

En el proceso de estampado incremental por punto simple las investigaciones sobre la lubricación han sido limitadas. Las pesquisas realizadas han llegado hasta cómo reducir la fricción y la temperatura que surgen entre la herramienta y la chapa a conformar y cómo influye en la calidad superficial del producto final. Se ha demostrado que el tipo de lubricante no influye significativamente en las fuerzas de conformación sino en la utilización o no de un lubricante [5, 29].

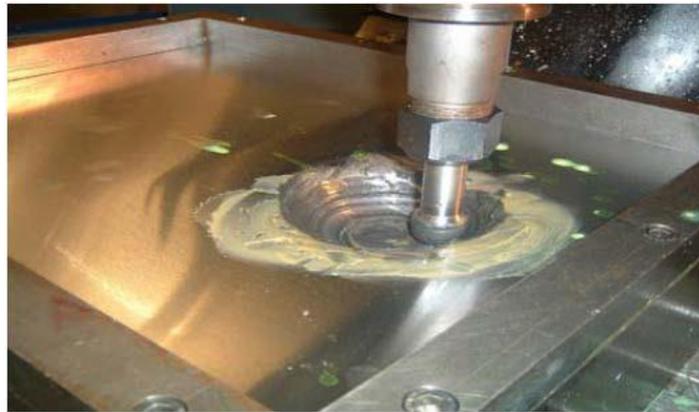


Figura 2.8. Proceso de estampado incremental con lubricación [33]

En la literatura se conoció sobre tres lubricantes tradicionales que se han utilizado en el proceso: la vela de sebo, el sebo mezclado con aceite y jabón mezclado con aceite. El lubricante de vela de sebo es aplicado directamente al material, mientras los otros dos deben prepararse de antemano. Estos lubricantes son de viscosidades diferentes, y se obtiene como resultado un aumento de la fuerza de conformación en dirección del avance de la herramienta con lubricantes de viscosidades mayores [5, 14].

Este parámetro es importante en casi todos los procesos de conformado y tanto es así que se mostrarán las ventajas que puede traer consigo según [12]:

- Reduce la fricción y con ello se obtiene en el producto final una mejoría de la calidad superficial;
- reduce el calentamiento entre la pieza y la herramienta evitando la disminución brusca del espesor en las paredes de la pieza y su rotura;
- reduce considerablemente el desgaste de la herramienta de conformación y así también los costos;
- y por último reduce la fuerza de conformado ejercida por la herramienta.

2.1.8 Limitaciones del proceso de EICH

Una vez estudiados y definidos los parámetros más importantes que intervienen en el proceso de estampado incremental por punto simple es necesario realizar un análisis de los mismos en cuanto a las limitaciones que pueden presentar en la realización del proceso.

Relacionadas con la geometría de las piezas

Así como en otros procesos de conformado (forja, estampado convencional) existen valores máximos de ángulos que definen ciertas regiones de las piezas, a fin de que sea posible su manufactura. En el caso del estampado incremental, estudios recientes apuntan para un ángulo máximo de la pared de la pieza de 65°. conforme lo ilustrado en la figura 2.9. Sobrepasando este valor, se torna muy frecuente la rotura o, por lo menos, una disminución drástica del espesor de la chapa, causando una resistencia mecánica localizada muy baja [7].

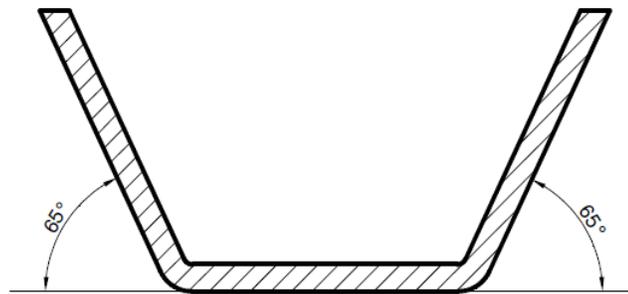


Figura 2.9. Ángulo máximo de la pared [5].

El ángulo máximo de estampado está determinado por una relación entre el espesor de la chapa y su ángulo de conformación, dado por la ecuación 2.6 [7]:

$$t_1 = t_0 * \text{sen}(90 - \psi) \text{ en mm} \quad (2.6)$$

Esta expresión está íntimamente relacionada con la expresión 2.2 por lo que no es necesario identificar los parámetros incluidos en ella. En la figura 2.10 se muestra el comportamiento de la chapa, en relación al ángulo de inclinación de la pared y su relación con la disminución del espesor.

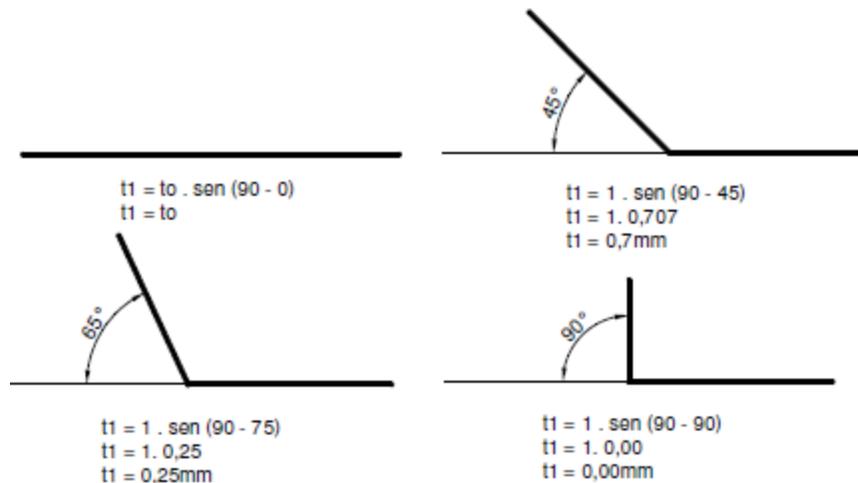


Figura 2.10. Relación entre el ángulo de inclinación y el espesor de la chapa [7]

El espesor de 1 mm es utilizado como ejemplo, pero en verdad, independientemente del espesor de la chapa, ángulos de pared aproximados a 90° tienden a producir secciones extremadamente finas, que obviamente constituyen un problema a evitar ya que pueden causar una baja resistencia mecánica e incluso la rotura.

En investigaciones realizadas sobre el límite de conformación de las chapas de aluminio utilizadas en la industria automovilística, fueron evaluados dos parámetros: límite de espesor (*thinning limit*) y el ángulo límite de estampado (*forming angle limit*). A través del análisis de los resultados, se constató que variando la inclinación de la chapa a lo largo de la profundidad se consigue una mayor capacidad de conformación que cuando utilizamos una inclinación constante. La figura 2.11 demuestra una prueba de estampación donde el ángulo de la pared aumentó gradualmente a medida que la profundidad de conformado también aumentaba. Fue observada la profundidad de rotura, la profundidad alcanzada y la proyectada de acuerdo con el modelo CAD de la pieza. A partir del menor diámetro o ángulo de la pared próximo a 90° la chapa se rompía. La diferencia entre la profundidad proyectada y la alcanzada fue ocasionada por el retorno elástico del material, común en operaciones de estampación [7].

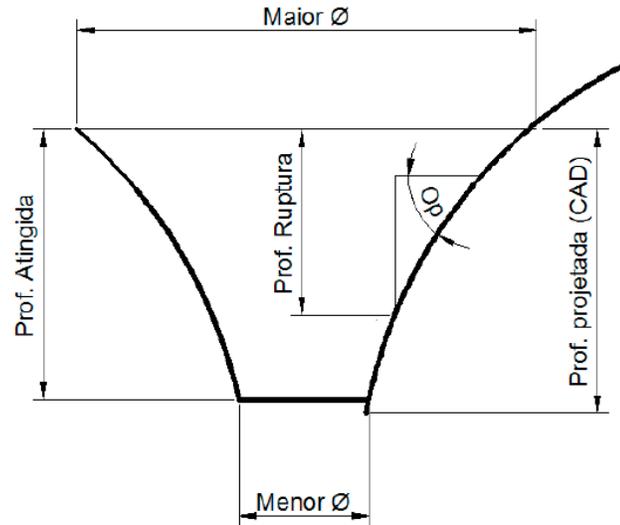


Figura 2.11. Variación del ángulo y la profundidad [7]

Otra característica presente en los procesos de estampado en general, que también acontece en el estampado incremental y que determina los límites de acuidad geométrica es el retorno elástico. Además de la deformación plástica programada, la deformación elástica produce discrepancias geométricas entre el producto final y su modelo correspondiente en CAD.

Limitaciones con el material

Se han logrado obtener piezas de vario materiales como acero inoxidable, cobre, aluminio y titanio, pero es el aluminio el más utilizado [7]. El aluminio en estado puro posee un límite de fluencia aproximado a los 12,7 MPa el cual no es tan pronunciado como la mayoría de los aceros. En el caso del acero dulce (que contiene menos de 0,06 % de carbono y cuya estructura es esencialmente ferrítica), la presencia del nivel de fluencia permite una fácil identificación de la tensión de fluencia. Para el aluminio, esta tensión es identificada gracias a una deformación específica residual convencional de 0,2 % como puede ser observado en la siguiente figura.

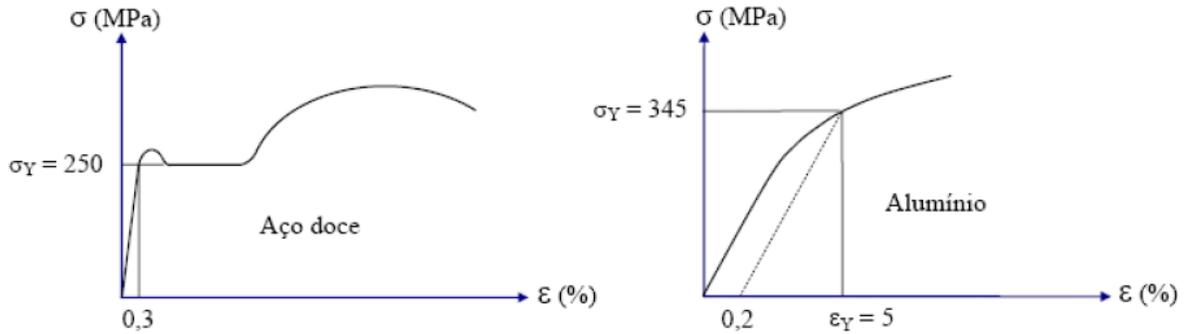


Figura 2.12. Curva de tensión vs deformación para acero y aluminio [7]

Con relación a las condiciones de conformabilidad, las chapas de aluminio al principio no presentaban buenos resultados. Esto ocurría porque el aluminio comercialmente puro (99,33 %) es un material anisotrópico, o sea, para una misma sollicitud mecánica, la deformación del espesor es mayor que en el largo ($r_m > 1$). De esa forma se deforma la chapa en un proceso de estampado, produciéndose una gran reducción del espesor para una pequeña variación del alargamiento.

A pesar de estas condiciones iniciales adversas, el proceso de estampado incremental para chapas de 0,5 mm de espesor presenta algunas ventajas observadas en los siguientes aspectos:

• **Cuando es comparado con el estampado incremental de aceros [7]:**

- 1) Las profundidades alcanzadas (50-70mm), permiten grandes deformaciones, considerándose una anisotropía, o sea, presenta baja ductilidad.
- 2) Pequeñas discrepancias geométricas entre los modelos CAD y la pieza real (bajo retorno elástico).
- 3) La herramienta utilizada para deformar la pieza en las máquinas CNC realiza poco esfuerzo al desplazarse en el eje Z, ya que el material ofrece menor resistencia a la deformación elástica.
- 4) Hay una reducción del tiempo para el estampado, pues se utilizan pasos verticales de hasta 1 mm y velocidades de avances de hasta 1.500 mm/min.

Tiene un coeficiente de rozamiento de 0,05 que es igual al de los aceros en general, siendo menor que el de los aceros inoxidables, que presentan un valor de 0,1.

• **En cuanto a las propiedades mecánicas del aluminio en general [7]:**

- 1) El valor de la densidad es aproximadamente un tercio de la del acero.
- 2) Tiene gran resistencia a la corrosión, ofreciendo durabilidad para el producto final.
- 3) Pueden ser conformadas variedades de piezas de diferentes formas.
- 4) Es buen conductor del calor, siendo muy utilizado en utensilios domésticos (generalmente en la cocina).
- 5) Posee bajo peso específico.

• **En cuanto a la adaptación de estrategias CAM [7]:**

Aunque no sea una característica exclusiva, la conformación de chapas de aluminio por estampado incremental obtuvo éxito con el uso de la trayectoria helicoidal, definida y configurada en software CAM. Esta trayectoria hace que la herramienta este en contacto permanente con la chapa, evitando deformaciones y marcas indeseadas en el producto final. Estas combinaciones traen como consecuencia tres mejoras considerables:

- 1) Aumento de la conformabilidad geométrica.
- 2) Mejoras en el acabado superficial de las piezas.
- 3) Disminuye el tiempo de manufactura.

Entre las ventajas que se describen anteriormente, la relación entre los módulos de elasticidad, es el más importante si se trata del costo de producción, ya que la energía consumida para deformar la chapa de aluminio es menor. Además esa propiedad del aluminio tiene la ventaja de dar a las estructuras una elevada capacidad de amortiguar golpes y reducir las tensiones producidas por la variación de la temperatura.

Limitaciones por las dimensiones de las piezas

El tamaño máximo del producto está definido por el tamaño de la máquina herramienta. Existen cinco tamaños diferentes ya sean para uso comercial o para investigativo. Los datos técnicos de las máquinas se muestran en el anexo I.

El espesor máximo de la chapa es diferente para cada máquina. El factor crítico es la fuerza necesaria de conformación. Como las tensiones de fluencias varían acorde al material del producto, las fuerzas de conformación y el espesor máximo de la chapa dependen del material y la máquina que se utilizará. Como puede verse en la tabla anterior, los posibles espesores del material en el proceso de conformado están entre 0,5 y 2 mm para los aceros

inoxidables y entre 0,5 y 4 para el aluminio. Este proceso con respecto a los demás procesos de estampado, permite una mayor relación de embutición. En el embutido profundo el material sufre un alargamiento, principalmente en el fondo de la pieza, lo cual puede generar protuberancias en esas zonas de deformación [34].

Limitaciones en cuanto a la calidad del material

Es conocido que en cada pasada de la herramienta incrementalmente en el eje Z, la misma deja marcas sobre la superficie conformada. Estas marcas pueden ser reducidas utilizando herramientas de mayores diámetros, reduciendo el ángulo de conformación o también haciendo girar la herramienta soporte. Ángulos más pequeños de conformación conllevan a un mayor tiempo de conformación, esto hace que se deba considerar un compromiso entre el tiempo de conformación y la calidad superficial. Si la inclinación es menor de 0,01 mm, el material es conformado varias veces en el mismo lugar, y el material se endurece por deformación, por lo general esto provoca grietas en la chapa. El endurecimiento por deformación también se incrementa con las tensiones [34].

Estas marcas dejadas por la herramienta y que afectan la calidad superficial del producto final, pueden prevenirse utilizando una chapa metálica sobre la chapa de la pieza real en el proceso. Sobre esta chapa metálica quedan las marcas de la herramienta, pero la transferencia de la geometría producida por la herramienta sobre la chapa de la pieza es menor, por lo que la geometría del producto final no es tan precisa como el contacto directo entre la herramienta y la chapa de la pieza, aunque la calidad superficial es mejor. Otra solución para mejorar la calidad superficial es conformar más de una vez la chapa resaltando los detalles de diseño, muchas veces, este método satisface la calidad exigida.

El diámetro de la herramienta es otro factor que influye sobre la calidad superficial de la chapa, al incrementarse este disminuye la rugosidad superficial. La rugosidad superficial también disminuye cambiando la dirección de conformación en cada pasada y disminuyendo la inclinación de las paredes de la chapa [34].

Todas las partes en el mismo producto no son de la misma forma, algunas partes son uniformes y otras no, por lo que la rugosidad superficial no es constante sobre toda su superficie.

2.2 Modelo analítico para determinar la fuerza de conformado en el EICH

Es esencial conocer la fuerza de conformado requerida para una operación exitosa en el proceso de estampado incremental. Debería ser determinada la fuerza para predecir o evitar la rotura de la herramienta y conocer la fuerza requerida para obtener el producto final sin llegar a la rotura de la chapa.

Las fuerzas originadas en el proceso de estampado incremental por punto simple pueden medirse experimentalmente o determinarse empleando algún modelo analítico. Los instrumentos para medir dichas fuerzas no se encuentran estandarizados, o sea, que cada investigador ha desarrollado sus propios métodos, por lo que no se hace referencia a ellos en el trabajo. Debido a ello solo se decidirá un modelo teórico aproximado referenciado en la literatura.

El modelo fue propuesto por Iseki. En el mismo se hacen una serie de consideraciones entre las que se encuentran un comportamiento de anisotropía normal y condiciones de deformación plana del material, por tanto se asume el criterio de (Hill, 1979) para describir el comportamiento del material [35].

$$F_x = F_t * [1 - \cos(\psi)] \text{ en N} \quad (2.7)$$

$$F_z = F_t * \text{sen}(\psi) \text{ en N} \quad (2.8)$$

Donde:

F_x – es la componente de la fuerza de tensión en la dirección del movimiento de la herramienta.

F_z – es la componente de la fuerza de tensión en la dirección vertical.

F_t – es la fuerza de tensión.

ψ – es el ángulo de contacto o de conformación.

El ángulo ψ es determinado mediante relaciones geométricas. La interpretación geométrica de este ángulo se muestra en la siguiente figura.

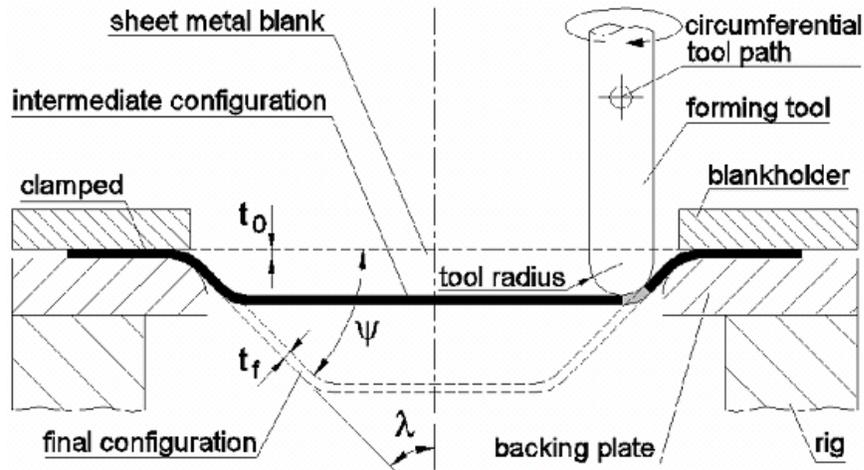


Figura 2.13. Estampado incremental y parámetros del proceso [35].

Una vez determinado el ángulo de contacto, se debe calcular la fuerza de tensión que depende de las propiedades del material fundamentalmente. Despreciando las tensiones de doblado (*bending stress*), las fuerzas de fricción, la componente de la tensión en la dirección del espesor σ_t y la componente de deformación ϵ_y (el eje “y” es perpendicular a la dirección del movimiento de la herramienta) la fuerza de tensión es determinada aproximadamente como:

$$F_t = A * \sigma_x = 2 * R * t * \sigma_x \text{ en N} \quad (2.9)$$

Donde:

A – es el área de la sección transversal de la zona deformada.

σ_x – es la componente de la tensión en el eje “x”.

R – es el radio de la herramienta

t – es el espesor de la chapa.

Con el propósito de determinar las componentes de tensión y asumiendo el criterio de (Hill, 1979), tal como lo planteó anteriormente.

R_a – es el coeficiente de anisotropía. El cual está definido por la relación entre las deformaciones del ancho ϵ_w y el espesor de la chapa ϵ_t tal como se muestra a continuación y es único para cada material.

$$R_a = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.10)$$

Mediante dicho coeficiente puede relacionarse la tensión equivalente $\bar{\sigma}$ y la componente de la tensión σ_x . En el momento en que el metal es deformado, en la región plástica, el comportamiento del material es expresado según la regla de flujo

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad (2.11)$$

Donde:

K – es el coeficiente de plasticidad.

n – es el coeficiente de endurecimiento.

Estos parámetros pueden ser obtenidos de forma experimental mediante el ensayo de tracción.

Sustituyendo los parámetros mencionados anteriormente y la relación de espesores

$t = t_0 e^{\varepsilon_x}$ se obtiene la fuerza de tensión F_t en función de los parámetros del material y la

componente de deformación ε_x como:

$$F_t = 2RK \left\{ \frac{[2(1+R_a)]^{\frac{1}{m}}}{2} * \left[1 + \frac{1}{(1+2R_a)^{\frac{1}{m-1}}} \right]^{\frac{m-1}{m}} \right\}^n * \left[\frac{(1+R_a)}{1+2R_a} \right]^{\frac{1}{m}} \left[\frac{(1+2R_a)^{\frac{1}{m-1}+1}}{2} \right]^{\frac{m-1}{m}} * t_0 e^{-\varepsilon_x} \varepsilon_x^n \quad (2.12)$$

El valor de m depende del material y del tipo de criterio de anisotropía que se asuma, para el criterio de Hill, m=2

Una vez mostrada la expresión para obtener la fuerza de conformado en el proceso de estampado incremental por punto simple, podemos llegar a una expresión simplificada:

$$F_t = 2RK \left[\frac{(1+R_a)}{1+2R_a} \right]^{n+1} * t_o * e^{-\varepsilon_x} * \varepsilon_x^n \quad (2.13)$$

2.3 Conclusiones del capítulo

- De los parámetros más influyentes en este proceso el ángulo de conformación de las piezas es el menos valorado por lo que todavía está expuesto al estudios de los científicos.
- Se concluye además que la utilización de lubricantes en la superficie de contacto entre la herramienta y la chapa favorece el avance de la herramienta durante el proceso, ayudando también a que las temperaturas de trabajo no se eleven.
- La herramienta de conformar es el parámetro más influyente en el proceso ya que su tamaño, su velocidad, el desplazamiento y el incremento vertical definen la conformabilidad, acabado superficial, limitaciones geométricas y tiempo de conformado de las piezas.
- Se valora un modelo analítico para el cálculo de la fuerza de conformado en función de las propiedades de material, el radio de la herramienta y el espesor inicial de la chapa el cual se utilizará para los propósitos de la optimización.

CAPÍTULO 3. Resultados de la optimización de los valores de la fuerza

Optimizar no es más que encontrar la mejor solución a un problema dado cuando existen muchas soluciones (finitas). La optimización en ingeniería de procesos ha evolucionado desde la formulación de problemas como ejercicio académico y la solución analítica de problemas simples, hace unas décadas atrás, hasta hoy en día, donde un gran conjunto de problemas prácticos pueden ser solucionados efectivamente gracias al desarrollo de técnicas numéricas de solución y a la potencia de cálculo de los computadores.

3.1 Herramienta de inteligencia artificial a utilizar

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos de búsqueda de propósito general basados en los principios de la genética natural, es decir, son algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de la selección natural y la genética [21].

Los Algoritmos Genéticos son un ejemplo de método que explota la búsqueda aleatoria “guiada” que ha ganado popularidad en los últimos años debido a la posibilidad de aplicarlos en una gran gama de campos y a las pocas exigencias que impone al problema [21].

3.1.1 Componentes de un algoritmo genético

Los algoritmos genéticos trabajan a partir de una población inicial de estructuras artificiales que van modificando repetidamente a través de la aplicación de los siguientes operadores genéticos:

- Operador de Selección o Darwiniano
- Operador de Cruzamiento o Mendeliano

- Operador de Mutación

Para utilizar los AG es necesario encontrar una posible estructura para representar las soluciones. Pensando este asunto como el problema de buscar en un espacio de estados, una instancia de esta estructura representa un punto o un estado en el espacio de búsqueda de todas las posibles soluciones. Así, una estructura de datos en el AG consistirá en uno o más cromosomas (frecuentemente uno), el cual se representa comúnmente como una cadena de bits (existen otras representaciones).

Cada cromosoma (cadena) es una concatenación de un número de subcomponentes llamados genes. La posición de un gen en el cromosoma se conoce como locus y sus valores como alelos. En la representación como cadena de bits, un gen es un bit o una cadena de bits, un locus es su posición en la cadena y un alelo es su valor (0 ó 1 si es un bit).

Al optimizar una estructura usando un AG se necesita una medida de la calidad de cada estructura en el espacio de búsqueda. La función de adaptabilidad es la encargada de esta tarea. En una maximización de funciones, la función objetivo frecuentemente actúa como la función de adaptabilidad, como en el ejemplo anterior, en el cual la meta es encontrar el valor de $\langle x \rangle$ que maximice F .

Los AG realizan una maximización por defecto, para los problemas de minimización los valores de la función objetivo pueden ser negados y trasladados con vistas a tomar valores positivos para producir así la adaptabilidad.

3.1.2 Funcionamiento de un algoritmo genético

El modo de trabajo de un AG puede resumirse en el siguiente esquema el funcionamiento de un AG simple.

El mecanismo de un AG simple es como sigue:

- El AG simple genera aleatoriamente una población de n estructuras (cadenas, cromosomas o individuos)
- Sobre la población actúan los operadores transformando la población. Una vez completada la acción de los tres operadores se dice que ha transcurrido un ciclo generacional.

- Luego se repite el paso anterior mientras no se garantice el criterio de parada del AG.

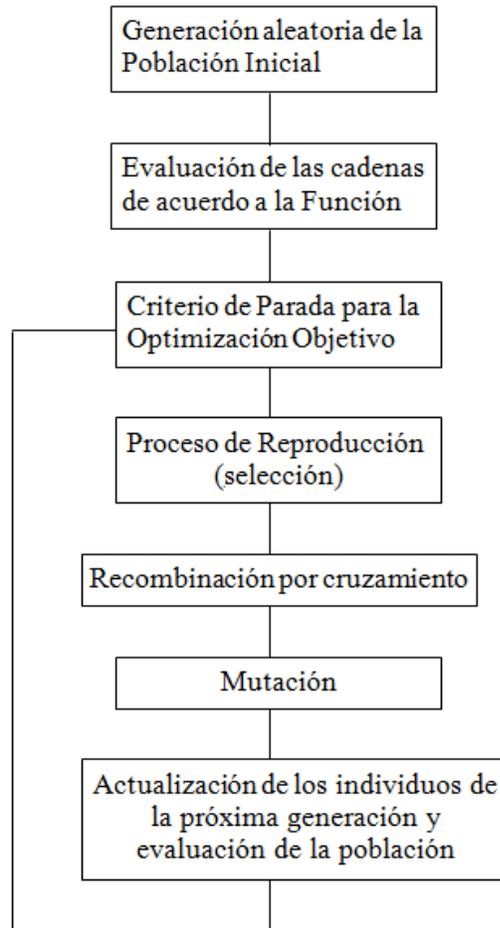


Figura 3.1. Diagrama funcional de un algoritmo genético [21]

El *operador de selección o Darwiniano* realiza la selección de las cadenas de acuerdo a su adaptabilidad para el posterior apareamiento.

El *operador de cruzamiento o Mendeliano* realiza la recombinación del material genético de dos cadenas padres.

El *operador de Mutación* al estilo del operador natural realiza la mutación de un gen dentro de un cromosoma o cadena a sus diferentes formas alelomorfias.

Para cada uno de estos operadores está asociado el uso de probabilidades y la generación de números aleatorios [21].

El AG ejecuta para un número fijo de generaciones o hasta que se satisface algún criterio de

parada [21].

Desde el punto de vista de la comparación de los AG con otros métodos de búsqueda se pueden enmarcar sus diferencias en cuatro aspectos según [21]:

1. Trabajan con una codificación de los parámetros y no con los parámetros mismos.
2. Buscan a partir de una población de puntos y no de un punto simple.
3. Usan directamente la función objetivo y no la derivada u otro conocimiento auxiliar.
4. Usan reglas de transición probabilísticas y no determinísticas.

3.1.3 ¿Por qué utilizar algoritmos genéticos y no otros métodos conocidos?

Las razones que se pueden argumentar son varias. Los métodos conocidos son buenos mientras el problema no es muy complejo. Los AG permiten la solución eficiente de funciones extremadamente complejas [21].

Las potencialidades de los AG se pueden resumir por sus habilidades para resolver una variedad de problemas muy difíciles [21]:

- Trabajar sin conocimiento previo de la función a optimizar.
- Optimizar funciones “ruidosas”.
- Trabajar sin información secundaria como gradientes.

La mayoría de los especialistas en este tema coinciden en que los AG pueden resolver las dificultades representadas en los problemas de la vida real que a veces son insolubles por otros métodos [21].

Para Goldberg el tema central de la investigación en AG consiste en la robustez: el balance entre la eficacia y la eficiencia necesaria para sobrevivir en muchos ambientes diferentes [GOL89].

Goldberg destaca las formas en que difieren los AG de los sistemas tradicionales:

- Los AG trabajan con una codificación del conjunto de parámetros, no con los parámetros en sí.
- Los AG realizan la búsqueda a partir de una población de puntos, no de un punto simple.

- Los AG sólo utilizan la información de la función objetivo, sin derivadas u otro conocimiento auxiliar.
- Los AG utilizan reglas de transición probabilísticas, no determinísticas.

En un trabajo más reciente Goldberg expone algunos motivos por los que los AG pueden ser atractivos para el desarrollo de aplicaciones:

- Pueden resolver problemas difíciles de forma rápida y confiable.
- Son fáciles de enlazar a simulaciones y modelos existentes.
- Son extensibles.
- Son fáciles de hibridar.

3.2 Metodología para optimizar la fuerza de conformado en MATLAB

En este epígrafe se pretende desarrollar una estrategia para optimizar la fuerza máxima de conformación en un proceso de estampado incremental. Para ello se utilizará una chapa de Al 3003, sus propiedades se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 3.1. Composición química del material [36]

	Mn (%)	Fe (%)	Si (%)	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)
Al 3003	1 a 1.5	0.7	0.6	0.05 a 0.2	0.1	96.7 a 99

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del material [36]

Material	K (MPa)	n	R _a	ε _x (%)
Al 3003	110	0.36	0.67	14 a 25

Los datos de la ε_x expuestos en la tabla anterior son para espesores de 0.152 a 12.7 mm y fueron obtenidos de la base de datos sobre materiales llamada MATWEB.

Formulación de la función objeto

La función objeto es la 2.13, y sus parámetros serán también descritos a continuación; se establecerán los rangos de las variables y los valores de las constantes se encuentran en la tabla 3.2.

$$F_t = 2RK \left[\frac{(1 + R_a)}{1 + 2R_a} \right]^{n+1} * t_o * e^{-\varepsilon_x} * \varepsilon_x^n$$

En ella están presentes los siguientes parámetros:

R, es el radio de la herramienta (mm);

K, es la constante de plasticidad;

R_a, es el coeficiente de anisotropía;

n, es el coeficiente de endurecimiento;

t₀, es el espesor inicial de la chapa (mm) y

ε_x, es la elongación.

Establecer las variables a optimizar y sus restricciones

En la tabla 3.3 se muestran los rangos de valores de las variables que se necesitan optimizar, estas variables en MATLAB corresponden a las llamadas restricciones.

Tabla 3.3. Variables y sus restricciones

Valor inferior	Variable	Valor superior
2.5 mm	R	25 mm
0.93 mm	t ₀	2.1 mm
40°	φ _{máx}	78°

Los valores de la tabla anterior fueron obtenidos mediante un estudio bibliográfico, esos valores los establecieron diferentes autores que han realizado experimentos en este tipo de proceso tecnológico.

Metodología propuesta para trabajar en MATLAB

- I. Descripción del problema en cuestión
 - Formulación del problema
 - Definir función objeto
- II. Crear la función objeto como archivo .m
 - Abrir el software MATLAB
 - Abrir el editor de funciones
 - Crear archivo .m declarando la función objeto y sus variables de entrada
 - Guardar el archivo creado
- III. Optimización de la función
 - Abrir el toolbox de optimización usando el comando “*optimtool*”
 - En solver seleccionar “*ga - genetic algorithm*”
 - Fitness Function escribir @ y el nombre del archivo .m creado anteriormente
 - Definir el número de variables de la de la función objetivo
 - En Bounds se definen las fronteras o restricciones del problema
 - En Options se definen las opciones que se quieren obtener del algoritmo
 - En Start se inicia la corrida del programa

3.3 Discusión de los resultados y su validación

Luego de escribir la función objeto en MATLAB y definir los valores para las constantes se ejecutará la corrida de la optimización utilizando un algoritmo genético mono-objetivo como herramienta artificial.

```

1  function [F]= alberto(x)
2  %variables:
3  k=110;%Constante de plasticidad en MPa
4  Ra=0.67;%Coeficiente de anisotropia
5  Ex=0.20;%Deformacion del material
6  R=x(1);%Radio de la herramienta
7  t0=x(2);%Espesor inicial de la chapa en mm
8  n=0.36;%Coeficiente de endurecimiento
9  e=2.7182818;%Constante de Euler
10 angulo=x(3);%Ángulo de conformación de la pieza
11 %Calculos
12 disp('El valor del espesor de la chapa')
13 tf=x(2)*(sin(x(3)));
14 disp(tf);
15 disp(angulo)
16 disp('El valor de la fuerza de conformacion')
17 F=(2*R*k*(1+Ra)/(1+(2*Ra)))^(n+1)*x(2)*(e^(-Ex))*Ex^n;
18 disp(F)
19 end

```

Figura 3.2. Función objeto y parámetros escritos en MATLAB

Tabla 3.4. Parámetros seleccionados para el algoritmo genético

Population type	Double vector
Population size	500
Selection	Tournament
Mutation	Use constraint dependent default
Crossover	Scatteret
Reproduction, crossover fraction	0.8
Elitism	5

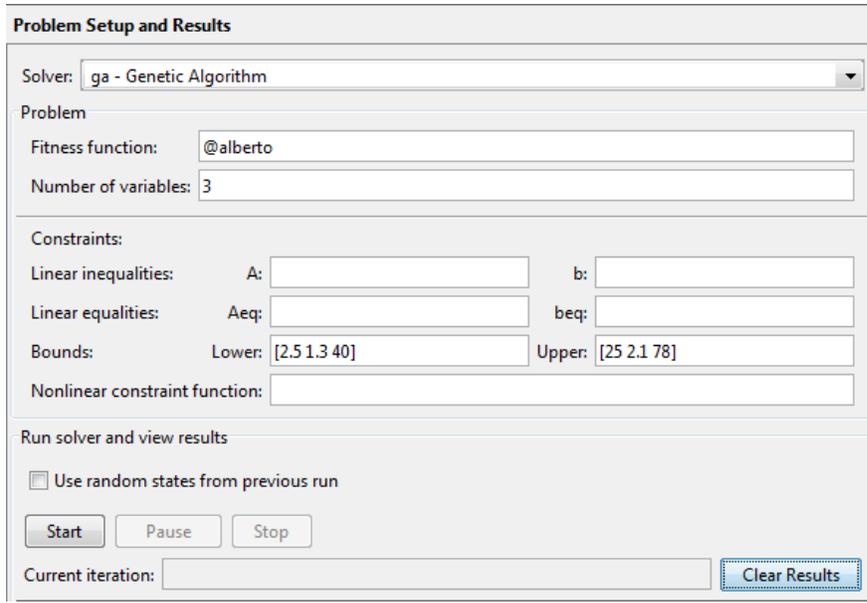


Figura 3.3. *Toolbox de optimización en MATLAB*

Los resultados obtenidos por el software fueron satisfactorios, la función objetivo alcanzará un valor de 148.29 N mostrando como mejores valores para R , t_0 , y $\phi_{\text{máx}}$ de 2.5 mm, 0.93 mm y 40° respectivamente.

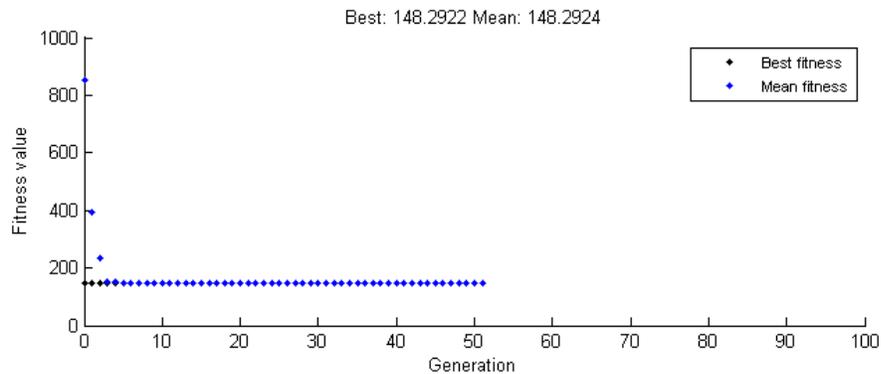


Figura 3.4. *Convergencia del AG hacia la solución óptima global de la fuerza de conformado*

En la figura 3.4 se muestra el resultado del mejor individuo en función del número de generaciones, es decir, el mejor valor de la función en cada generación contra el número de interacciones. El resultado obtenido mediante el algoritmo genético es sumamente cercano al óptimo global pero si se quisiera una mayor precisión simplemente se incrementa la longitud de la cadena binaria de acuerdo a lo requerido.

Para la segunda corrida del programa el rango de las variables se disminuyó utilizando los valores reales que se han utilizado para el estampado incremental del Al 3003; este nuevo intervalo se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Nuevo intervalo para las variables a optimizar

Valor inferior	Variable	Valor superior
2.5 mm	R	5 mm
1.31 mm	t_0	2.1 mm
67°	$\phi_{\text{máx}}$	78°

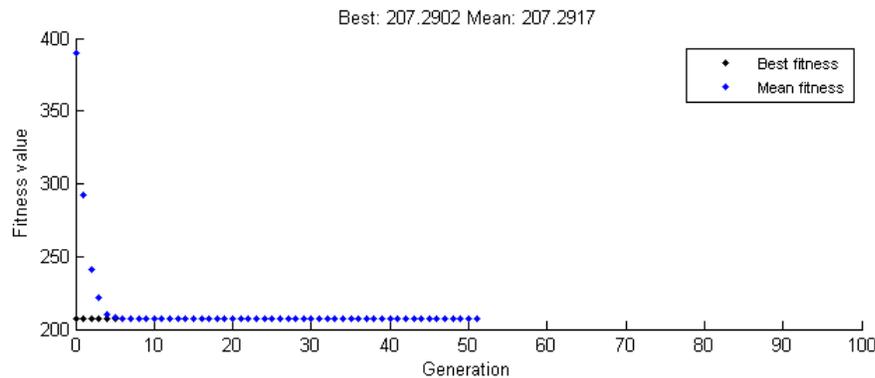


Figura 3.5. Convergencia del AG hacia la solución óptima global de la fuerza de conformado en las condiciones reales de trabajo

En el nuevo caso los resultados obtenidos se corresponden con los cambios que se hicieron en la segunda corrida, el valor de la función objeto es 207.29 N y los valores de R, t_0 y $\phi_{\text{máx}}$ son 2.5 mm, 1.31 mm y 67° respectivamente, quedando demostrado con ello que un aumento o disminución de estos valores en el proceso provocaría el mismo efecto en el valor de la fuerza de conformación.

3.4 Conclusiones del capítulo

- La implementación del AG evita que se pierdan buenas soluciones (y mantiene una buena cantidad de individuos “padres” con información y/o diversidad valiosa) a

pesar que no existen criterios uniformes en cuanto a los elementos a optimizar en la operación.

- Para los procesos de estirado de chapas metálicas en general no existe una expresión analítica que describa las relaciones funcionales entre parámetros tecnológicos del proceso y el dimensionamiento e integración de los elementos constitutivos de la herramienta con los valores de fuera necesarios para el proceso, de ahí la necesidad de la optimización de este valor.
- Los resultados obtenidos en las corridas del programa de optimización demuestran que el resultado obtenido mediante el algoritmo genético es sumamente cercano al óptimo global; si se quisiera una mayor precisión simplemente se incrementa la longitud de la cadena binaria de acuerdo a lo requerido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones Generales

- 1 Quedaron plasmadas en el presente trabajo las principales características del estampado incremental así como sus diferentes variantes de aplicación, resumiendo que este aporta mayores valores de conformabilidad en los materiales en relación a los procesos tradicionales de conformación, aspecto este que está siendo debatido por la comunidad internacional de científicos.
- 2 Por medio del estudio bibliográfico se concluyó que los algoritmos genéticos es una de las herramientas de inteligencia artificial más usada para la optimización de los procesos de conformación.
- 3 Una vez analizados los factores tecnológicos presentes en el proceso se concluye que uno de los más influyentes en la calidad del producto final es la herramienta, ya que define los incrementos de deformación, la calidad superficial del producto, la velocidad de conformación, limitaciones geométricas y el tiempo de conformación de las piezas.
- 4 La optimización de los valores de fuerza en el proceso, con el fin de minimizar sus valores, mediante la técnica de algoritmos genéticos resultó satisfactoria. Los mínimos valores de fuerza están asociados a la potencia de la máquina herramienta empleada y a la disminución de los costos en el proceso.

Recomendaciones

- 1 Se recomienda el estudio de la influencia de los parámetros del algoritmo genéticos sobre los resultados del valor de la fuerza.
- 2 Realizar estudios donde se valoren varias alternativas para la optimización multiobjetivo del proceso de estampado incremental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

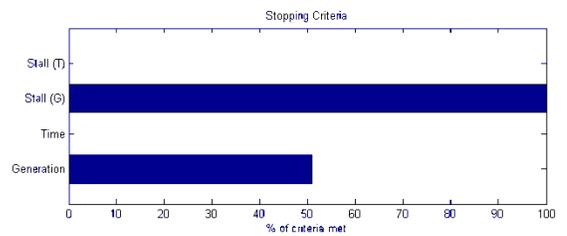
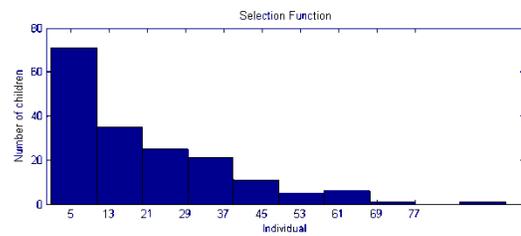
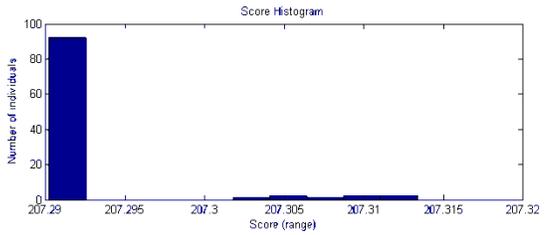
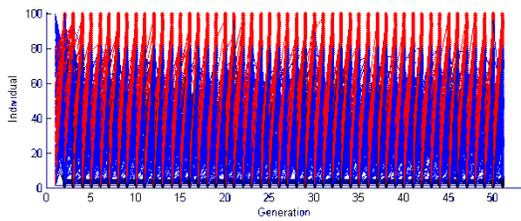
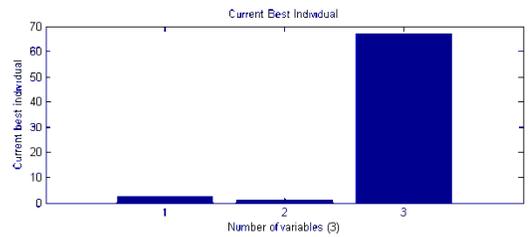
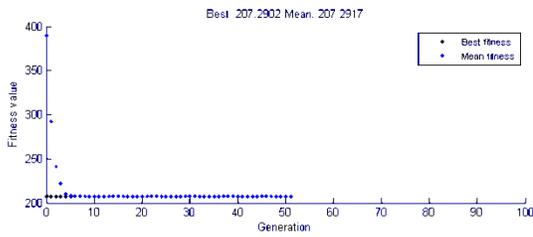
1. Micari F., G.A., L. Filice, *Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends*. Journal of Materials Processing Technology, 2007. **Vol. 191**: p. 390-395.
2. Denis Agote, M.L.P., Fatronik, *Incremental sheet forming: Una alternativa flexible y económica para el conformado de series cortas y prototipos en chapa metálica*, in *Metalmecánica*. 2007.
3. S. Jeswiet, E.H., *Rapid Prototyping Non-uniform Shapes from Sheet Metal Using CNC Single Point Incremental Forming*, in *NAMRI/SME transactions*. 2003. p. 65-69.
4. Silva, P.J.d., *Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 E ABNT 304*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2011, Universidade de Brasília: Brasília. p. 129.
5. Hagan E., J.J. (2002) *A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods*. Proc. Instn. Engrs **Vol. 217 Part B: Engineering Manufacture**.
6. J. Moreau, E.R., *Evolución microestructural de chapas metálicas bajo procesos de larga deformación*, in *Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 2009, Escuela Politécnica Universidad Carlos III: Madrid.
7. Castelan, J., *Utilización de tecnologías CAD/CAM para estampagem incremental do aluminio série 1000*, in *Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM*. 2007, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre.
8. Câmara, J.L.P.d.b., *Single point incremental forming*, in *Engenharia Mecânica*. 2009, Universidade Técnica de Lisboa: Lisboa.
9. Ambrogio G., L.F., F. Gagliardi, F. Micari, *Three-dimensional FE simulation of single point incremental forming*:, in *VIII International Conference on Computational Plasticity*, C. VIII, Editor. 2005: Barcelona, España.
10. Moro, M. (2002) *Tecnologías de fabricación*.
11. Jackson K., A.M., *Incremental sheet forming research at Cambridge University*. 2007, Institute for Manufacturing – University of Cambridge: Mill Lane, Cambridge, U.K.

12. Peñalver, J.P.V., *La Tecnología de Estampado Incremental de Chapas como alternativa para la elaboración de piezas*, in *Departamento de Ingeniería Mecánica*. 2012, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Cuba. p. 60.
13. Ambrogio G., L.D.N., L. Felice, F. Gagliardi, M. Muzzupappa, *Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005. **163**: p. 156-162.
14. Jeswiet J., F.M., G. Hirt, A. Bramely, J. Duflou, J. Allwood (2005) *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*.
15. Delaffe, A., *Descrição do Processo de Estampagem Incremental e Dados Concretos Práticos do Process*. 2007.
16. Villamil García Enrique, M.J.G.H., *Introducción al proyecto de ingeniería*. 2003: Buenos Aires.
17. A., V. (2008) *Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Problemas de Producción*. **33**.
18. Díaz, M.R., *Optimización de los procesos de estirado de chapas mediante técnicas de Inteligencia Artificial*, in *Departamento de Ingeniería Mecánica*. 2012, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Cuba.
19. Hernández, E., *Planeación de procesos asistida por computadora*, in *Departamento de Ingeniería Mecánica*. 2011, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Cuba.
20. Crevillén, G. (2008) *Homepage sobre algoritmos genéticos*. **Vol. 1**.
21. Gálvez, D., *Algoritmos Genéticos*, in *Grupo de Investigación en Inteligencia Artificial Departamento de Ciencia de la Computación Facultad de Matemática*. 1998, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara, Cuba.
22. Holland, J. (1999) *Home page sobre algoritmos genéticos*. **Vol. 2**.
23. Marczyk, A., *Algoritmos genéticos y computación evolutiva*, in *Mathematics Department*. 2004, Macquarie University: Sydney, Australia.
24. M., B.B., A., *Colonias distribuidas de hormigas en un entorno paralelo asíncrono*, in *XXVI Conferencia Latinoamericana de Informática*. 2000: México.
25. Morales, E. (2009) *Optimización basada en la colonia de hormigas*. **Vol. 1**.
26. Tiburi, F., *Aspectos do processo de estampagem incremental*, in *Metalúrgica e de Materiais-PPGEM*. 2007, Universidad Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre. p. 96.
27. Rodríguez, P.P., *Incremental sheet forming - Industrial applications*, in *International Seminar on Novel Sheet Metal forming Technologies*. 2006, Fatronik: Jyväskylä, Finland.
28. Hirt G., S.J., M. Bambach, I. Chouvalova, J. Ames (2005) *Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation*. Institute of Technology/Precision Forming (LWP).

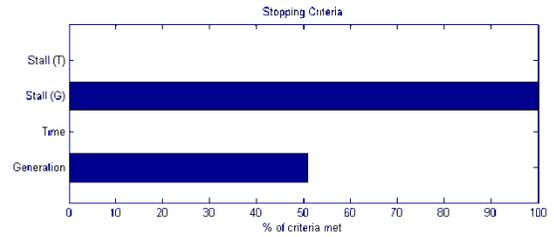
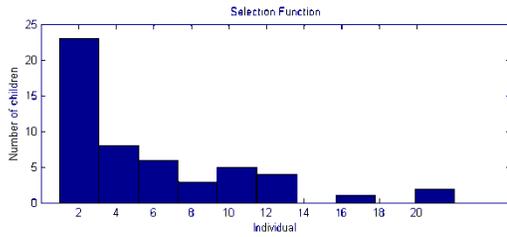
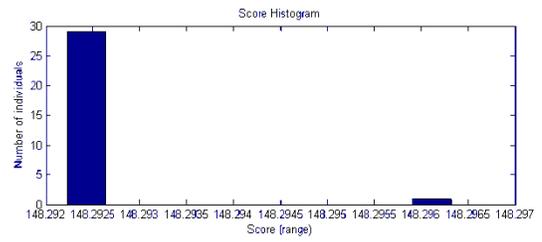
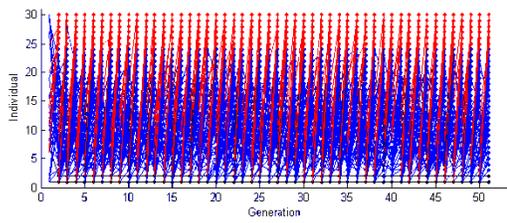
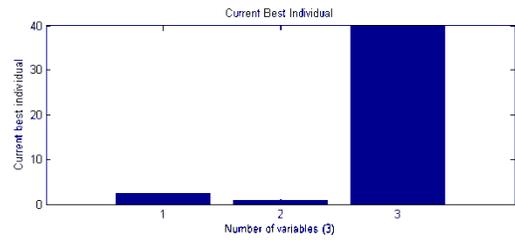
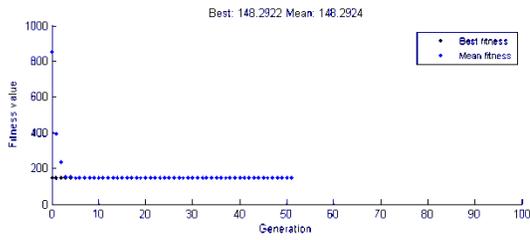
29. Hamilton, K.A.S., *Friction and external surface roughness in single point incremental forming: A study of surface friction, contact area and the 'orange peel' effect*, in *Department of Mechanical and Materials Engineering*. 2010, Queen's University: Kingston, Ontario, Canada.
30. Jong-Jin Park, Y.-H.K., *Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. **Vol. 140**: p. 447-453.
31. Matusevich Ariel, R.M., Julio Massa, *Determinación del exponente "n" de endurecimiento por deformación mediante un algoritmo de mínimos cuadrados ponderados*. *II CAM 2010*, 2010. **Vol. 2**: p. 9.
32. Jukka Tuomi, L.L., *Incremental sheet forming as a method for sheet metal component prototyping and manufacturing*, in *10èmes Assises Européennes de Prototyping Rapide*, A.F.d.P. Rapid, Editor. 2004.
33. Masuku Eric S., A.N.B.A.R.M., Geraint W. Owen, *Incremental sheet metal forming: A die-less rapid prototyping process for sheet metal*. *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, 2005: p. 305-314.
34. L. Filice, L.F., F. Micari, *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*, *Annals of the CIRP*. 2002. p. 199-202.
35. Pohlak, M., *Rapid prototyping of sheet metal components with incremental sheet forming technology*, in *Department of Machinery*. 2007, Tallinn University of Technology.
36. MATWEB. *Material Property: Aluminum 3003*. 2013; Available from: www.matweb.com.

ANEXOS

Anexo I Gráficas de la primera corrida del programa



Anexo II Gráficas de la segunda corrida del programa



Anexo III Listado de materiales con el máximo ángulo de deformación y su espesor inicial [5]

Material	ϕ_{max}	FLD ₀	t ₀ , mm	
AA 1050-O	67.5°	2.305	1.21	Filice [31]
AA 6114-T4	60°	0.841	1.0	Micari [64]
Al 3003 – O	78.1°		2.1	Jeswiet [60]
	72.1°		1.3	“
	71°	3.0	1.21	“
	67°		0.93	“
Al 5754 – O	62°		1.02	Jeswiet [59]
Al 5182 – O	63°		0.93	Jeswiet [59]
AA 6111-T4P	53°		0.93	Jeswiet [59]
DC04, mild steel	65°	1.2	1.0	Hirt [65]
DDQ	70°	2.718	1.0	Micari [64]
HSS	65°	1.924	1.0	Micari [64]
Copper	65°	1.808	1.0	Micari [64]
Brass	40°	0.701	1.0	Micari [64]