

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y
TÉCNICAS DE EXPRESIÓN GRÁFICA

TESIS DOCTORAL

***DESARROLLO DE ASPECTOS METODOLÓGICOS
EN EL DISEÑO DE MATRICES PROGRESIVAS***

**Para la obtención del Título de
Doctor por la Universidad de Cantabria**

Autor:

José Enrique Cerón Hoyos

Ingeniero Industrial

Santander, Marzo de 2013

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y
TÉCNICAS DE EXPRESIÓN GRÁFICA

TESIS DOCTORAL

***DESARROLLO DE ASPECTOS METODOLÓGICOS
EN EL DISEÑO DE MATRICES PROGRESIVAS***

**Para la obtención del Título de
Doctor por la Universidad de Cantabria**

Autor:

José Enrique Cerón Hoyos

Director:

Fernando Fadón Salazar

Santander, Marzo de 2013

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE ASPECTOS METODOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE MATRICES PROGRESIVAS

Autor: José Enrique Cerón Hoyos

Director: Fernando Fadón Salazar

Tribunal Calificador

Presidente: D. Angel Badiola de Miguel

Vocales: D. Miguel Angel Sebastián Pérez

D^a. Maria Isabel Larracochea Madariaga

Suplentes: D. Cesar Otero Gonzalez

D. José Javier Crespo Ganuza

Santander, Marzo de 2013

DEDICATORIA

Deseo mostrar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado para que este trabajo haya visto la luz:

- En primer lugar, quisiera que mis palabras de agradecimiento fuesen para el Dr. Fernando Fadón, director de esta tesis, por la dedicación que ha brindado a este trabajo y la orientación y apoyo prestado, tanto académico como personal, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible. Gracias también por la paciencia y el esfuerzo dedicado.
- A mis compañeros y amigos del Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica por sus consejos, apoyo y amistad.
- A mi familia y a Claudia, por animarme en todo momento a seguir adelante y por ayudarme a no decaer en los momentos de desánimo.
- En especial a mis padres para reconocer su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años y agradecer la educación que me han proporcionado.

PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA TESIS.

Esta tesis doctoral se plantea con el objetivo de contribuir a mejorar, optimizar y sistematizar el diseño de troqueles progresivos.

Este método de fabricación se caracteriza porque la experiencia tiene un gran peso en el diseño tanto del troquel como de los elementos que influyen en él.

Por otra parte, es característico de la ingeniería la capacidad de proyectar, es decir, de valorar además de los aspectos cualitativos, los cuantitativos, de medir magnitudes muy diversas mediante las cuales calcular y predecir con precisión como funcionará y se comportará un mecanismo o estructura optimizando su valor. Es este sentido se desarrollan y aplican metodologías, procedentes de diferentes disciplinas, en algunos casos muy diferentes a las usadas en este entorno.

La distribución de la tesis se estructura en cinco capítulos, versando el primero de ellos sobre la evolución que desde la antigüedad ha tenido este proceso de conformado, desde los más rudimentarios antecedentes hasta llegar a la complejidad que pueden alcanzar actualmente.

En el segundo capítulo se comentan aspectos básicos del conformado en frío de chapa así como características de diferentes tipos de troqueles clasificados según su forma de trabajar o el tipo de pieza a fabricar, para posteriormente centrarse en los troqueles progresivos, analizando los elementos que los configuran y aspectos relativos a su diseño. Se muestra la estructura básica del proceso de diseño, de la que forman parte el diseño de banda, su desarrollo plano, anidamiento y secuencia de operaciones, para lo cual se aplican diferentes algoritmos y aplicaciones informáticas específicas. A partir del diseño de banda se aborda el diseño del troquel, en el que, asimismo, se incorporan metodologías propias que se han aplicado para obtener los resultados que posteriormente se exponen.

En el capítulo se tercero se estudia el diseño de banda centrándose en dos de sus fases: anidamiento y obtención de la secuencia de operaciones. En el anidamiento se examinan detalladamente los principales algoritmos utilizados, se optimizan y se realizan una comparativa de ellos. En la fase de obtención de la secuencia de

operaciones se analizan diferentes procedimientos empleados y con el objeto de superar algunas limitaciones, se ha elaborado uno propio “obtención de la secuencia de operaciones mediante diagramas relacionales”.

En el capítulo cuarto se muestran resultados que se han obtenido aplicando los procedimientos que se han desarrollado para las diversas fases del proceso de diseño, así como diversas aplicaciones informáticas específicas que han contribuido a agilizar, estructurar y optimizar el diseño final del troquel. Los diversos resultados que se presentan, muestran su aplicabilidad a piezas cuya geometría y aspectos constructivos son muy diferentes y su validez en todas ellas.

Se aprecia que las diversas fases que integran el proceso se adaptan entre sí, habiéndose abordado una visión integral en la que partiendo de la pieza a fabricar se obtiene el troquel final.

Por último se presentan las conclusiones e implicaciones de esta tesis y futuras líneas de investigación en las que las aportaciones aquí realizadas puedan servir de precedente, así como la bibliografía y referencias consultadas.

INDICES

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN..... 1

1.1. Introducción y objetivo de la tesis.	3
1.2. Reseña histórica.	4
1.2.1 Edad del Bronce y del Hierro.	5
1.2.2 Primeras manufacturas metálicas.	6
1.2.3 Máquinas-herramienta anteriores a la Revolución Industrial.	7
1.2.4 La Revolución industrial.	12
1.2.5 Producción en serie.	14
1.2.6 El auge de las máquinas-herramienta.	15
1.2.7 Forja, troquelado, estampación.	18
1.2.8 Clasificación de los troqueles.	22
1.2.9 Evolución del troquel entre 1750 y 1850. Caso documentado.	26

CAPITULO II: TROQUELADO. TROQUELES PROGRESIVOS.

DISEÑO DE TROQUELES. 31

2.1. Introducción.	33
2.2. Conformado en frío de la chapa metálica.	33
2.2.1 Corte.	34
2.2.2 Doblado.	37
2.2.3 Embutición.	38
2.3. Tipos de troqueles.	39
2.4. Troqueles progresivos.	40
2.4.1 Elementos que componen un troquel progresivo.	40
2.4.2 Funcionamiento de un troquel progresivo.	44
2.5. Diseño de troqueles progresivos.	45
2.6. Diseño de banda.	50

2.6.1 Desarrollo plano.....	51
2.6.2 Anidamiento.....	54
2.6.3 Etapas del troquel. Secuencia de operaciones.....	56
2.6.4 Determinación de esfuerzos.....	58
2.7. Diseño del troquel.....	59
2.8. Diseño de herramientas de corte no normalizadas.....	60
2.8.1 Características principales de las herramientas de corte.....	61
2.8.2 Proceso de diseño.....	66

CAPITULO III: DISEÑO DE BANDA 73

3.1. Introducción.....	75
3.2. Disposición de la figura. Anidamiento.....	75
3.2.1 Algoritmos de cálculo de la distribución óptima.....	76
3.2.2 Mínimo rectángulo.....	76
3.2.3 Algoritmos rotacionales.....	80
3.2.4 Suma de Minkowski.....	83
3.2.5 Casos de aplicación.....	88
3.2.6 Análisis de resultados.....	95
3.3. Secuencia de operaciones.....	97
3.3.1 Métodos basados en la experiencia.....	97
3.3.2 Determinación de la secuencia de operaciones mediante lógica difusa.....	98
3.3.3 Secuencia de operaciones. Diagrama relacional.....	114

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LA

METODOLOGÍA DESARROLLADA.

RESULTADOS. 137

4.1. Introducción.....	139
4.2. Bisagra.....	140
4.3. Soporte muelle tensor.....	170

4.4. Pieza 3.....	177
4.5. Pieza 4.....	184
4.6. Pieza 5.....	192

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE

INVESTIGACIÓN. 199

5.1. Conclusiones.....	201
5.2. Futuras líneas de investigación.....	203

BIBLIOGRAFÍA..... 205

ANEXO I. Aplicación de los Algoritmos de optimización de

anidamiento. 219

AI.1. Introducción.....	221
AI.2. Introducción de datos generales.	221
AI.3. Elección del método de cálculo.....	222
AI.4. Cálculo del porcentaje de utilización del material	224
AI.5. Cálculo del paso	226
AI.6. Cálculo de la envolvente.	227
AI.7. Resultados	229

ANEXO II. Biografía del Autor..... 231

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Línea del tiempo de la Edad de los Metales en el Viejo Mundo	5
Figura 1-2: Técnicas empleadas en el s XIX según Holtzapffel (1852) en vol 4 “The principles and practice of hand or simple turning.”	7
Figura 1-3: Arco de violín, Museo de Máquina-Herramienta de Elgoibar, Guipuzcoa. Mendelsches Bruderbuch, 1395.	8
Figura 1-4: La referencia más antigua de un torno es la ilustración en una tumba egipcia de 300 a. C. aproximadamente.	8
Figura 1-5: Fabricación de piezas torneadas mediante arco de violín. “Libro de los Juegos” de Alfonso X “El Sabio”	9
Figura 1-6: Torno de polea. Mendelsches Bruderbuch 1395.	9
Figura 1-7: Torno de pedal con volante de inercia. Máquina para fabricar roscas.	10
Figura 1-8: Enciclopedia de Tiangong Kaiwu, 1637, escrita por Song Yingxing (1587-1666) de la Dinastía Ming	11
Figura 1-9: Acuña manual y mediante prensa de balancín de Nicolas Briot (1626) y de Alfred H. Schütte (1913)	11
Figura 1-10: La fuerza motriz para todas las máquinas... ..	16
Figura 1-11: Torno de roscar construido por Jesse Ramsden en 1778.	16
Figura 1-12: Principales impulsores de las máquinas-herramienta, según “A history of machine tools”, Bradley (1972). Genealogía extraída de Roe (1916).	17
Figura 1-13: Prensa de tornillo para punzonado y corte de metales.	19
Figura 1-14: Diagrama del martillo de vapor patentado por James Nasmyth (ilustración de 1854). Boceto Roe (1916).	19
Figura 1-15: Troqueles Patentados por Marc Lariviere (1825) y Julius Jefferys (1836) Respirador de Jeffrey (Cortesía de Trustees, the Science Museum).....	21
Figura 1-16: 1.Troquel de corte. 2. Troquel de embutición. (Lucas 1897).	23

Figura 1-17: 3. Troquel de doblado. (Lucas 1897). 4. Troquel para acuñar (Smith 1896).....	23
Figura 1-18: 2.Troquel compuesto. 3. Troquel seccional. (Lucas 1897).....	24
Figura 1-19: Troquel “Gang die”. (Woodworth 1903).....	24
Figura 1-20: Troquel “Follow die”. (Lucas 1897).....	25
Figura 1-21: Troqueles progresivos. (Wilson 1898).....	26
Figura 1-22: Taller artesanal de mediados del s. XVIII. (Enciclopedia Diderot- D´Alambert 1751)	27
Figura 1-23: Segunda y tercera láminas referidas a “Chainitier”. (Enciclopedia Diderot-D´Alambert 1751).....	28
Figura 1-24: Troqueles para la fabricación de cadenas. (Holtzapffel 1852)	29
Figura 2-1: Punzonado de chapa metálica.....	35
Figura 2-2: Forma de determinar gráficamente el juego entre punzón y matriz (Rossi and Fortet Gay 1971).....	36
Figura 2-3: Doblado.	37
Figura 2-4: Proceso de embutición.....	38
Figura 2-5: Elementos de un troquel progresivo	41
Figura 2-6: Punzonado y abocardado	43
Figura 2-7: Troquel en su posición inicial.....	44
Figura 2-8: Proceso de trabajo del troquel	44
Figura 2-9: Proceso de diseño según Cheok (1998).....	47
Figura 2-10: Proceso de diseño según Choi (1999).....	48
Figura 2-11: Proceso de diseño de un troquel progresivo.	49
Figura 2-12: Secuencia del diseño de Banda	50
Figura 2-13: Desarrollo Plano.....	51
Figura 2-14: Factor K	52
Figura 2-15: Longitud desplegada según DIN 6935.....	53

Figura 2-16: Distribución de la figura y anidamiento.....	56
Figura 2-17: Etapas del troquel.....	57
Figura 2-18: Conjunto de Punzón y Matriz.	62
Figura 2-19: Juego entre el punzón y la matriz.	63
Figura 2-20: Ángulo de desahogo.....	65
Figura 2-21: Proceso de diseño de herramientas de corte.	66
Figura 2-22: División de la banda considerando el punto más cercano al contorno.	68
Figura 2-23: Opciones de división de banda.	69
Figura 2-24: División de banda en piezas simétricas. El lado del rectángulo coincide con el eje de simetría de la pieza.....	70
Figura 2-25: División de la banda en la que el eje de simetría de la división coincide con eje de simetría de la pieza.....	71
Figura 3-1: Mínimo rectángulos que contiene la figura	77
Figura 3-2: Distribución de la figura.....	77
Figura 3-3: Ángulo de las aristas respecto al horizontal	78
Figura 3-4: Posiciones a considerar.....	78
Figura 3-5: Envolvente convexa.....	79
Figura 3-6: Distribución final.....	79
Figura 3-7: Rotación de la figura.....	80
Figura 3-8: Solución óptima.....	81
Figura 3-9: Distribución de la figura variando el incremento de ángulo.	82
Figura 3-10: Suma de Minkowski de dos puntos (a) y de dos figuras (b).....	84
Figura 3-11: (a) Suma $A \square (-B)$ y (b) Suma $A \square (-A)$	85
Figura 3-12: Ancho de banda y paso	85
Figura 3-13: Direcciones a considerar para obtener la dirección óptima de la banda.....	86

Figura 3-14: Solución óptima del anidamiento.....	88
Figura 3-15: Caso 1.....	89
Figura 3-16: Posición óptima caso 1.....	89
Figura 3-17: Caso 2.....	90
Figura 3-18: Resultados: (sup) Mínimo rectángulo; (inf) Rotacional y Minkowski.....	90
Figura 3-19: Caso 3.....	91
Figura 3-20: Resultados: (sup) Mínimo rectángulo; (inf) Rotacional y Minkowski.....	91
Figura 3-21: Caso 4.....	92
Figura 3-22: Resultados: (a) Mínimo rectángulo; (b) Rotacional;(c) Minkowski.....	92
Figura 3-23: Caso 5.....	93
Figura 3-24: Resultado del caso 5.....	93
Figura 3-25: Caso 6.....	94
Figura 3-26: Resultados correspondientes al caso 6.....	95
Figura 3-27: Función lógica para la regla de relación.	100
Figura 3-28: Función lógica para la regla de longitud de corte.	101
Figura 3-29: Función lógica para la regla de proximidad.....	102
Figura 3-30: Función lógica para la regla de distancia.	102
Figura 3-31: Función lógica para la regla de plano independiente.	103
Figura 3-32: Función lógica para la regla angular.	103
Figura 3-33: Función lógica para la regla de conformado simultáneo.	104
Figura 3-34: Función lógica para la regla de dirección de alimentación.....	104
Figura 3-35: Pieza ejemplo y elementos considerados.....	110
Figura 3-36: Diseño de banda según la secuencia obtenida por el método fuzzy.	113

Figura 3-37: Representación esquemática del proceso.....	115
Figura 3-38: Pieza ejemplo y componentes de la misma. Descomposición en elementos básicos	119
Figura 3-39: Relaciones entre los diferentes componentes de la pieza.	120
Figura 3-40: Diagrama relacional de la pieza.	122
Figura 3-41: Diagrama resultante de la asignación de los procesos de trabajo	126
Figura 3-42: Orden de las operaciones	127
Figura 3-43: Reordenación del diagrama.....	128
Figura 3-44: Perfiles de las herramientas de corte según la secuencia elegida (a) (b).....	130
Figura 3-45: Diagrama modificado.....	130
Figura 3-46: Diseño de banda según la secuencia obtenida.	131
Figura 3-47: Representación esquemática de la aplicación.	132
Figura 3-48: Organigrama del módulo de identificación de elementos.....	134
Figura 4-1: Bisagra.	140
Figura 4-2: Componentes geométricos.....	141
Figura 4-3: Diagrama relacional de la bisagra.	142
Figura 4-4: Diagrama operacional/relacional.	143
Figura 4-5: Secuencia de operaciones.	144
Figura 4-6: Diseño de banda (preliminar) según las etapas de la figura 4-5.....	146
Figura 4-7: Optimización del diseño de banda.....	147
Figura 4-8: División de la banda.	150
Figura 4-9: Obtención del perfil de la herramienta.	151
Figura 4-10: Herramienta de corte.	151
Figura 4-11: Matriz de la herramienta de corte.	152
Figura 4-12: Conjunto herramienta de corte-banda.	152

Figura 4-13: Herramienta de doblado y calibrado.	153
Figura 4-14: Matriz de la herramienta de doblado y calibrado.....	154
Figura 4-15: Perfil de la herramienta.	155
Figura 4-16: Punzón y matriz de corte.....	156
Figura 4-17: Diseño de banda y herramientas.	157
Figura 4-18: Placa portamatrices.	159
Figura 4-19: Placa suplemento.	160
Figura 4-20: Placa base inferior.	161
Figura 4-21: Parte inferior del troquel.	161
Figura 4-22: Pisador.....	162
Figura 4-23: Placa pisador.	163
Figura 4-24: Placa herramientas.	164
Figura 4-25: Placa sufridera.....	165
Figura 4-26: Placa suplemento.	166
Figura 4-27: Placa base superior.....	167
Figura 4-28: Parte superior del troquel.	167
Figura 4-29: Diferentes vistas del troquel.....	168
Figura 4-30: Perspectiva del troquel.	169
Figura 4-31: Soporte de muelle tensor.....	170
Figura 4-32: Componentes del soporte.....	170
Figura 4-33: Diagrama relacional del soporte.	171
Figura 4-34: Diagrama relacional y de operaciones.	172
Figura 4-35: Definición de las etapas.	172
Figura 4-36: Diseño de banda inicial.	173
Figura 4-37: Herramientas de corte no normalizadas.	174
Figura 4-38: Diagrama modificado.....	175

Figura 4-39: Diseño de banda modificado.....	175
Figura 4-40: Herramientas no normalizadas en el nuevo diseño de banda.	176
Figura 4-41: Pieza nº 3.....	177
Figura 4-42: Diagrama relacional de la pieza 3.....	178
Figura 4-43: Diagrama de operaciones.....	179
Figura 4-44: Diagrama de operaciones ordenado.....	179
Figura 4-45: Diseño de banda final.....	181
Figura 4-46: Diagrama modificado.....	182
Figura 4-47: Perfiles de las herramientas de corte.....	183
Figura 4-48: Herramientas diseñadas.	183
Figura 4-49: Pieza 4.....	184
Figura 4-50: Diagrama relacional de la pieza 4.....	185
Figura 4-51: Diagrama de operaciones de la pieza 4.....	186
Figura 4-52: Diagrama de operaciones ordenado de la pieza 4.....	186
Figura 4-53: Diagrama de operaciones de la pieza 4 modificado.....	187
Figura 4-54: Diseño de banda de la pieza 4.....	188
Figura 4-55. Distribución primera.	189
Figura 4-56: Distribución de figuras inversas.....	189
Figura 4-57: Perfiles de las herramientas de la pieza 4.	190
Figura 4-58: Perfil de corte de la etapa nº 4.....	190
Figura 4-59: Herramientas diseñadas de la pieza 4.	191
Figura 4-60: Pieza 5.....	192
Figura 4-61: Diagrama relacional de la pieza 5.....	192
Figura 4-62: Diagrama de operaciones de la pieza 5.....	193
Figura 4-63: Disposición de la pieza 5.	194
Figura 4-64: Diagrama de operaciones de la pieza 5 modificado.....	195

Figura 4-65: Diseño de banda de la figura 5.....	196
Figura 4-66: Posición de los perfiles de las herramientas.	196
Figura 4-67: Perfiles de las herramientas.	197
Figura 4-68: Conjunto banda-Herramientas de corte.	197
Figura AI 1: Formulario de petición de datos comunes.....	222
Figura AI-2: Elección del procedimiento a emplear.....	222
Figura AI-3: Formulario del procedimiento de mínimo rectángulo.	223
Figura AI-4: Formulario del procedimiento rotacional.	223
Figura AI-5: Formulario del procedimiento rotacional.	224
Figura AI-6: Área total.	225
Figura AI-7: Área útil y material de desperdicio.	225
Figura AI-8: Anchura máxima.....	226
Figura AI-9: Figura convexa y cóncava.	227
Figura AI-10: Envolverte convexa.....	227
Figura AI-11: Procedimiento Gift Wrapping.....	228
Figura AI-12: Resultados.....	229

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Juego recomendado para diferentes materiales. (Oehler-Kaiser et al. 1977)	35
Tabla 2-2: Ejemplo de tabla de plegado (ASM Handbook Vol. 14).....	54
Tabla 2-3: Fuerzas que intervienen en el proceso	58
Tabla 2-4: Juego recomendado en función de la calidad y precisión (ASM Handbook 1988).....	64
Tabla 2-5: Calidad del corte (ASM Handbook, 1988).	65
Tabla 3-1: Influencia de la variación del incremento de ángulo	83
Tabla 3-2: Resultados del caso 1	89
Tabla 3-3: Resultados del caso 2	90
Tabla 3-4: Resultados del caso 3.	91
Tabla 3-5: Resultados del caso 4.	92
Tabla 3-6: Resultados del caso 5.	94
Tabla 3-7: Resultados del caso 6.	95
Tabla 3-8: Matriz difusa de las operaciones de corte y punzonado.	105
Tabla 3-9: Matriz difusa de las operaciones de doblado.	106
Tabla 3-10: Matriz difusa conjunta.	106
Tabla 3-11: Matriz difusa con reglas ponderadas.	108
Tabla 3-12: Matriz difusa de las operaciones de corte de la pieza ejemplo.	111
Tabla 3-13: Matriz difusa de las operaciones de corte de la pieza ejemplo.	111
Tabla 3-14: Matriz difusa de la pieza ejemplo.	111
Tabla 3-15: MFV de la pieza ejemplo.	112
Tabla 3-16: Valoración final de las operaciones.	113

Tabla 3-17: Clasificación de elementos.....	117
Tabla 3-18: Elementos. Nomenclatura	118
Tabla 3-19: Asignación de operaciones a cada elemento y nomenclatura empleada	125
Tabla 3-20: Operaciones y etapas del troquel.....	128
Tabla 3-21: Secuencia de operaciones final.	131
Tabla 4-1: Nomenclatura de los componentes de la bisagra	141
Tabla 4-2: Nomenclatura modificada de la bisagra.....	142
Tabla 4-3: Componentes del soporte.....	171

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Capítulo I: Introducción

1.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DE LA TESIS.

El progreso en los procesos de fabricación tiende hacia los sistemas automatizados de producción, en los que se trata de controlar y verificar cada uno de los pasos de forma objetiva y fiable, mejorando la seguridad, por consiguiente, el modo de trabajar y de diseñar estas instalaciones y cada una de sus etapas se va modificando paulatinamente. Uno de los procesos de fabricación más importantes es el de conformado de piezas por medio de matrices o troqueles.

Se presentan a continuación algunas de las acepciones que el diccionario de la RAE da a algunas de las denominaciones más características de este proceso de fabricación.

Conformar:

2. Dar forma a algo.

Matriz:

2. Molde en que se funden objetos de metal que han de ser idénticos.
3. Molde de cualquier clase con que se da forma a algo.

Troquel:

1. Molde empleado en la acuñación de monedas, medallas, etc.
2. Instrumento análogo de mayores dimensiones, que se emplea para el estampado de piezas metálicas.
3. Instrumento o máquina con bordes cortantes para recortar con precisión planchas, cartones, cueros, etc.

En el caso de matriz, a la que se hace referencia en esta tesis, la acepción utilizada es la tercera. La primera acepción de troquel es de interés por su transcendencia histórica y la tercera acepción se va a referir en esta tesis a planchas y flejes metálicos.

Un aspecto que caracteriza al diseño de estas herramientas es la tradición y el empirismo, pues intervienen factores que dificultan la sistematización de estos diseños, como son:

- El producto a fabricar y las prensas de que se dispone, que determinan la matriz a diseñar.
- La confluencia de numerosos factores tecnológicos.
- Muchos de los componentes de una matriz o estampa se han de fabricar de forma específica para ésta. Otros están normalizados, pero su variedad es muy amplia.
- Se realiza sólo un modelo para cada pieza a producir (sólo en casos excepcionales son varias).

Las matrices progresivas tienen una complejidad añadida, pues realizan numerosos pasos sucesivos en cada golpe de prensa, lo cual permite realizar las piezas en una sola máquina, optimizando la utilización de recursos.

El **objetivo de la tesis** es pues contribuir a la sistematización en el diseño de matrices progresivas e incorporar tecnologías avanzadas de fabricación, que faciliten y optimicen las matrices resultantes, aplicando, si es el caso, la simulación del producto.

Para ello se estructura el proceso de diseño y fabricación del troquel progresivo, se analizan las diversas fases en las que se ha estructurado, observando los procedimientos usualmente aplicados, optimizándolos o incorporando otros más novedosos. Finalmente se trata de integrarlos y ver la viabilidad de lo realizado.

1.2. RESEÑA HISTÓRICA.

Para realizar una aproximación a la situación actual en la que se encuentra la tecnología relacionada con los troqueles progresivos se presenta un reseña histórica en la que se muestra esquemáticamente como ha sido el desarrollo de la metalurgia y sus aplicaciones en las diferentes épocas y se aborda con mayor amplitud la aplicación del troquelado, los métodos artesanales y su evolución a procedimientos más sofisticados, precisos y productivos.

Se señalan asimismo, procedimientos de fabricación y organización que han contribuido a que los troqueles progresivos se hayan implantado y en estos momentos

sea una herramienta muy utilizada para fabricar numerosos productos, a pesar de su complejidad.

1.2.1 Edad del Bronce y del Hierro.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que los descubrimientos y progresos se producen de forma diferente según la época y el lugar y no de forma universal (figura 1-1), por lo que se muestran a continuación los hitos significativos en lo referente al proceso histórico que ha llevado al descubrimiento de la forja y estampación mediante troqueles progresivos.

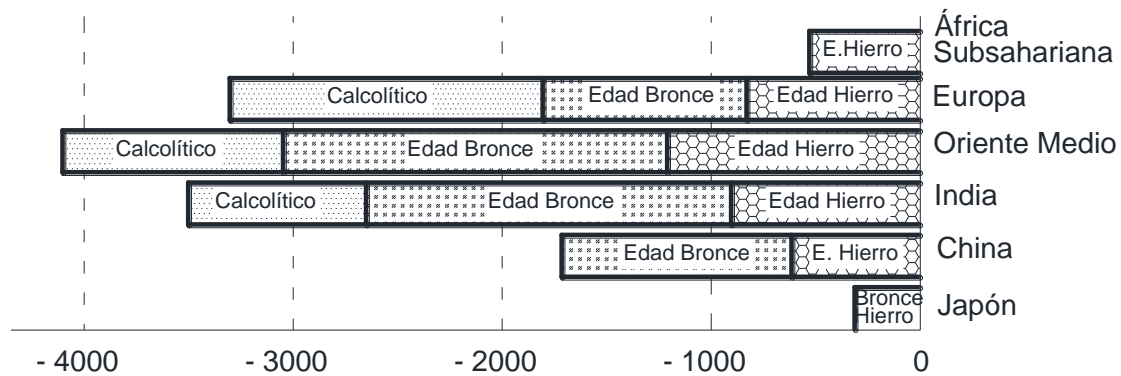


Figura 1-1: Línea del tiempo de la Edad de los Metales en el Viejo Mundo

El conformado metálico (forja y trabajo de chapa) es una de las tecnologías más usadas en la fabricación de productos metálicos, junto con la fundición y la pulvimetalurgia. Sin embargo, el conformado es posible que sea el más antiguo de los tres. Las referencias más antiguas del conformado describen el martilleo de oro y cobre en varias regiones de Oriente Medio alrededor del 8000 a. C. El conformado de estos metales era basto ya que el refinado por fundición no se conocía y porque la capacidad de trabajar el material estaba limitada por las impurezas que seguía habiendo después de que el metal se hubiera separado del mineral.

En la **Edad del cobre** o calcolítico, en la que se descubre el cobre y la posibilidad de fundirlo, alrededor del 4000 a. C., obteniéndose un método útil para purificarlo mediante reacciones químicas en estado líquido. Posteriormente, se descubrió que el “martilleo” del metal aumentaba su resistencia (endurecimiento por deformación), así

como su aleación con otros metales como las de cobre y estaño, dando lugar a la **Edad del Bronce**, hacia el tercer milenio a. C.

La **Edad del Hierro**, surge alrededor del siglo XII a .C., unos 1300 años después de la del Bronce. Aunque el hierro era conocido desde muy antiguo y se conocen algunas aplicaciones a partir de hierro meteórico y como objeto de gran lujo, pues era mucho más valorado que el oro o el cobre. La razón de este retraso se debe principalmente a la dificultad fundirlo y de depurarlo a partir de diferentes minerales de hierro.

1.2.2 Primeras manufacturas metálicas.

A partir del año 6500 a. C., se han encontrado piezas ornamentales y alfileres de cobre manufacturado a partir del martilleado en frío del metal nativo, en varios yacimientos, como en los Montes Zagros (Ali Kosh en Irán), o en la meseta de Anatolia (Çatal Hüyük, Çayönü o Hacilar, en Turquía). Pero es hacia el año 4000 a. C. cuando se encuentran las primeras piezas fundidas, así como utensilios para la fundición, como hornos, moldes o crisoles.

Los objetos más fabricados fueron: herramientas y armas, como hachas, (hacha-pico, martillo o azada) que permitieron el desarrollo agrícola, adornos (anillos, brazaletes y alfileres) que tenían un uso decorativo, objetos de culto, y utensilios para el hogar. Los objetos metálicos podían incluir también la utilización de oro y plata. Muchos de los objetos se han encontrado en las tumbas, en las que al difunto se le enterraba con sus bienes.

La Edad del Hierro se caracteriza por desarrollar la metalurgia para poder fundirlo y depurarlo, ya que es muy diferente a la del cobre y el bronce. Los Hititas, a mediados del 2º milenio, ya fabricaban y manufacturaban el hierro que enviaban a las civilizaciones vecinas, como egipcios, sirios, asirios, o fenicios. No fueron grandes productores ya que entonces el hierro era sumamente valioso (del orden de diez veces más que el oro y cuarenta veces más que la plata) por lo que uno de sus usos principales era para regalos con finalidad diplomática. Cuando cayó el imperio Hitita, sus artesanos se expandieron, generalizando su uso, que derivó, en Europa, a la fabricación de armas,

pues eran pueblos belicosos, utensilios de uso agrícola y artesanales. Lo cual aumentó la productividad y el nivel cultural del continente.

1.2.3 Máquinas-herramienta anteriores a la Revolución Industrial.

Se considera que las primeras máquinas-herramienta que aparecieron fueron los **tornos y taladros**, en principio eran muy rudimentarios y de accionamiento manual. Merece reseñarse que en el torneado es necesario generar un movimiento de rotación de la pieza para lo cual se utilizaba una de las manos, mientras que en el taladrado lo que se hace girar es la herramienta. Para realizar la rotación de la pieza, se han empleado diversos sistemas que han estado en uso en diversas civilizaciones hasta épocas muy recientes (figura 1-2).

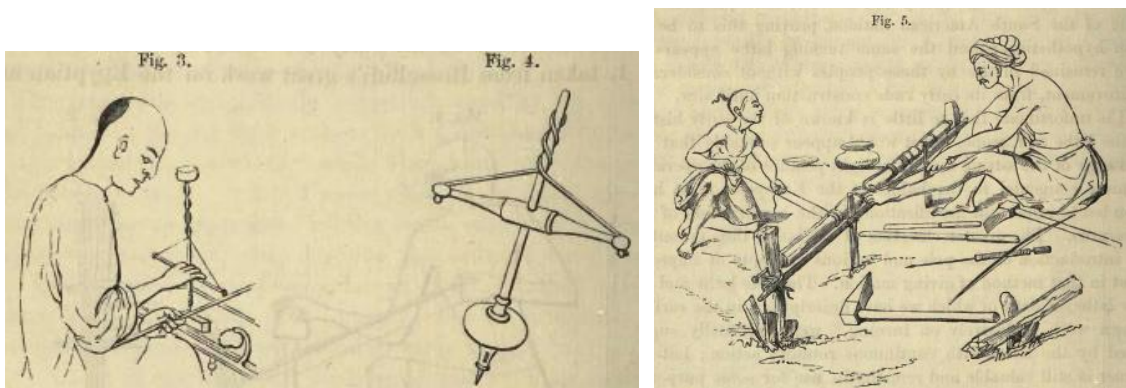


Figura 1-2: Técnicas empleadas en el s XIX según Holtzapffel (1852) en vol. 4 “The principles and practice of hand or simple turning.”

Sin embargo el sistema más generalizado fue el denominado “arco de violín” (figura 1-3), instrumento de accionamiento giratorio alternativo compuesto de un arco y una cuerda, utilizado desde hace miles de años hasta la actualidad, en que todavía se emplea de forma residual.



Figura 1-3: Arco de violín, Museo de Máquina-Herramienta de Elgoibar, Guipuzcoa. Mendelsches Bruderbuch, 1395.

La referencia gráfica más antigua de que se dispone es un sobrerrelieve en la tumba de Petosiris, del s. III a.C. (figura 1-4) Si bien, hay constancia de objetos y utensilios en los que se aplicó el torneado en el s. VII a. C.

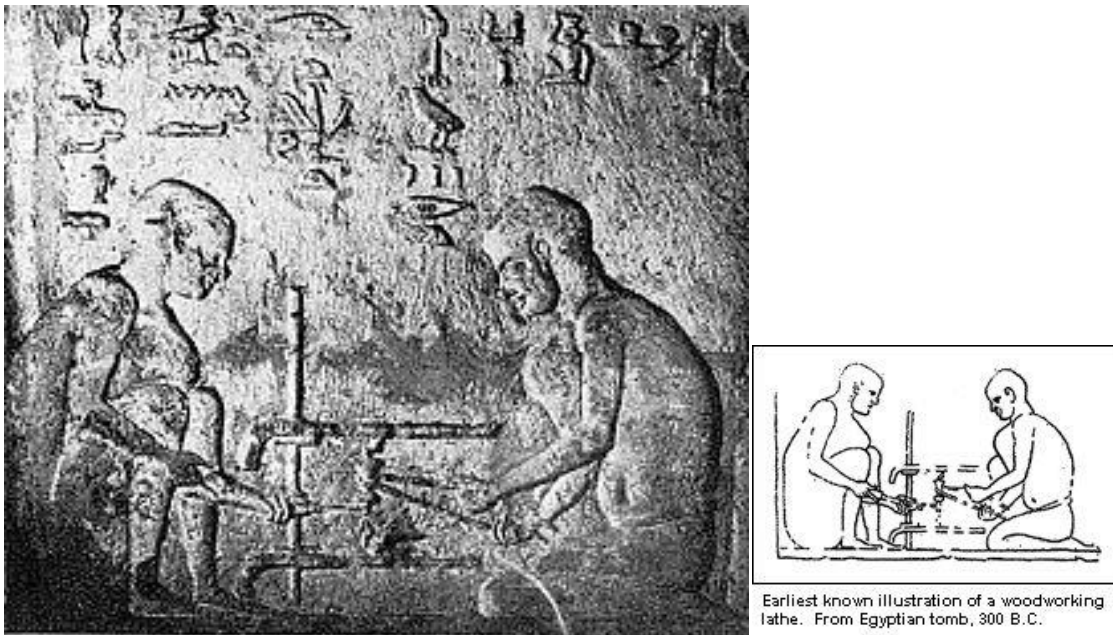


Figura 1-4: La referencia más antigua de un torno es la ilustración en una tumba egipcia de 300 a. C. aproximadamente.

Son interesantes las ilustraciones del “*Libro de los Juegos*” de Alfonso X “El Sabio” (1283), en las que se muestran los sistemas de fabricación de piezas de juego torneadas (figura 1-5).



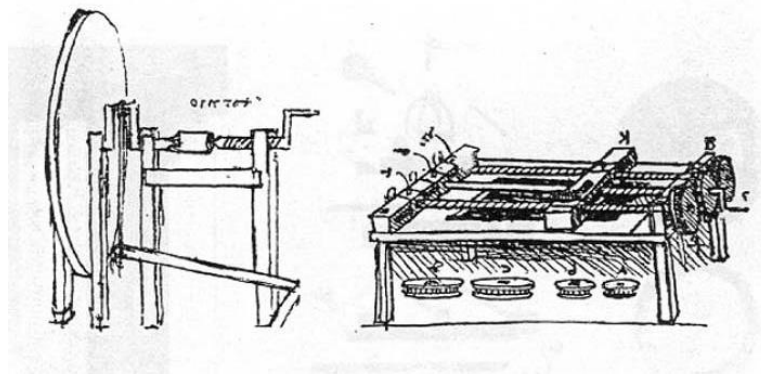
Figura 1-5: Fabricación de piezas torneadas mediante arco de violín. “Libro de los Juegos” de Alfonso X “El Sabio”

Hacia 1250 surge el torno de pedal y pértiga flexible accionado con el pie (figura 1-6), que representó un gran avance sobre al accionado con arco de violín, puesto que permitía tener las manos libres para el manejo de la herramienta de torneado.



Figura 1-6: Torno de polea. Mendelsches Bruderbuch 1395 (Derry 1993).

Hasta finales del siglo XV no se producen nuevos avances, en el “Códice Atlántico” (Leonardo da Vinci 1600) realizó bocetos sobre tornos (figura 1-7), que si bien no pudieron construirse en su época por falta de medios, sirvieron de referencia posteriormente. Uno de ellos consistía en un torno de roscar de giro alternativo, otro de giro continuo a pedal y un tercero para roscado con husillo patrón y ruedas intercambiables.



SKETCHES BY LEONARDO DA VINCI show several remarkable innovations in machine design. The lathe at left has a treadle, a crankshaft and a large flywheel. The tailstock spindle can be adjusted by a hand crank. The device at right is a screw-cutting machine (not strictly a lathe), which has a set of change gears for cutting threads of various pitches.

Figura 1-7: Torno de pedal con volante de inercia. Máquina para fabricar roscas.

El descubrimiento de la combinación del pedal con un vástago y una biela permitió su aplicación a los tornos. Así nació el torno de giro continuo, llamado de pedal y rueda, basado en el mecanismo biela-manivela, que debía de completarse con un volante de inercia para superar los puntos muertos “superior e inferior” (figura 1-7).

Forja: el martillo parece que es una de las primeras herramientas que se fabricó. Alrededor de 1.400 a. C. los Hititas en la antigua Mesopotamia descubrieron que el hierro podía ser producido en hornos a partir de mineral de hierro, aunque se sabe, que ya antes se forjó, si bien este hierro era de origen meteórico.

La forja manual fue el método utilizado prácticamente hasta el siglo XIII, en que se empezó a usar la fuerza del agua para mover el martillo pilón en las ferrerías, pudiéndose considerar éste como el origen de la máquina-herramienta aplicada a la forja. Se tienen referencias de su uso en China en los inicios de nuestra era, según muestra la “*Enciclopedia Tiangong Kaiwu*” (1637), escrita por Song Yingxing (1587-1666) de la Dinastía Ming (figura 1-8). Este mecanismo fue también descrito por Herón de Alejandría (10-70 d. C.). Georgius Agricola en su libro “*De Re Metallica*” publicado en 1556 describe un martillo accionado con una rueda hidráulica. Este mecanismo permaneció en servicio durante varios siglos.

Al desarrollo de los equipos de forja le siguió el de **laminación**. Leonardo Da Vinci alrededor de 1500 realizó diversos bocetos sobre máquinas para laminar, cortar y prensas de balancín para estampación.

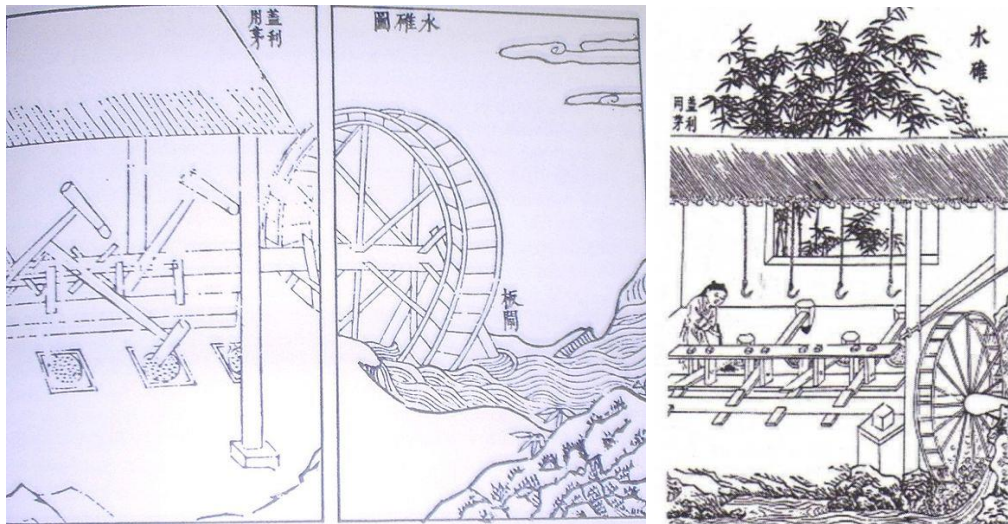


Figura 1-8: Enciclopedia de *Tiangong Kaiwu*, 1637, escrita por Song Yingxing (1587-1666) de la Dinastía Ming

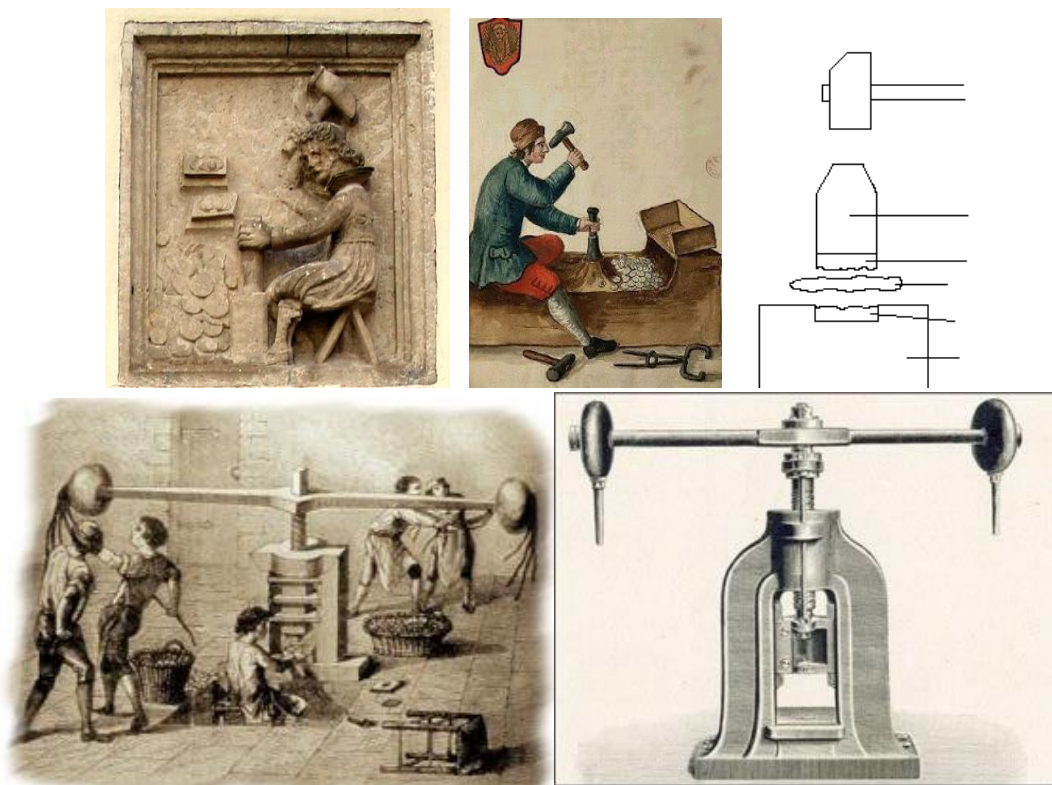


Figura 1-9: Acuñado manual y mediante prensa de balancín de Nicolas Briot (1626) y de Alfred H. Schütte (1913).

La prensa de volante o balancín diseñada por Leonardo Da Vinci se aplica de forma generalizada para el **acuñado** de monedas a partir de 1616 cuando el grabador francés Nicolás Briot (1579-1646) la construye basándose en dicho diseño (figura 1-9), el cual

se mantiene vigente con ligeras modificaciones, hasta bien entrado el siglo XX. En 1783 el ingeniero suizo Jean Pierre Droz (1740-1823) lo perfecciona permitiendo la acuñación simultánea del anverso, reverso y canto.

1.2.4 La Revolución industrial.

La Revolución Industrial fue un período comprendido entre 1750 y 1850 en el que los cambios en agricultura, manufactura, minería, transporte y tecnología ocasionaron grandes cambios en la forma de vida de la época, tanto en lo social como en lo económico y cultural. Comenzó en Gran Bretaña, y posteriormente se extendió por toda Europa Occidental, América del Norte, Japón, y finalmente el resto del mundo.

Merece destacarse que el nivel de vida de la población inició un crecimiento sostenido sin precedentes. Durante los siglos XIX y XX el promedio mundial del ingreso per cápita se multiplicó por diez, en tanto que la población mundial se multiplicó por seis.

En Gran Bretaña se dieron unas condiciones sociales que permitieron que surgiera la Revolución Industrial, tales como un periodo de paz y estabilidad, la unificación de Inglaterra y Escocia, la desaparición de barreras comerciales entre ambos, el Estado de Derecho (por el que se hacen respetar los contratos), un sistema legal simplificado que permitió la formación de sociedades anónimas (corporaciones), y un mercado libre (capitalista).

Se inició un proceso de transición de la actividad basada en el trabajo manual y en la tracción animal hacia una economía basada en la fabricación mecanizada. Comenzó con la mecanización de la industria textil, el desarrollo de la metalurgia del hierro y sus técnicas de fabricación empleando carbón refinado. La expansión del comercio fue posible gracias a la construcción de canales, viales y ferrocarriles. Se pasó de una economía basada en la agricultura hacia otra basada en la producción fabril y se produjo una gran afluencia de población del campo hacia los pueblos y ciudades, que aumentaron su población.

Los cambios fundamentales en los sistemas de fabricación que permitieron que surgiera la Revolución Industrial fueron: la fabricación de piezas intercambiables, los

tornos y otras máquinas-herramientas que mejoraron la precisión de los productos fabricados de forma considerable y la fabricación en serie de piezas con gran precisión.

Estos cambios en la capacidad de producción fueron posibles gracias a la mayor utilización de las ruedas hidráulicas para el accionamiento de la maquinaria (principalmente en la industria textil), al descubrimiento de la máquina de vapor, al desarrollo de las máquinas-herramienta durante las dos primeras décadas del siglo XIX que permitieron la fabricación de máquinas de producción en otros sectores industriales. Los efectos que estos cambios produjeron se extendieron por toda Europa Occidental y América del Norte durante el siglo XIX, afectando finalmente al resto del mundo, un proceso que continúa a medida que la industrialización se va implantando.

Puede decirse que el inicio de la Revolución Industrial está estrechamente relacionado con unas pocas innovaciones que tuvieron lugar en el siglo XVIII:

- En la industria textil, fueron un conjunto de innovaciones, como la hiladora continua multi-carrete inventada en 1764 por James Hargreaves, la máquina de hilar la lana o el algodón desarrollada por Richard Arkwright empleando la energía hidráulica, que fue patentada en 1769.

- La máquina de vapor inventada por James Watt, patentada en 1775. Al principio se utilizó principalmente para el bombeo de agua de las minas, pero a partir de la década de 1780 se aplicó para mover de otros tipos de máquinas.

- Metalurgia del hierro, en la que el carbón se aplica en todas las etapas de la fundición del hierro, en sustitución del carbón vegetal. Ya se utilizaba mucho antes para el plomo y el cobre, así como para la producción de arrabio en alto horno, pero no en las etapas de afino mediante el sistema de colada y laminación o en hornos de reverbero (patentado por Henry Cort en 1784).

Fue también importante el redescubrimiento del cemento hidráulico en 1756 por el británico John Smeaton, que estuvo relegado en el olvido durante 1300 años.

Se considera que en 1850 se inició la segunda Revolución Industrial, en la que se impulsó el progreso tecnológico y económico gracias al desarrollo de los barcos a

vapor, los ferrocarriles y más tarde, en las postrimerías del siglo XIX, con el motor de combustión interna y la generación de energía eléctrica.

El inicio y duración de la Revolución Industrial varía según distintos historiadores y según los países. Francia, Alemania (en las zonas de Turingia y Sajonia) y Bélgica se industrializaron entre 1850 y 1914. Otros países siguieron un modelo de industrialización diferente y más tardía: Italia, Imperio austrohúngaro, España o Rusia en los que se inició tímidamente en las últimas décadas del siglo XIX, para terminar mucho después de 1914.

1.2.5 Producción en serie.

Otra de las características de la Revolución Industrial es la tendencia a la fabricación de series de productos de las mismas características o producción en serie, consecuencia del paso de la producción artesana e individualizada a otra industrial. Para ello se fueron desarrollando conceptos y formas de trabajar en los que se trataba de **unificar criterios**, de **racionalizar** la producción, es decir, consiste en realizar series más largas reduciendo la gama de productos semejantes, cubriendo las necesidades para producirlo satisfactoriamente. Y también, de facilitar la **intercambiabilidad**. Estos conceptos llevaron a la **normalización**, un proceso que sigue evolucionando actualmente.

Este es un avance notable, ya que todos los componentes de cada máquina llevaban una elaboración artesanal y específica para cada una de ellas. La división del trabajo y la especialización conlleva que se unifiquen ciertos criterios, de modo que elementos que se fabrican independientemente, puedan montarse en máquinas que realizan otros. Los primeros elementos en los que se aplicaron estos principios fueron las roscas, impulsado por Whitworth.

Los primeros intentos de fabricación de piezas intercambiables fueron realizados por Honoré Blanc (1736-1801) en 1778 en la fabricación de mosquetes. Téngase en cuenta que no se disponía de micrómetros o calibres, ni estaban desarrollados los conceptos relacionados con las tolerancias, por lo que aplicó la comparación con un modelo patrón, desarrollando plantillas y métodos de trabajo que permitían obtener la intercambiabilidad entre las partes del mosquete. Este sistema de intercambiabilidad se

trasladó a Estados Unidos donde realmente alcanzó su mayor arraigo y desarrollo, por medio de Thomas Jefferson, entonces embajador en Francia, quien en 1785 contactó con Honoré Blanc. Para ello contó con Eli Whitney (1765-1825) quien lo aplicó en la fabricación de 12000 mosquetes en 1798, desarrollando para ello un conjunto de herramientas con las que fabricar las diferentes partes intercambiables que lo componían.

El sistema de intercambiabilidad se perfeccionó en las décadas siguientes por otros fabricantes de armas como John Hall, Simeon North, Eli Terry...

1.2.6 El auge de las máquinas-herramienta.

La revolución industrial se caracteriza por la evolución que hubo de las herramientas hacia las máquinas-herramienta. Historiadores de la tecnología consideran que las máquinas-herramienta surgen cuando se eliminó la actuación directa del hombre en el proceso de dar forma o troquelar otras piezas, generalmente metálicas y que pueden servir para hacer otras máquinas con las cuales producir bienes. Otro aspecto que las define es la fuente de energía que las mueve, distinta a la humana o animal (figura 1-10). Por ejemplo, se considera que el primer torno que se puede considerar máquina-herramienta fue el inventado alrededor de 1751 por Jacques de Vaucanson, puesto que fue el primero que incorporó un carro portaherramientas, extrayéndolo de las manos del operario.



Figura 1-10: La fuerza motriz para todas las máquinas de la fábrica proviene del eje central situado en el techo, que era accionado por una rueda hidráulica exterior. Las máquinas estaban conectadas al eje por medio de correas de transmisión.

En los siglos XVII y XVIII, los fabricantes de relojes e instrumentos científicos usan tornos y máquinas de roscar de gran precisión, destacando el torno de roscar del británico Jesse Ramsden construido en 1778 (figura 1-11). En un soporte de hierro de perfil triangular se colocaba el portaherramientas, que podía deslizarse longitudinalmente. Con una manivela accionada a mano y a través de un juego de engranajes hacía girar la pieza a roscar colocada entre puntos y, al mismo tiempo, por medio de un husillo de rosca patrón se conseguía el avance o paso de rosca deseado.

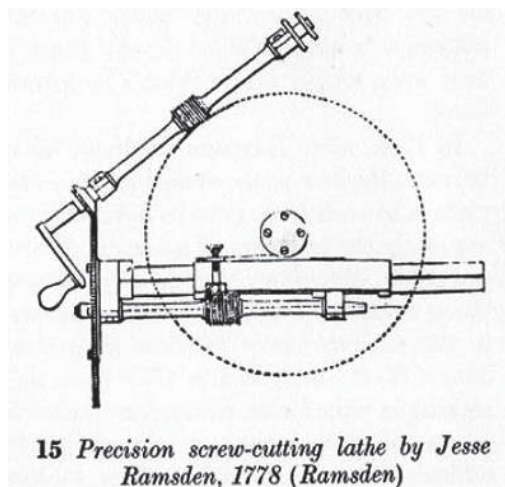


Figura 1-11: Torno de roscar construido por Jesse Ramsden en 1778 (Derry 1993).

El torno desarrollado por Vaucanson fue el punto de partida para otros inventores que lo desarrollaron y perfeccionaron, tales como: Henry Maudslay, David Wilkinson, Thomas Blanchard... (figura 1-12).

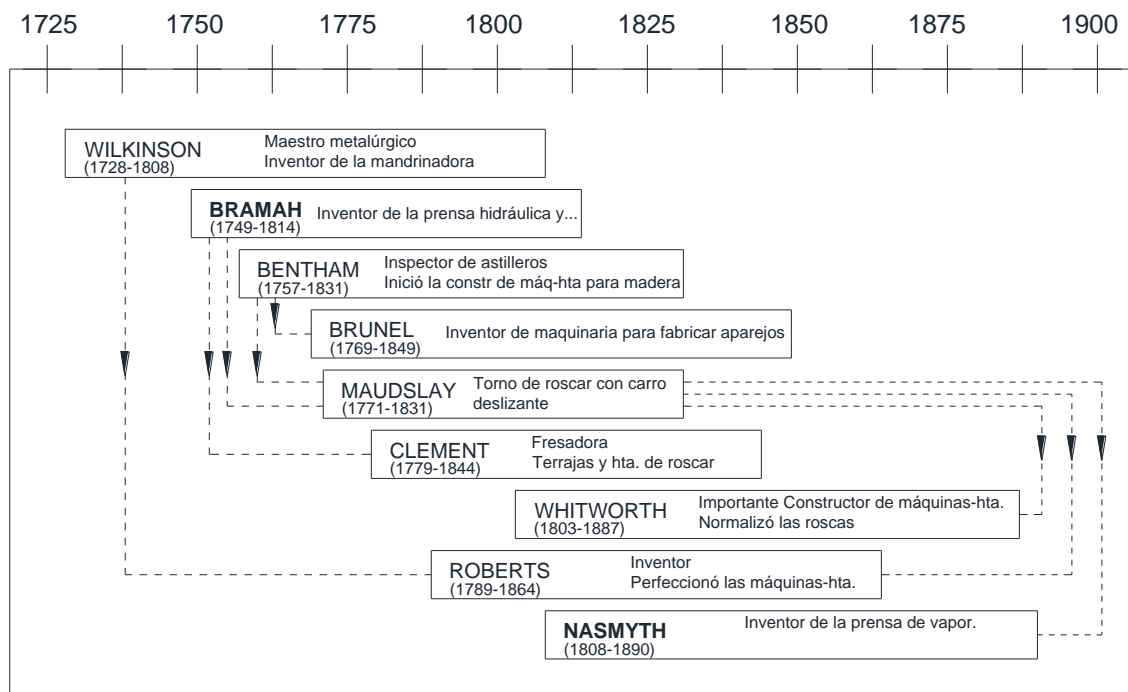
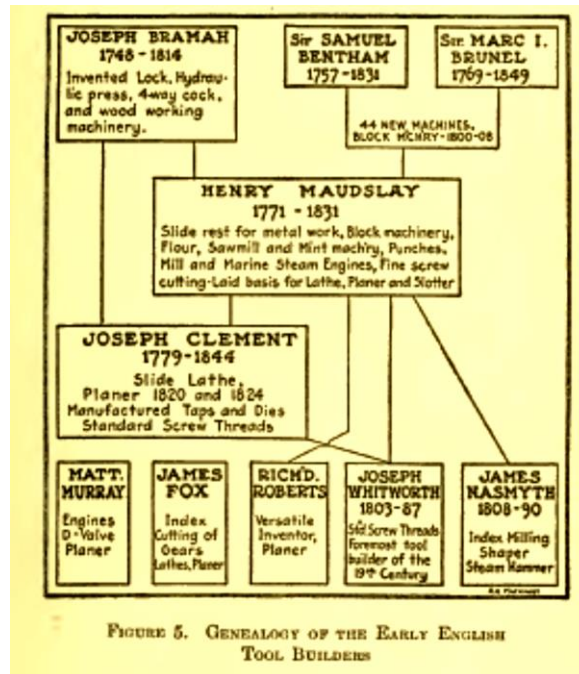


Figura 1-12: Principales impulsores de las máquinas-herramienta, según “A history of machine tools”, Bradley (1972). Genealogía extraída de Roe (1916).

El siglo XIX se caracteriza por el espectacular auge y desarrollo de la máquina-herramienta. Si la máquina de vapor fue el motor que hizo posible el desarrollo de las máquinas, proporcionando la energía necesaria, el desarrollo industrial del siglo XIX fue posible gracias al diseño y fabricación de diversos tipos de máquinas y procesos de trabajo, aplicados a la fabricación de piezas metálicas de todo tipo. La fabricación de las máquinas de vapor, barcos, material de ferrocarril, automóviles, trenes de laminación para la siderurgia, maquinaria textil etc., solamente se puede realizar mediante máquinas-herramienta. Con la particularidad de que la máquina-herramienta es el único medio con el que se pueden fabricar otras máquinas-herramienta.

1.2.7 Forja, troquelado, estampación.

El troquelado consiste en la aplicación de grandes fuerzas mediante **troqueles**, que se ajustan en prensas troqueladoras, cuya función es guiar y controlar las grandes presiones que se aplican, durante un período de tiempo muy breve, menores de un segundo, realizando operaciones de corte (cizallado) o deformación del material.

El troquelado pasa de ser un proceso eminentemente manual a otro mucho más tecnificado, obteniendo piezas con mejores tolerancias y en grandes series, lo que abarató considerablemente el coste unitario.

Una de las máquinas más antiguas empleadas en la forja y otros usos, es el martillo pilón movido por una rueda hidráulica (figura 1-8). Los batanes o las almazaras son máquinas que guardan cierto parecido con las anteriores.

El troquelado o la estampación es una operación de conformado del metal, en la que se requiere de una prensa adecuada al objeto a fabricar. Muchos de ellos se han realizado mediante la prensa de volante o balancín (figura 1-9) y de tornillo (figura 1-13), como el acuñado de monedas. Pueden tener gran tamaño y ejercer grandes fuerzas, suficientes para muchos trabajos y piezas.

Un salto cualitativo se da al construir la primera prensa hidráulica por el británico Joseph Bramah, que la patentó en 1770, siendo el primero que aplicó para fines industriales los principios enunciados por Blaise Pascal en su *“Tratado del equilibrio de los líquidos”* en 1650. Esta prensa hidráulica conseguía presiones relativamente

pequeñas para poder ser utilizada en el conformado de metales. Años más tarde los hermanos Perrier desarrollaron la máquina de Bramach alcanzando presiones más elevadas, del orden de 70 kg/cm^2 , apta para la realización de trabajos más duros. Se aplicó para el acuñado de monedas.

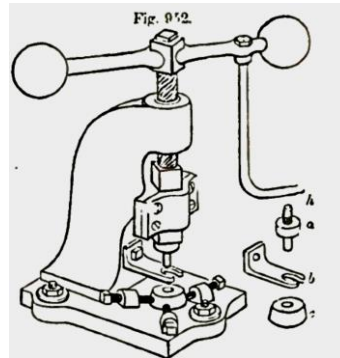


Figura 1-13: Prensa de tornillo para punzonado y corte de metales.

James Nasmyth construye en 1842 la primera prensa en la que aplica el uso del vapor para acelerar la caída del martillo aumentando sustancialmente la potencia con lo que se pudieron forjar los cigüeñales de grandes buques (figura 1-14).

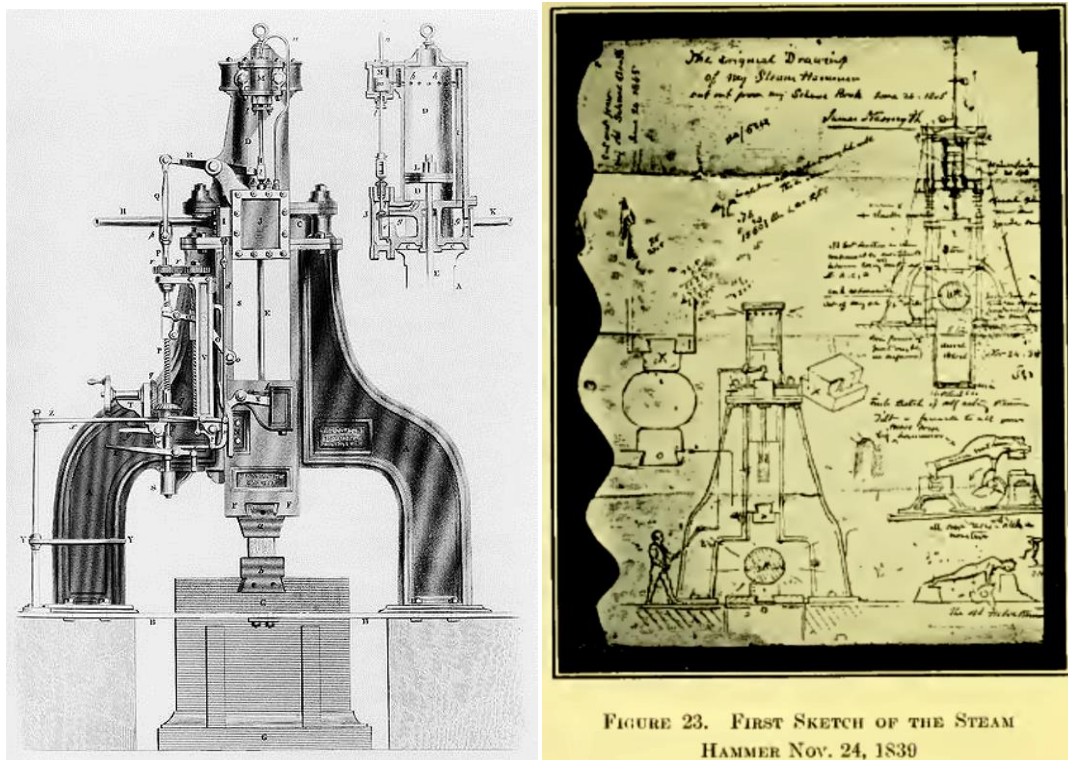


Figura 1-14: Diagrama del martillo de vapor patentado por James Nasmyth (ilustración de 1854). Boceto Roe (1916).

En el troquelado y estampación es fundamental el **troquel**, que puede tener usos muy diversos como son: la acuñación de monedas, medallas, etc., el recorte por presión de planchas, cartones, cueros, etc. o el corte, punzonado o conformado de placas metálicas utilizando la deformación plástica de éstas sin generar arranque de viruta. A éstos últimos también se los denominan **matrices**.

A finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, van apareciendo las primeras patentes en las que se observa la utilización de troqueles más elaborados y complejos para la fabricación de determinada maquinaria. En la segunda mitad del siglo XIX y principios del siglo XX se produce el mayor desarrollo en el diseño de troqueles y de piezas troqueladas, mostrando éstos la mayor parte de las características presentes en los troqueles actuales.

Generalmente las patentes se referían a la maquina o herramienta diseñada, si bien, a menudo se mostraba el procedimiento de fabricación, por lo que cuando se realizaban mediante troquelado o estampación, la patente incluía las matrices correspondientes. Algunos ejemplos de ello pueden verse en la figura 1-15, que muestra las patentes de Marc Lariviere de una maquina empleada para perforar metales, y la de Julius Jefferys referida a un aparato para ayudar a respirar, en la que se incluía el troquel para la fabricación de ciertas partes de dicho respirador. Estos troqueles estaban diseñados principalmente para su empleo en prensas de tornillo (figura 1-13).

En las descripciones que a continuación se transcriben, de las patentes de Lariviere y Jefferys, extraídas de “Turning and mechanical manipulation” (Holtzapffel 1852) ,se observa que algunas de las innovaciones incorporadas se encuentran en los troqueles más modernos:

“La máquina de Lariviere sirve para realizar punzonados precisos en objetos muy variados. El troquel consiste en una placa de acero, llamada placa punzón, que está perforada en algunos casos con una sola fila de agujeros equidistantes avellanados en su parte superior. Cada uno de los agujeros sirve de guía para un punzón cilíndrico de acero en el que la forma de la cabeza se ajusta al avellanado de la placa punzón, de este modo retorna con la placa al ascender la prensa. La “bed punch” o matriz está perforada de modo que los agujeros se corresponden con los punzones. En cada golpe se punzona

en la chapa una fila de agujeros a la vez y en cada ciclo, la chapa se desplaza lateralmente al deslizarse mediante un tornillo hasta alcanzar la posición adecuada para realizar la siguiente fila de agujeros, otras veces la herramienta en lugar de tener una sola fila de punzones puede tener varias filas, pudiendo perforar cientos o incluso miles de agujeros a la vez”.

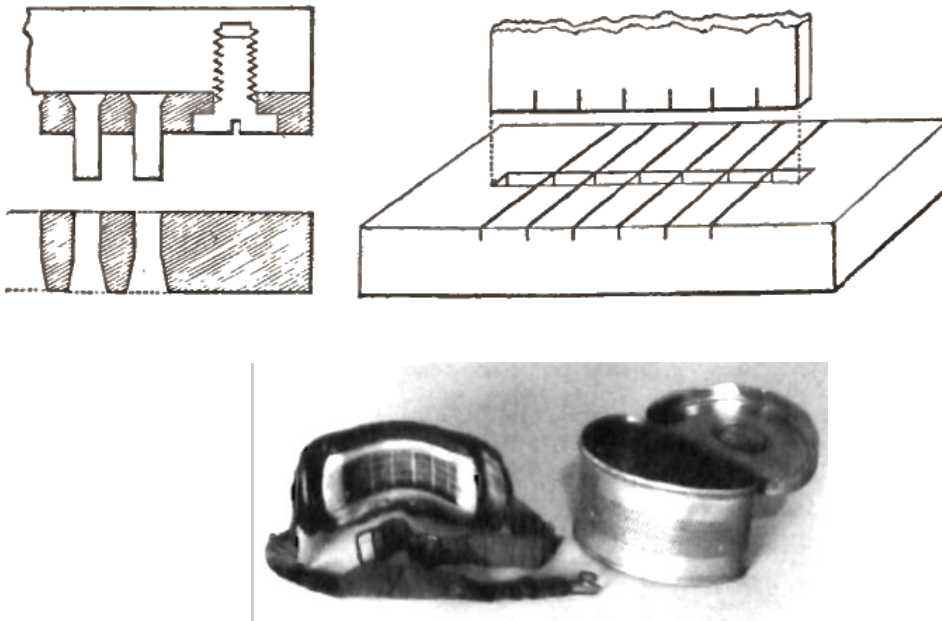


Figura 1-15: Troqueles Patentados por Marc Lariviere (1825) y Julius Jefferys (1836). Respirador de Jeffrey (Cortesía de Trustees, the Science Museum).

“La patente del respirador de Julius Jeffery, o aparato de ayuda para respirar para personas con pulmones delicados, presenta otra ejemplo de punzonado. El aparato consta de aproximadamente una docena de láminas de metal finas, perforadas con varias filas de agujeros rectangulares, dejando el metal como un entramado fino. Estas redes están unidas solidariamente con alambre fino y montadas entre las cubiertas perforadas. Al exhalar el paciente entre los intersticios de los cables, se calienta el instrumento y el instrumento a su vez, calienta el aire que es inhalado por el usuario.”

“La operación de punzonado de la red o celosía, consta de la matriz o “bed punch”, que es una pieza de acero de $\frac{3}{4}$ de pulgada de espesor, (figura 1-15) que contiene una apertura central de $3 \frac{1}{2}$ pulgadas de longitud y 18 centésimas de pulgada de ancho, siendo la anchura de las barras de la celosía de 2 centésimas de pulgada. Las seis

muecas transversales, de 1/8 de pulgada de profundidad y separadas media pulgada, son láminas de acero templado. El punzón es una placa de acero, con 6 ranuras transversales, que se ajusta al diseño de la matriz.”

“La prensa tiene un tope roscado en su parte posterior, acoplándose a él una tuerca que contiene dos patillas cuadradas en las que se fija la chapa. La chapa (cobre) se corta en largas bandas y una vez que se ha punzonado la primera fila de agujeros, la pieza se fija a las dos patillas de la tuerca, desplazándose de forma solidaria con la tuerca la distancia precisa en la que se realiza la siguiente fila de agujeros. Cuando se han realizado cinco filas de agujeros, la banda se mueve una distancia mayor (dos giros del tornillo) y se perforan cinco nuevas filas de agujeros, y así sucesivamente. Cada conjunto de 5 filas se corta posteriormente para colocarlo en el respirador.”

1.2.8 Clasificación de los troqueles.

En la obra *Press-working of metals* (Smith 1896) trata la clasificación de los troqueles de forma exhaustiva ya que como el autor indica “una clasificación estrictamente lógica parece imposible, ya que pueden agruparse según muchos sistemas diferentes”. Se muestran a continuación clasificaciones atendiendo a dos criterios, el primero según la operación que realizan y el segundo según la forma de trabajar de los troqueles. En el primer caso se muestran cuatro tipos, que se ejemplifican con ilustraciones de la época en las figuras 1-16 y 1-17:

1. Troqueles de corte.
2. Troqueles de embutición o estampado.
3. Troqueles de doblado.
4. Troqueles para acuñar. Proceso similar a la forja, realizado en frío.

En el segundo caso la clasificación se realiza según la forma en que trabajan los troqueles, en la que se pueden incluir los siguientes:

1. Troqueles simples. Realizan una sola operación en cada golpe (figuras 1-16 y 1-17).
2. Troqueles compuestos (figura 1-18). Los que realizan dos operaciones de corte en un solo golpe. Estaban especialmente indicados para la fabricación de

arandelas. El punzón superior al bajar realizaba el agujero interior, mientras que el corte exterior lo hacía el punzón inferior.

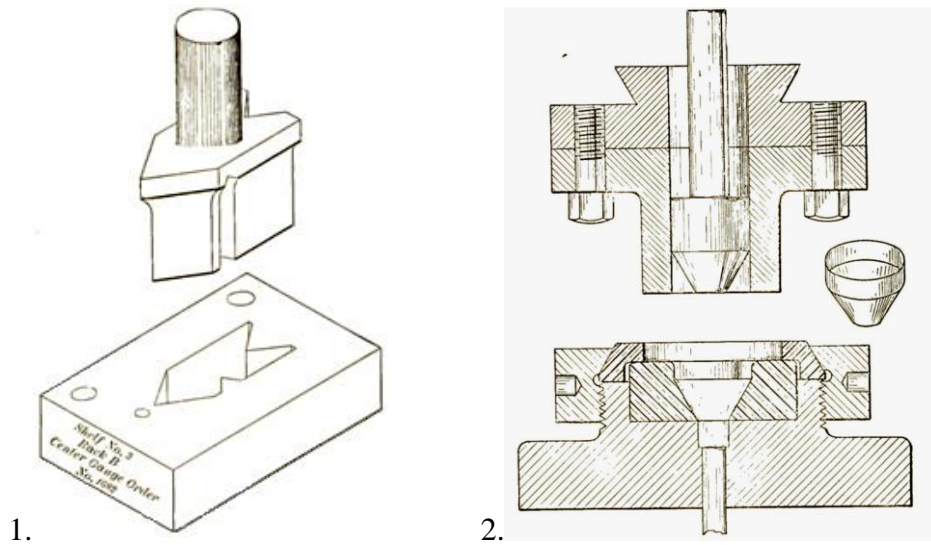


Figura 1-16: 1. Troquel de corte. 2. Troquel de embutición. (Lucas 1897).

3. Troqueles seccionales (figura 1-18). Son aquellos que debido a su gran tamaño es aconsejable fabricarlos en varias piezas separadas, para después colocarlas en un solo troquel.

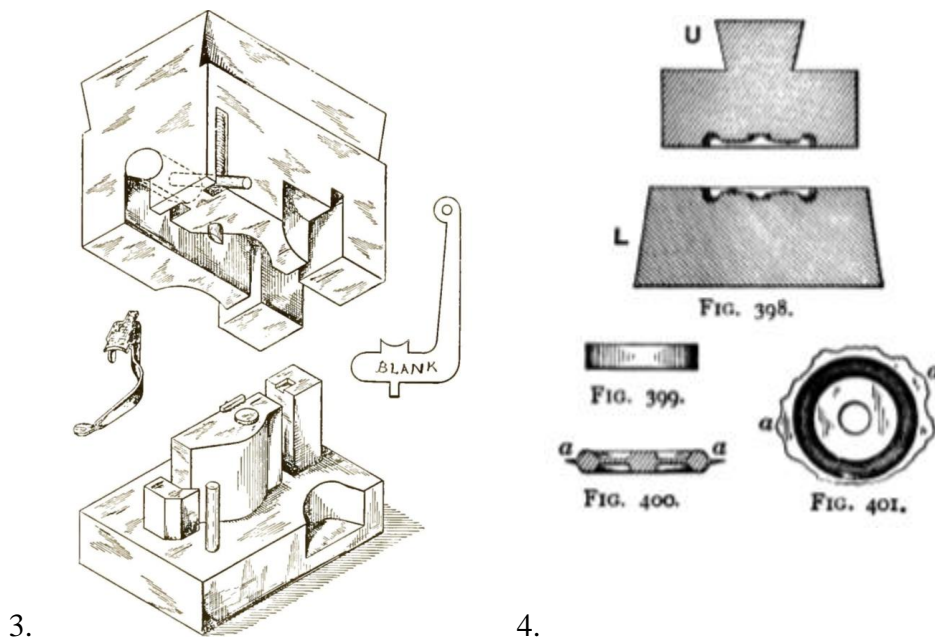


Figura 1-17: 3. Troquel de doblado. (Lucas 1897). 4. Troquel para acuñar (Smith 1896).

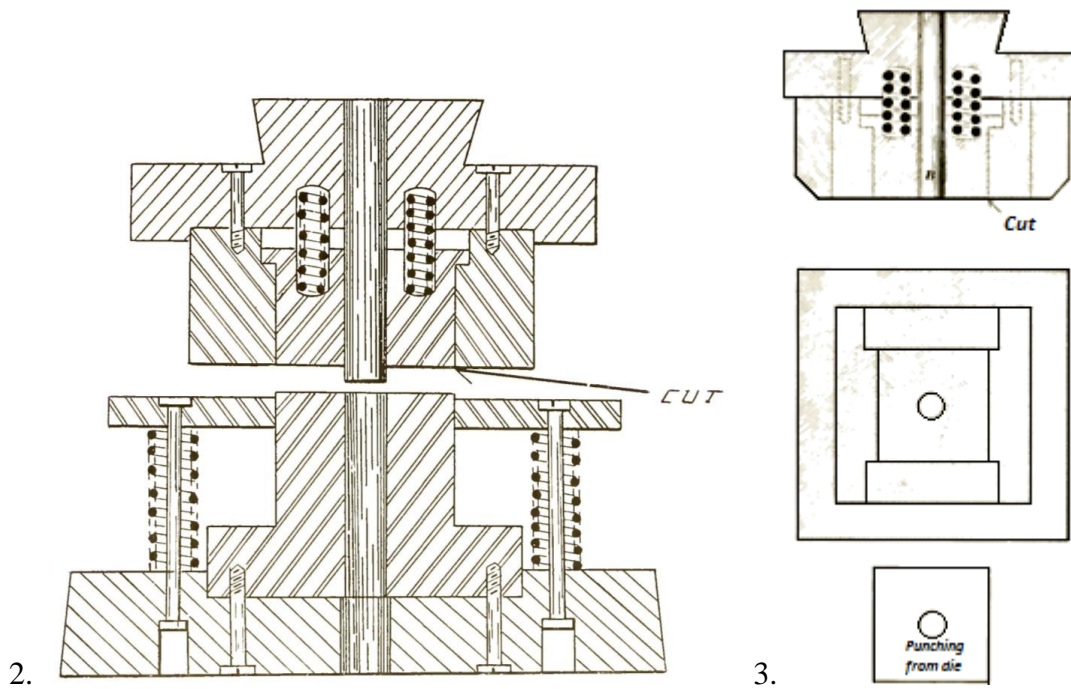


Figura 1-18: 2. Troquel compuesto. 3. Troquel seccional. (Lucas 1897).

4. Troquel “Gang die” (figura 1-19). Son los que realizan varias operaciones sucesivas. Generalmente realizan dos operaciones de corte: en la primera un grupo de punzones realiza el perforado de la chapa, mientras que la segunda le da la forma exterior.

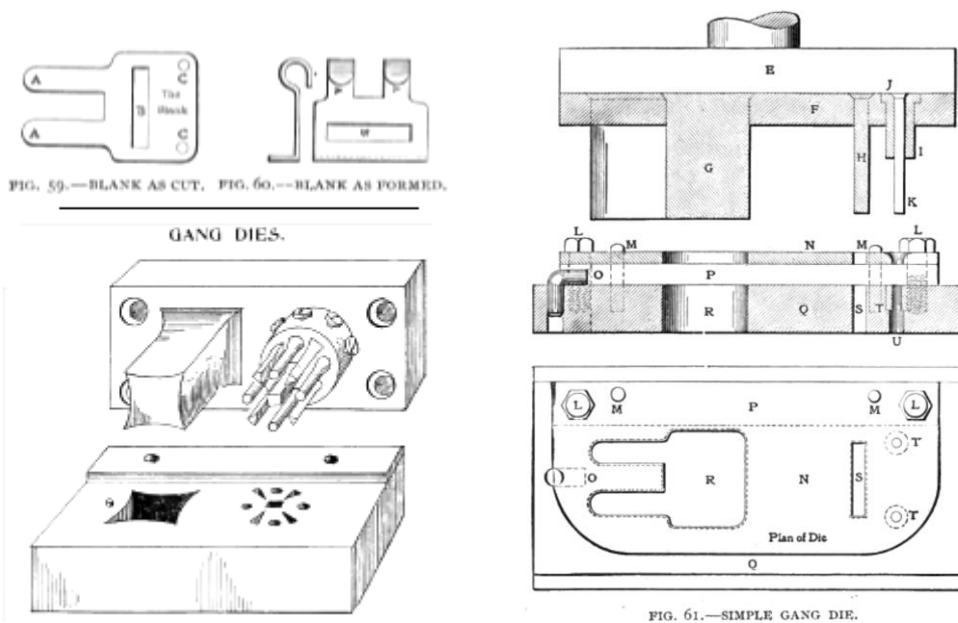


Figura 1-19: Troquel “Gang die”. (Woodworth 1903).

5. Troquel “follow die” (figura 1-20). Este tipo de troqueles realizan dos o más operaciones de forma consecutiva, obteniendo la pieza acabada al final del proceso. A diferencia de los troqueles anteriores (*gang dies*), éstos ejecutan todo tipo de operaciones, no solo de corte y punzonado.

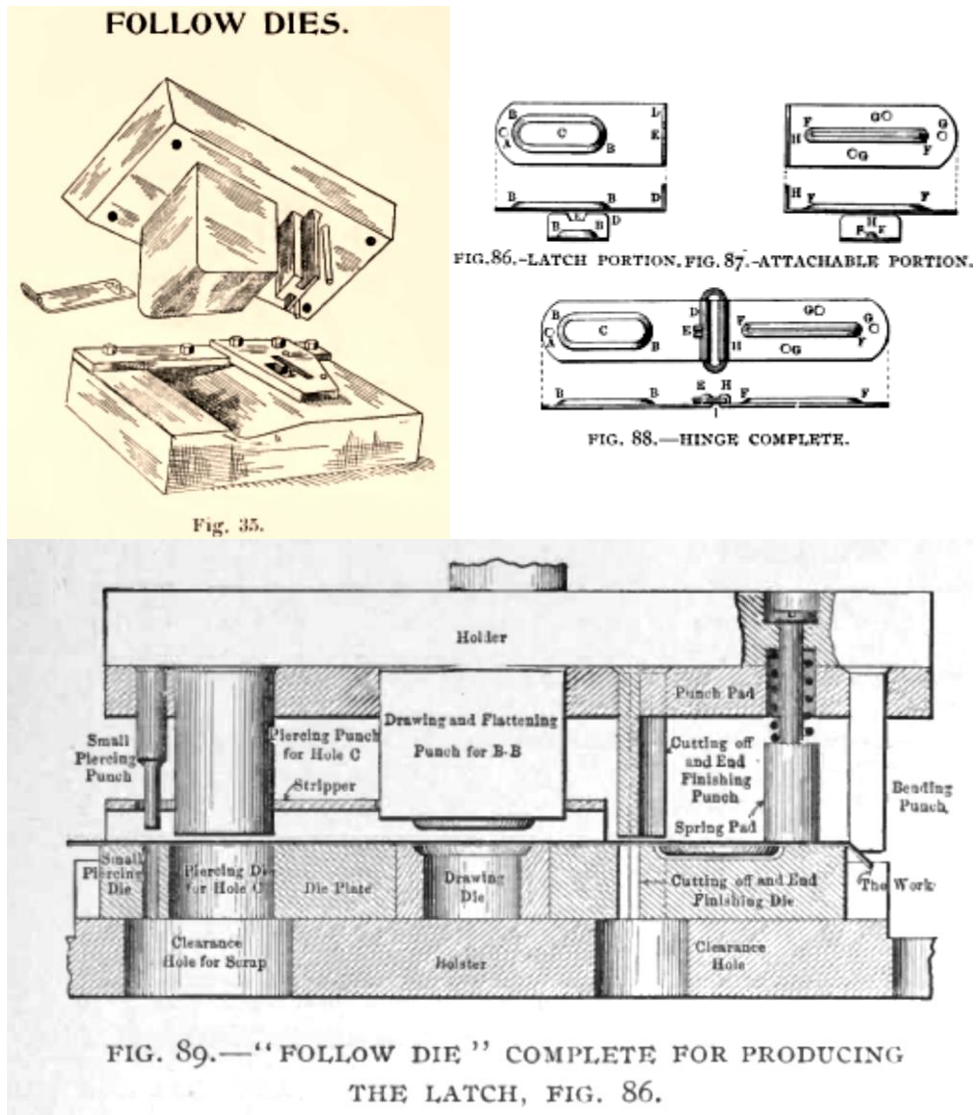


Figura 1-20: Troquel “Follow die”. (Lucas 1897).

6. Troqueles progresivos (figura 1-21). Los troqueles “*gang dies*” y “*follow dies*” se pueden considerar como precursores de los troqueles progresivos, que se mencionan en “Practical tool-maker and designer” (Wilson 1898). Se observa que hay una gran variedad de construcciones y diseños que se pueden considerar como combinación de los troqueles que se han expuesto.

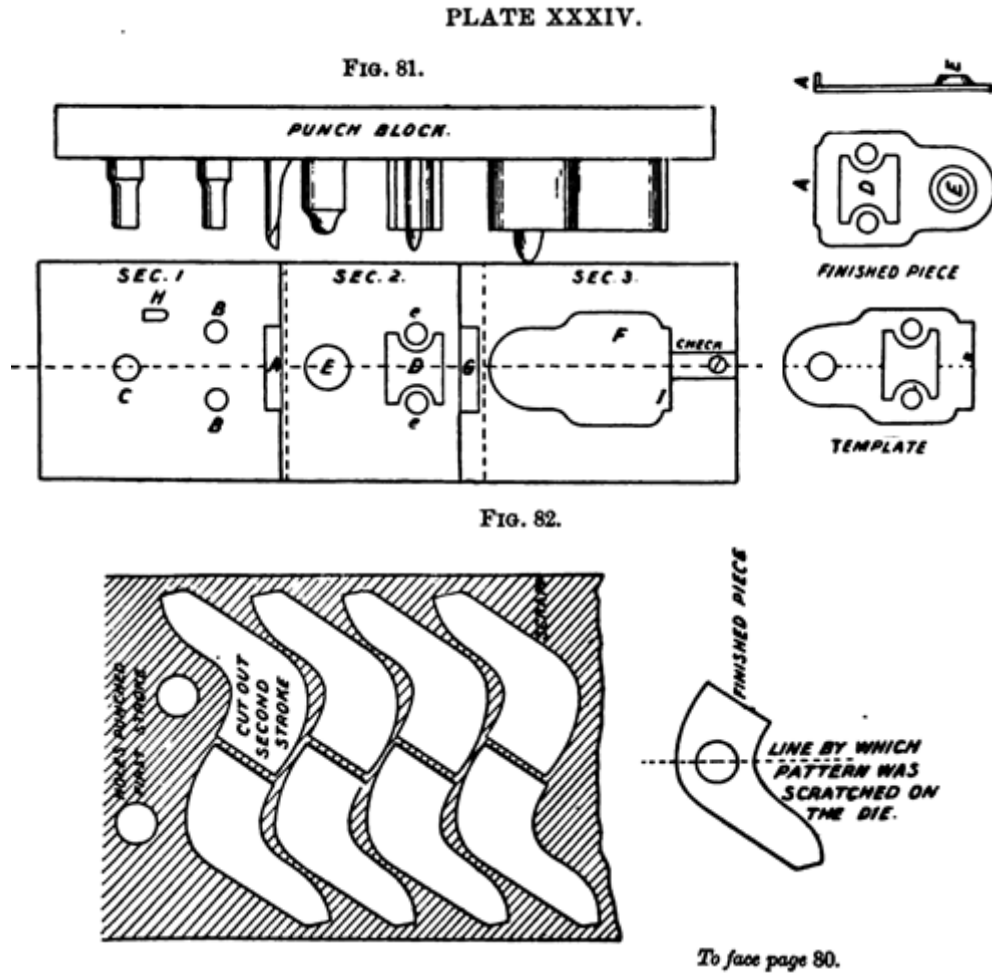


Figura 1-21: Troqueles progresivos. (Wilson 1898)

Los troqueles presentados corresponden a diseños realizados por diferentes autores a finales del siglo XIX, muchos de los cuales se han recopilado en la bibliografía que se referencia, de artículos publicados con anterioridad en revistas especializadas como: “*Metal Worker*”, “*Iron Age*”, “*American Machinist*”, “*Machinery*”, “*The Age of Steel*”...

1.2.9 Evolución del troquel entre 1750 y 1850. Caso documentado.

Un ejemplo ilustrativo en el que se aprecia la evolución del troquelado es el que se muestra a continuación para fabricar eslabones y montar la cadena correspondiente.

En *L'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (Denis Diderot & Jean D’Alambert 1751) en el apartado “Chainetier” que dispone de

tres planchas en las que está representado el procedimiento de fabricación de cadenas para relojes en el siglo XVIII mediante el empleo de troqueles de corte.

En la primera de las láminas se presenta como era un taller artesanal y diversos tipos de cadenas realizadas (figura 1-22), que varía sustancialmente con una instalación fabril como la que se muestra en la figura 1-10.



Figura 1-22: Taller artesanal de mediados del s. XVIII. (Enciclopedia Diderot-D'Alambert 1751)

En la figura 1-23, que es la segunda lámina referida a “chaintier”, la fig. 1 representa el eslabón a fabricar y las fig. 2 a 6 diferentes representaciones (vistas, perspectiva, vista explosionada...) de la cadena una vez fabricada, en la que, al ser todos los eslabones iguales, el proceso más económico para su fabricación es el troquelado. En las fig.7 y 8 se representa el punzón y la matriz de corte. En el punzón de la fig. 9, se observan dos apéndices en forma de aguja: n, c, que son los elementos guía que se introducen por los agujeros, a través de los cuales se unen los eslabones para formar la cadena. Este método facilita que los eslabones sean idénticos e intercambiables. La fig. 13 muestra el troquel empleado para la fabricación del gancho.

El proceso inicial de fabricación es el punzonado de los agujeros interiores de los eslabones. Las fig. 10 a 12 muestran los medios empleados para realizar los agujeros en

una sola operación, ya que uno de los factores más importantes para asegurar su intercambiabilidad es la distancia entre dichos agujeros,

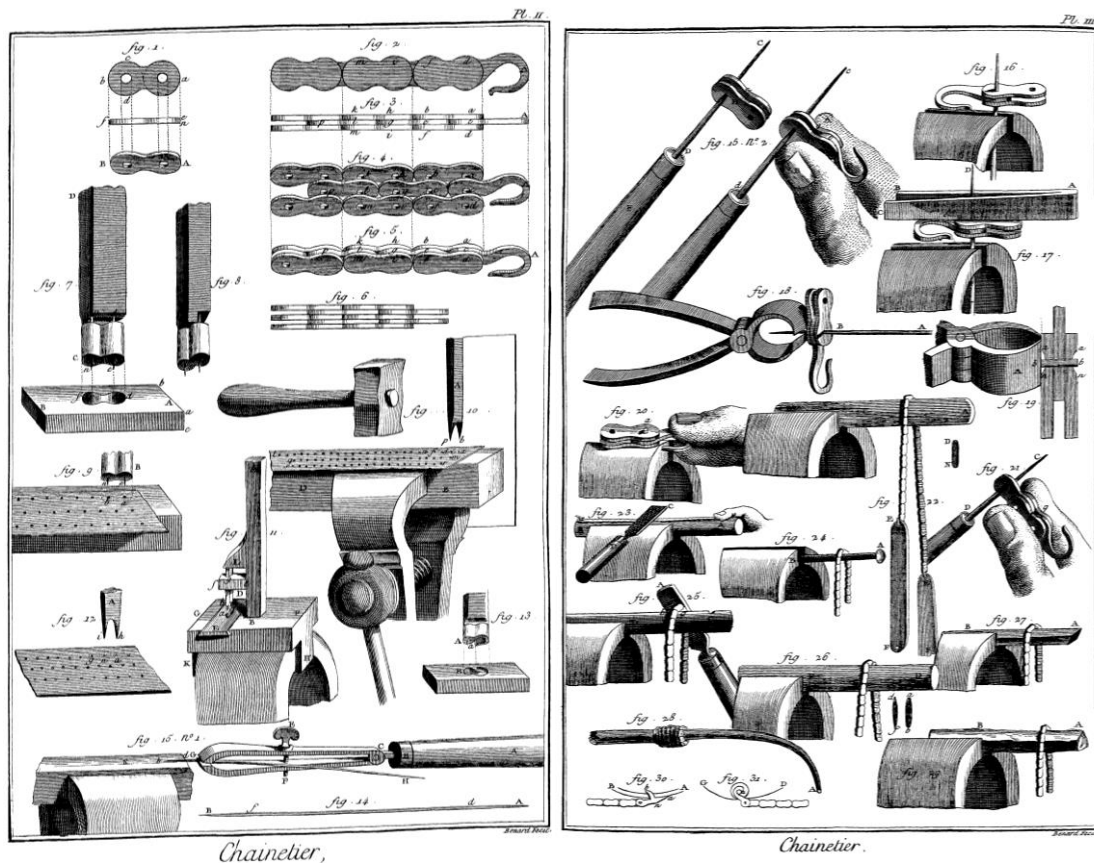


Figura 1-23: Segunda y tercera láminas referidas a “Chainetier”. (Enciclopedia Diderot-D’Alambert 1751)

Como se observa en las planchas el método de fabricación de los eslabones constaba de dos pasos: inicialmente se punzonan los agujeros interiores en la chapa, tantos como eslabones se vayan a fabricar, y posteriormente se realiza el corte con la forma final.

En las figuras de la tercera lámina (figura 1-23) se representa el proceso de montaje de los eslabones: preparación y corte de los pasadores, eliminación de rebabas de corte... Este procedimiento de fabricación, era un proceso totalmente manual, realizado sin el empleo maquinaria sofisticada.

En la obra “*Turning and mechanical manipulation*” (Holtzapffel 1852) se incluye el procedimiento usado para la fabricación de eslabones de cadenas muy parecidas a las anteriormente expuestas un siglo después. Se aprecia que la capacidad de producción se

multiplica considerablemente, las herramientas, los troqueles y su forma de ejecución permite que las cadenas sean mucho más uniformes y los productos más homogéneos.

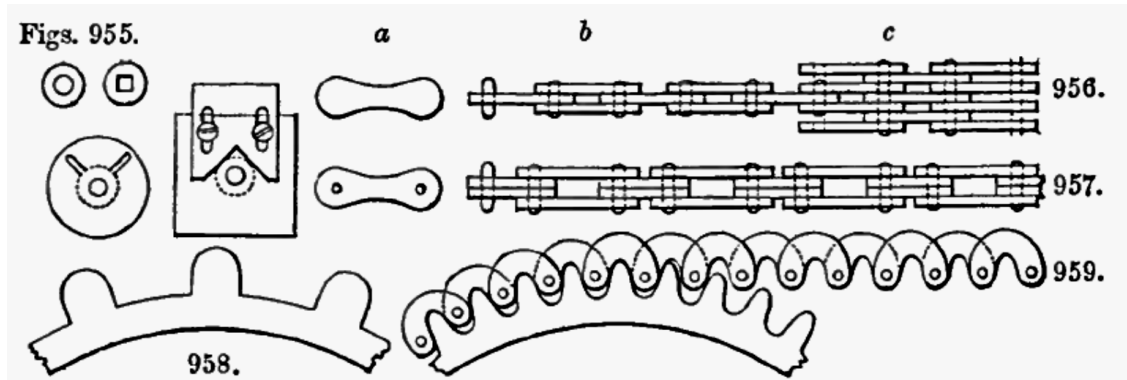


Figura 1-24: Troqueles para la fabricación de cadenas. (Holtzapffel 1852)

Las cadenas con eslabones planos que se utilizan en diversas máquinas se realizan en prensas de tornillo como la de la figura 1.13 o la 1.10. Los eslabones se troquelean según se muestra en la figura 1-24, fig. 956 a. Los agujeros se perforan después siguiendo un procedimiento similar al de las arandelas de las figs. 955, las cuales se ajustan a los topes que se han fijado en el troquel para que el agujero quede centrado. De forma similar se perforan los eslabones, troquelando ambos orificios a la vez. A continuación en una nueva operación se van remachando los eslabones, para lo cual se insertan trozos de alambre que se remachan con la prensa correspondiente. Los trozos de alambre se cizallan con la prensa a medida, según el número de eslabones que haya en cada paso, según se muestra en las figs. 956 b, c y 957 (figura 1-24).

CAPITULO II

TROQUELADO. TROQUELES PROGRESIVOS. DISEÑO DE TROQUELES.

2.1. Introducción.

En este epígrafe se exponen los fundamentos del conformado en frío de la chapa metálica así como los procedimientos de trabajo aplicados en su proceso productivo, centrándose principalmente en el diseño de las herramientas empleadas en la fabricación mediante prensas: troqueles o matrices.

De entre la diferente variedad de troqueles se van a tratar los troqueles progresivos. Esta clase de troqueles, destinados a la fabricación de grandes series de producción, presenta ciertas peculiaridades respecto a otros por lo que se va a presentar una metodología para su diseño, en la que se automatizan ciertas etapas del mismo.

El diseño de troqueles tiene una componente gráfica importante que es preciso considerar para realizar los elementos que configuran el mismo.

La representación, modelado, ensamblaje y despiece ayudan a la comprensión y mejora del diseño y su análisis facilita la visualización de efectos que se pueden dar, como el solape, superposición de movimientos, o interferencia de piezas.

2.2. Conformado en frío de la chapa metálica.

El conformado en frío, o estampado, de la chapa metálica abarca una serie de procesos productivos de gran importancia dentro de la industria, ya que permite obtener elementos más ligeros, resistentes y económicos que los resultantes de otros procesos, como fundición, forja, etc., por lo que se emplean en una gran variedad de sectores tales como: automoción, aeronáutica, electrónica...

La norma DIN 8580 define el conformado como: “la consecución de la forma de un cuerpo sólido mediante la transformación dúctil”. En el libro, *Estampado en frío de la chapa* (Rossi 1971), se define el conformado en frío como el “conjunto de operaciones con las cuáles, sin producir virutas, se somete a una chapa plana a una o más transformaciones, con el fin de obtener una pieza que tenga una forma geométrica propia, sea esta plana o hueca. En otros términos, la chapa es sometida a una deformación plástica”.

Las operaciones básicas a las que se somete la chapa durante el proceso de estampado son:

- Corte.
- Doblado.
- Embutición.

Estas operaciones que transforman la chapa, se realizan mediante utillajes específicos denominados troqueles (matrices, estampas...) colocados sobre prensas.

2.2.1 Corte.

El corte es la operación en la cual se separa una parte metálica de otra a lo largo de una línea de corte, abierta o cerrada mediante las herramientas adecuadas (figura 2-1). Si es abierta la operación se denomina corte y si es cerrada y de pequeñas dimensiones punzonado.

El corte de la chapa se realiza por una acción de cizalla o cizallado entre dos bordes afilados de corte: punzón y matriz (figura 2-1).

El proceso de corte por punzonado se efectúa con un utillaje específico, compuesto por matriz y punzón. Cuando el punzón empuja el material contra la matriz se produce la deformación plástica de éste, según planos verticales que contienen la línea de corte, cuando las tensiones del perfil de corte son tan elevadas que superan la resistencia de la chapa, se origina la separación de la pieza cortada.

Una vez cortada la chapa, tiende por elasticidad a recobrar su posición primitiva, adhiriéndose fuertemente al punzón y a la matriz. Esto hace que el tamaño final del agujero sea igual a las dimensiones del punzón y el de la pieza cortada igual al hueco de la matriz. Cuando la adherencia del material al punzón es elevada es necesario incluir muelles o cilindros de gas para realizar su extracción.

El factor más importante en la calidad final del corte es el juego entre el punzón y la matriz. A medida que su valor aumenta la zona de corte es más rugosa y la zona de deformación es mayor. Los valores más usuales varían entre 0.05 y 0.1 del espesor de la chapa, aunque estos valores dependen del material de la chapa. La tabla 2-1 muestra las

fórmulas empíricas aplicadas en *Herramientas de troquelar, estampar y embutir* (Oehler-Kaiser 1977), la figura 2-2 muestra gráficamente la forma de determinar el juego entre punzón y matriz (Rossi 1971).

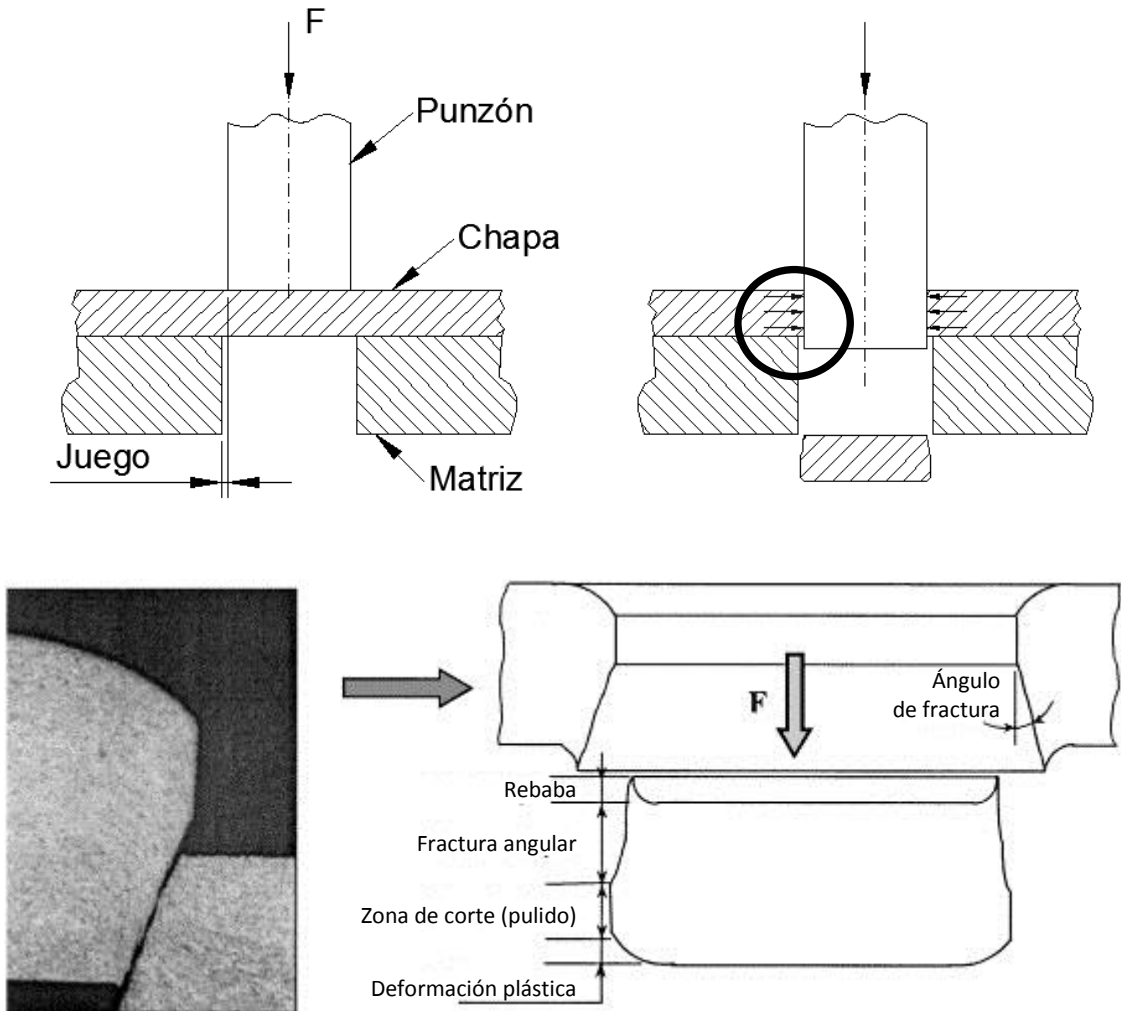


Figura 2-1: Punzonado de chapa metálica.

Tabla 2-1: Juego recomendado para diferentes materiales (Oehler-Kaiser 1977).

<p>Espesor chapa $\leq 3 \text{ mm}$</p>	$Juego = c \cdot s \sqrt{\tau_B}$	<p>C: coeficiente que depende del material s: espesor de la chapa τ_B: resistencia al cizallamiento</p>
<p>Espesor chapa $> 3 \text{ mm}$</p>	$Juego = (1,5 c \cdot s - 0.015) \sqrt{\tau_B}$	

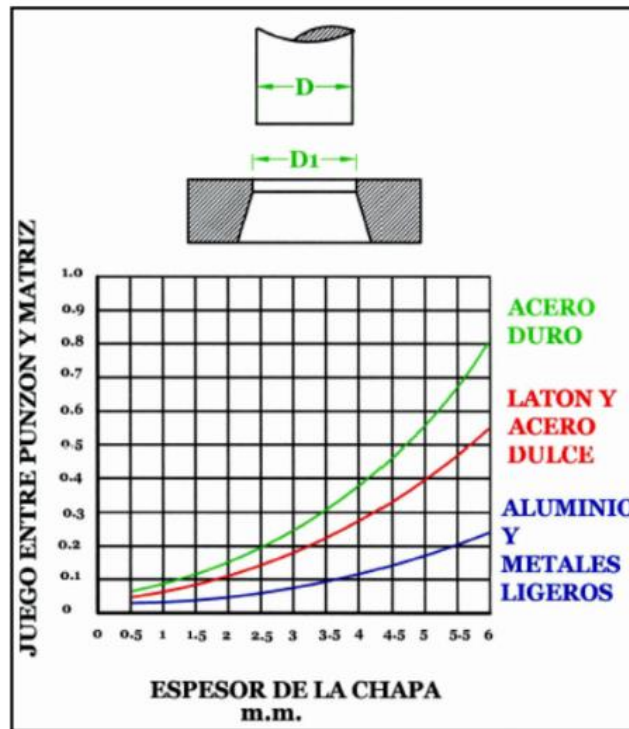


Figura 2-2: Forma de determinar gráficamente el juego entre punzón y matriz (Rossi 1971).

Otro factor a tener en cuenta es la relación entre el espesor de la chapa y el diámetro del punzón, ya que si la chapa es muy gruesa y la sección transversal del punzón muy pequeña el esfuerzo de corte puede llegar a ser superior a la resistencia del punzón. Como regla práctica se aplica que el espesor de la chapa sea igual o menor que el diámetro del punzón más pequeño. En el caso de punzones no cilíndricos se tomará la menor dimensión del punzón.

El esfuerzo necesario para realizar el corte depende del material que se vaya a cortar, de las dimensiones de la pieza y del espesor de la chapa. El esfuerzo F necesario para el corte se muestra en la ecuación 1.

$$F = \sigma \cdot L \cdot s \quad (\text{ec. 1})$$

dónde:

σ : resistencia del material a cortadura;

L : longitud del perímetro de corte

s : espesor de la chapa.

2.2.2 Doblado.

El doblado consiste en transformar una chapa plana en otra de perfil quebrado sin variación perceptible de espesor.

En el doblado, la chapa se comprime por su parte interior y se tracciona por la exterior. En consecuencia, las fibras del material sufren en la zona de doblado unas sollicitaciones tanto más intensas cuanto menor sea el radio del doblado (figura 2-3), llegando a la rotura en el caso de que el radio de doblado sea demasiado pequeño. Para prevenirlo se determina el **radio mínimo de doblado**, valor que depende del espesor de la chapa y del material. Como valor aproximado se toma como radio mínimo admisible el resultante de la relación que se muestra en la ecuación 2, (Oehler-Kaiser 1977).

$$r_{\min} = c \cdot s \quad (\text{ec. 2})$$

donde

s: espesor de la chapa

c: coeficiente que depende del material.

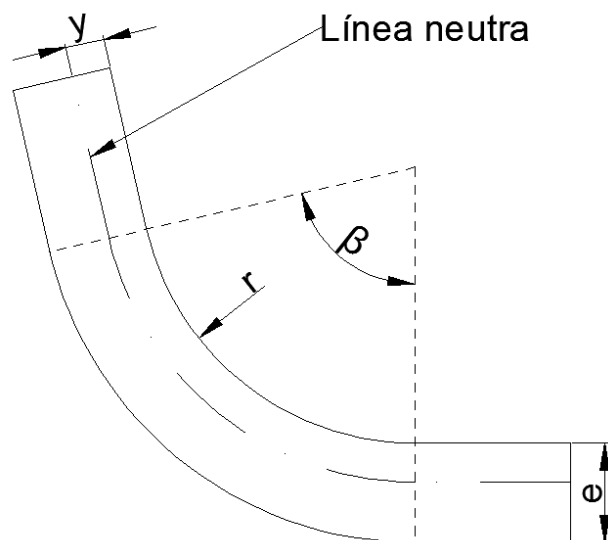


Figura 2-3: Doblado.

En el doblado un factor importante es la **recuperación elástica** de la chapa, que es la tendencia a recuperar su forma primitiva como consecuencia de la deformación elástica. Para compensar esta recuperación elástica se aplica:

- El sobredoblado, que consiste en fijar el ángulo de doblado mayor que el estipulado, de manera que el material al recuperarse alcance dicho valor.
- El equilibrado en el que se realiza la operación de doblado en dos etapas consecutivas (también lleva el correspondiente sobredoblado).

2.2.3 Embutición.

La embutición es un proceso de conformado en el que se transforma una chapa plana en un cuerpo hueco (figura 2-4). Esta operación tiene similitud con el punzonado, siendo las diferencias, para que no se produzca el corte, entre otras, el juego del punzón con la matriz, así como la forma del punzón y matriz.

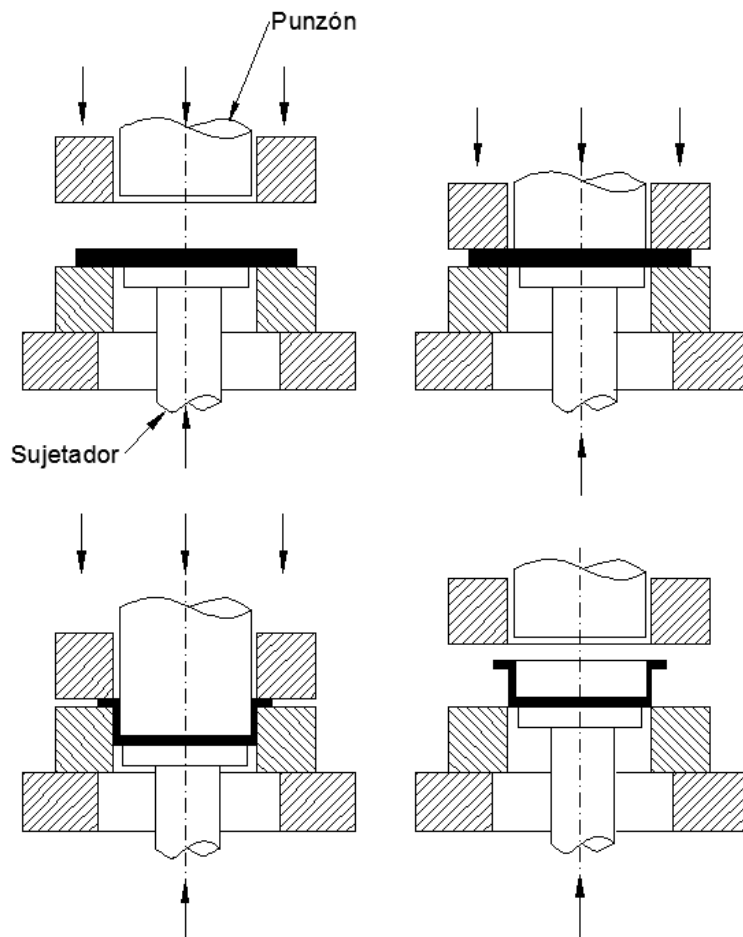


Figura 2-4: Proceso de embutición.

La deformación de la chapa se realiza mediante la combinación de fuerzas de tracción y compresión que ocasionan un flujo de material, en el que una chapa se transforma en otra equivalente manteniendo prácticamente constante el volumen y el espesor.

Por otro lado, se producen pliegues en la chapa por efecto de la compresión que podrían dar lugar a la formación de arrugas. Para impedir su formación se aplica una fuerza de compresión normal a la chapa por medio de un *sujetador* (figura 2-4).

El proceso de embutición se escalona en cuatro fases. En primer lugar se coloca el material de aportación (la chapa o fleje); después avanzan el sujetador y el punzón, entrando en contacto con la chapa en este orden, seguidamente el punzón deforma la chapa mientras el sujetador la deja fluir sin brusquedad. Finalmente se retiran ambos.

Al igual que en el corte, uno de los factores que más influye en la calidad del proceso es el juego entre el punzón y la matriz. En este caso es igual al espesor de la chapa más una holgura variable en función del material.

2.3. Tipos de troqueles.

De las diferentes clasificaciones de troqueles se reseñan como más características las que los ordenan según el tipo de operaciones que realizan o del número de operaciones que se llevan a cabo en el interior del troquel en cada golpe de prensa.

Según el tipo operaciones que realizan se puede hacer la siguiente clasificación:

- Troqueles de corte.
- Troqueles de doblado.
- Troqueles de embutición.
- Troqueles mixtos. Combinan varias de las operaciones anteriores.

Según el número de operaciones y etapas que realizan se puede hacer la siguiente clasificación:

- Troqueles simples: Realizan una sola operación con cada golpe de prensa.

- Troqueles combinados: Realizan varias operaciones con cada golpe de prensa, todas simultáneamente sobre la misma chapa, obteniendo la pieza deseada en una sola etapa y en un solo golpe de prensa.
- Troqueles progresivos: Realizan varias operaciones en cada golpe de prensa, en diferentes etapas. Estas operaciones se realizan de manera progresiva al avanzar la tira de chapa por el interior de troquel, obteniendo finalmente la pieza deseada.
- Troqueles transfer: Son similares a los progresivos, en el que el material introducido ha sido sometido a operaciones previas.

Este trabajo se centra en los troqueles progresivos, en el que se muestra su proceso de diseño, y se desarrollan aportaciones al diseño automatizado, optimizando diferentes etapas.

2.4. Troqueles progresivos

Los troqueles progresivos presentan una gran complejidad en su diseño debido al gran número de operaciones que pueden ser necesarias para la obtención de una pieza determinada, lo que redundaría en una gran cantidad de elementos necesarios para su construcción, que deben estar colocados y sincronizados para evitar interferencias entre ellos por lo que el coste de este tipo de troqueles es elevado, y por consiguiente se aplican principalmente para la fabricación de grandes series.

Cuando la serie a fabricar no sea suficiente o resulte inviable, otra opción es utilizar varios troqueles simples (de una sola operación), más sencillos de diseñar y más baratos de construir, si bien se necesitan varias prensas y se alarga el proceso de producción.

2.4.1 Elementos que componen un troquel progresivo.

La estructura principal de un troquel (figura 2-5) está compuesta por dos zonas claramente diferenciadas, **parte inferior**, fija sobre la mesa de la prensa y **parte superior**, que es móvil con el cabezal, las cuales se componen principalmente de:

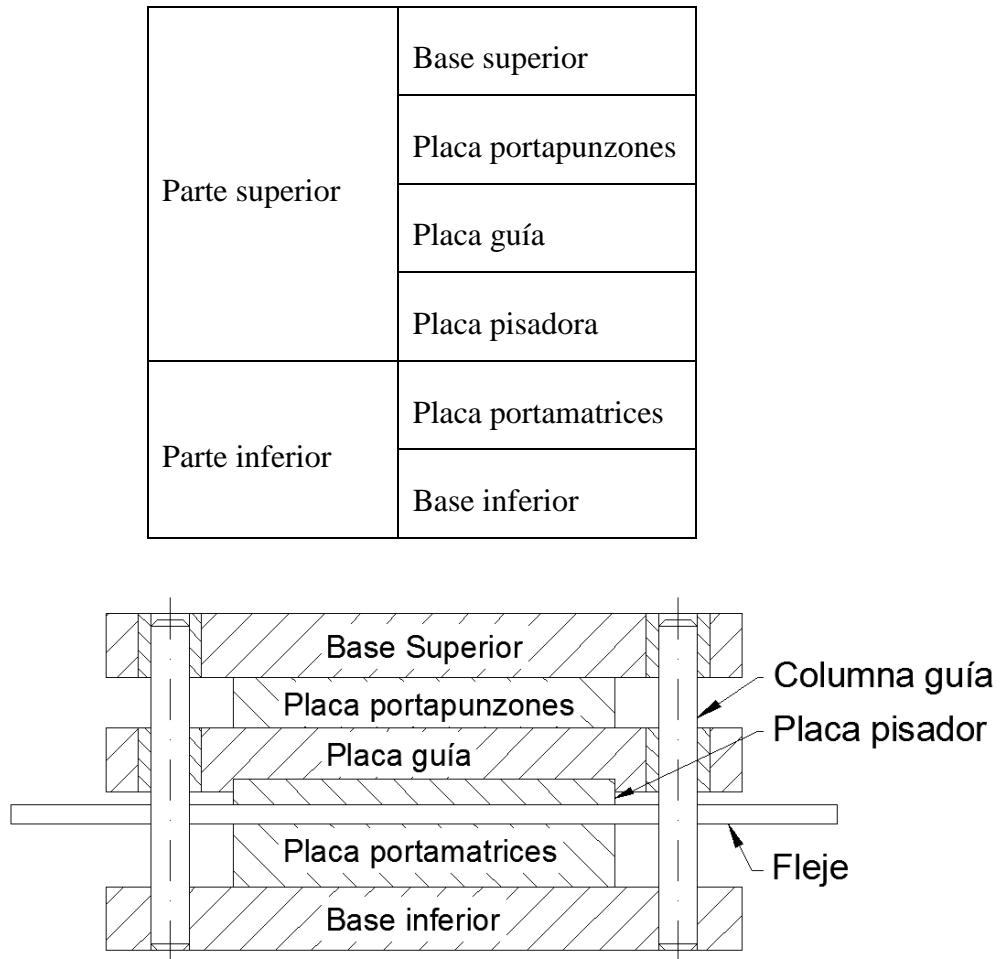


Figura 2-5: Elementos de un troquel progresivo

Parte superior:

- Base superior: es una placa que hace de enlace entre el troquel y la prensa, sustentando al resto de las placas de la parte superior del troquel
- Placa portapunzones o portaherramientas: sirve para el anclaje de los elementos activos del troquel, esto es, sujeta las herramientas de corte, de doblado, punzones, etc., que conforman a la pieza.
- Placa guía: placa intermedia que hace de soporte al pisador. Está separada de la placa portapunzones mediante resortes, no estando unidas fijamente para permitir que el resto de la base superior siga su recorrido una vez que la placa pisadora ha fijado el fleje.

- Placa pisador: es el elemento que está en contacto con la chapa cuando el troquel está cerrado. Esta placa se adapta a la forma de la banda, fijándola durante la ejecución de las operaciones de conformado. Suele ser conveniente que esté dividida en varias partes para evitar rigideces al pisar y simplificar su construcción.

Parte inferior:

- Base inferior: tiene la misma función que la base superior, es decir sirve de enlace entre la prensa y el troquel, por lo que ha de ser de mayores dimensiones que el resto, debido a que se ha de tener en cuenta la disposición de las ranuras de amarre de la mesa de la prensa.
- Placa portamatrices: como su nombre indica es la placa donde se apoyan o sustentan las matrices de las diferentes herramientas situadas en la placa portapunzones. Dependiendo de la configuración de la pieza a fabricar también es posible situar en ella herramientas que realicen operaciones en la banda.

Otros elementos del troquel:

- Columnas guía: permiten el desplazamiento preciso de la parte superior del troquel, permaneciendo la parte inferior fija sobre la mesa de la prensa.
- Buscadores: son punzones instalados en el pisador, que se desplazan con él y se insertan en la banda para posicionarla de forma precisa. Para ello se hacen unos agujeros en las primeras etapas para que se alojan los buscadores, y así las operaciones de corte, doblado... se hagan con la precisión requerida.
- Punzones: hacen los agujeros en la chapa. Van con su correspondiente matriz siendo el diámetro nominal el mismo que el del punzón pero con juego.
- Abocardadores: son punzones específicos (figura 2-6) que deforman plásticamente agujeros previamente punzonados, reforzando el entorno del agujero.

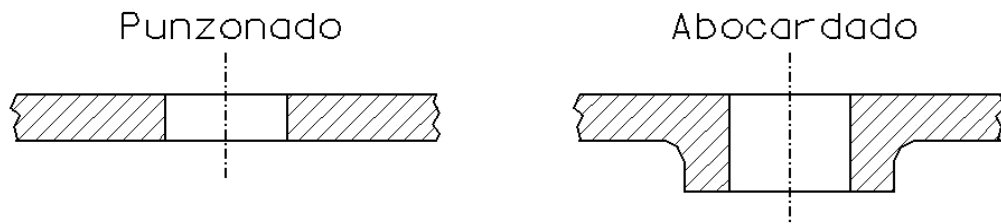


Figura 2-6: Punzonado y abocardado

- Herramientas de roscado: sirven para hacer agujeros roscados mediante estampación en frío, realizando una deformación plástica.
- Herramientas de corte: se emplean para realizar el resto de operaciones de corte, como el recorte del contorno que define la pieza. Debido a que normalmente estos perfiles tienen formas irregulares y las herramientas de corte deben ajustarse a dicha forma, estos elementos, a diferencia de los anteriores no son elementos normalizados sino que son específicos de cada troquel.
- Herramientas de doblado: la función de estos elementos es la de realizar las partes dobladas de la pieza. Van asociados a sus correspondientes matrices. Es importante a considerar el retroceso elástico de la pieza, ya que tiende a volver de nuevo a su forma original. Para solucionar este problema se suelen doblar un ángulo mayor del deseado, o bien se incluyen posteriormente herramientas de calibrado.
- Muelles, resortes o cilindros de gas: su función es la de devolver las placas a la posición inicial, separando las herramientas, principalmente los punzones, de la banda.
- Elementos de unión.

Estos son los principales elementos de un troquel progresivo, aunque hay otros que no se han enumerado.

2.4.2 Funcionamiento de un troquel progresivo.

Para diseñar un troquel progresivo es necesario conocer su funcionamiento (figuras 2-7, 2-8). La placa pisadora y el pisador, al ir unidos, se desplazan a la vez. La función de estas placas es fijar la banda antes de que las herramientas actúen. Para que se produzca el pisado (figura 2-8b) y posteriormente baje el resto del troquel (figura 2-8c), hay un margen de separación, al que se denomina carrera.

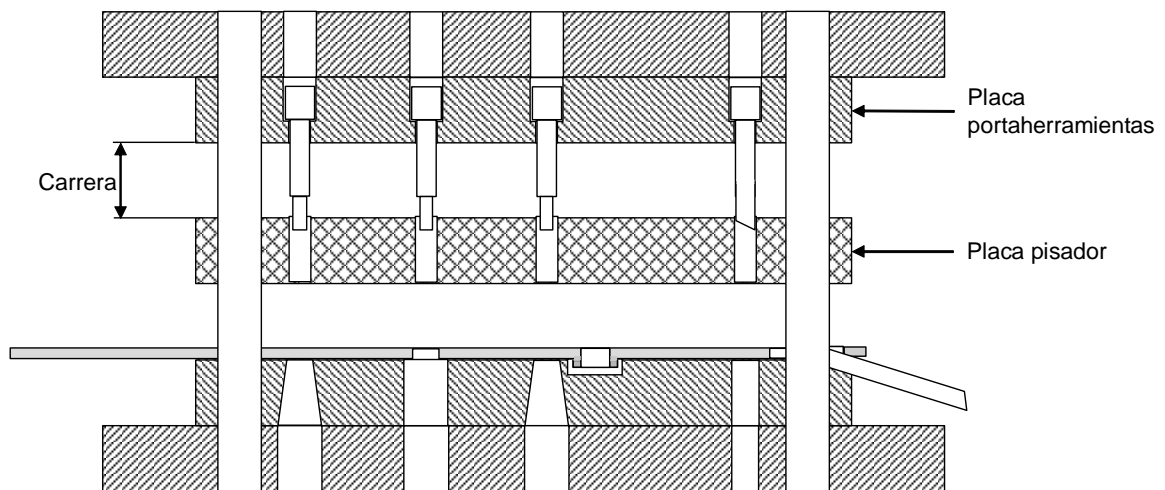


Figura 2-7: Troquel en su posición inicial

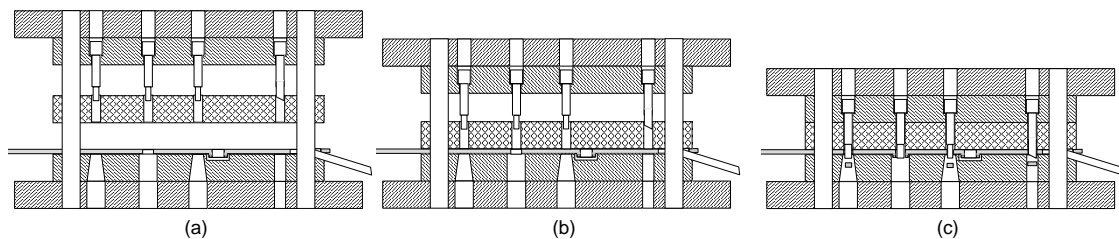


Figura 2-8: Proceso de trabajo del troquel

En la posición superior de la prensa el troquel está totalmente expandido (figura 2-8a). Al iniciar el descenso de la parte superior del troquel bajan todas las placas hasta que la placa pisadora alcanza la banda (figura 2-8b), momento en que se detiene, asegurando un correcto posicionamiento de la banda. La placa portaherramientas continúa con su movimiento descendente, introduciendo las herramientas a través de la placa pisadora hasta la banda, en la que se realizan las operaciones, que finaliza cuando el troquel se cierra completamente (figura 2-8c).

A continuación se inicia el ascenso, desacoplándose las herramientas en el primer tramo en que sigue sujeta la banda. Al iniciar el ascenso la placa pisador, se produce el avance de la banda, que se desplaza a la etapa siguiente, mientras la parte superior finaliza su ascenso (figura 2-8a). Este ciclo se repite indefinidamente. La distancia que avanza la banda entre una posición y la siguiente se denomina “**paso**” y es uno de los parámetros fundamentales en el diseño del troquel.

A diferencia de otros tipos de troqueles, en los progresivos se llevan a cabo varias operaciones con cada golpe de prensa en diferentes zonas de la banda. La banda entra completamente plana en el troquel procedente de la bobina de alimentación, avanzando una determinada distancia, el paso, con cada ciclo de la prensa. Cada vez que se completa un ciclo de la prensa, la banda avanza un paso, y se produce el siguiente grupo de operaciones. Las diferentes posiciones por las que va pasando la banda se denominan **etapas** del troquel. La suma de las diferentes operaciones a las que se somete la chapa en el interior del troquel la transforma desde una tira plana hasta la pieza final, es decir, la chapa se va transformando gradualmente a medida que va progresando por las diferentes etapas.

2.5. Diseño de troqueles progresivos.

El proceso de diseño de troqueles progresivos aún sigue siendo una tarea eminentemente manual. Desde la década de los 70 se impulsó el proceso de automatización del proceso de diseño.

De entre las primeras investigaciones desarrolladas destacan las que se llevaron a cabo en la industria japonesa (Murakami et al. 1980, Nakahara 1978, Okada 1980) encaminadas preferentemente al diseño de herramientas CAD. Estas herramientas consistían en aplicaciones que facilitaban la introducción de datos y su tratamiento. Aunque sus procedimientos eran laboriosos los conceptos que desarrollaron han servido de base para el desarrollo de las herramientas actuales, tales como el uso de punzones con formas estándar, estandarización de componentes, modelado sólido de componentes, diseño de banda...

A mediados de los 80 se produce una mejora sustancial a medida que aumenta la capacidad de los sistemas CAD/CAM. Son importantes los avances hacia sistemas más interactivos y de modelado 3D (Fukuoka and Horiuchi 1986, Bergstrom 1988). Aun así, el diseñador seguía tomando las decisiones principales en el proceso de diseño.

La introducción de las técnicas de inteligencia artificial (Chryssolouris 1986, Boyle 1989, Tong and Sriram 1992) como la lógica difusa (fuzzy logic), reconocimiento de patrones (pattern recognition)... aportaron avances notables, aunque la complejidad y amplitud del proceso de diseño hacía que la aplicación de estas herramientas fuese bastante limitada.

Dichas investigaciones se centran en etapas concretas del proceso diseño:

- Diseño de componentes específicos (Lin 1994, Lee 1993).
- Minimización del número de etapas del troquel (Lin 1996).
- Desarrollo del diseño de banda (Li 1990, 1992, 1993).
- Anidamiento (Nee 1989, 1992).
- Configuración del troquel (Yuan 1990, Cheok 1994, 1996, 1997).

Otras se han centrado en el desarrollo de troqueles específicos:

- Troqueles de corte (Lin 1994, 1996, Choi 1992, Prasad and Somasundaram 1992).
- Troqueles de punzonado (Ismail et al. 1996).
- Troqueles para piezas específicas (Duffey 1991).

Otra rama de las investigaciones se centra en proporcionar información sobre el proceso y ayuda en la toma de decisiones (Lazaro 1993, Lee 1993).

Más recientemente las investigaciones se han orientado hacia la mejora de los procedimientos y técnicas anteriores, como son:

- Ensamblaje de componentes (Wang 2009).
- Diseño de banda (Kumar 2008).
- Mejora de las técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la secuencia de operaciones (Tor 2005a, 2005b, Li 2002).

- Elementos standard (Zhao 2006, Jia 2008).

Además de estas investigaciones centradas en aspectos específicos, otro grupo de investigadores se ha centrado en procedimientos que abarcan globalmente el proceso de diseño del troquel, desarrollando pautas y métodos para su aplicación.

Así, Cheok (1998a) propone el proceso que se muestra en la figura 2-9, centrado principalmente en el diseño de banda.

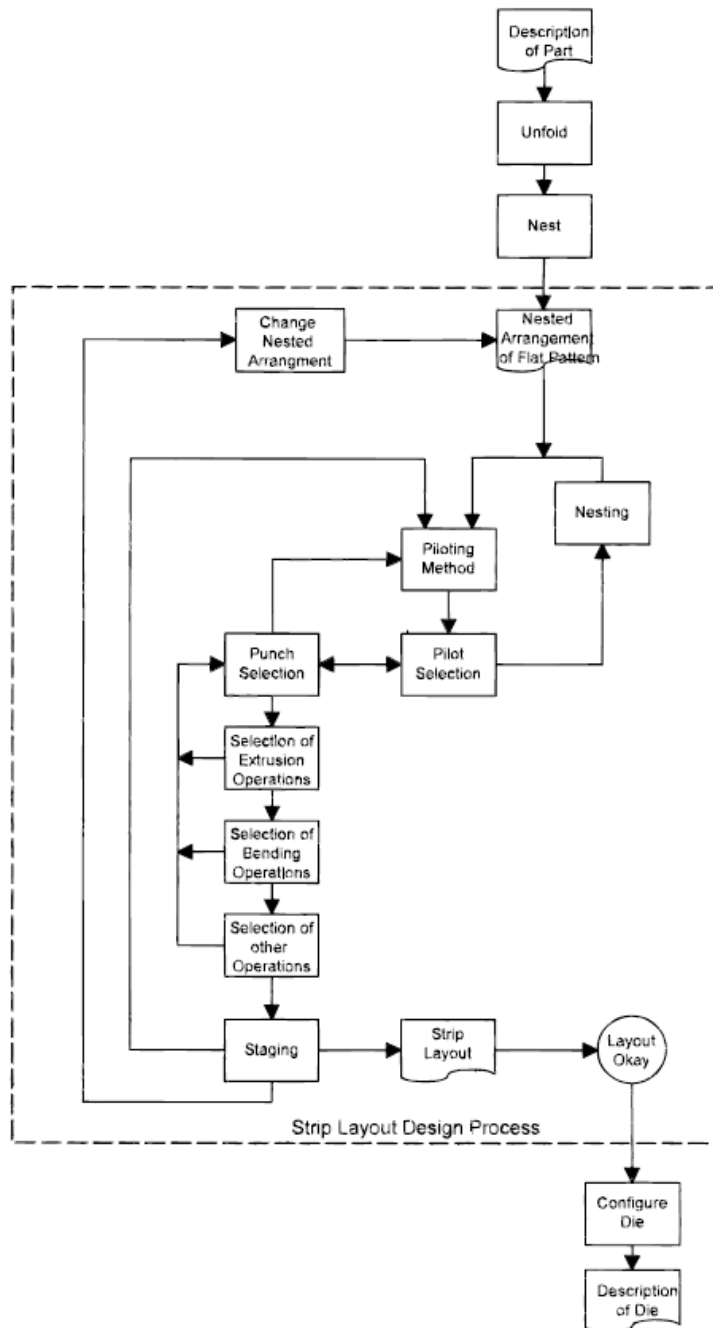


Figura 2-9: Proceso de diseño según Cheok (1998).

Posteriormente (Choi et al. 1999) propone un sistema en el que se tienen en cuenta aspectos como la factibilidad del diseño, generación de planos, exportación de datos... Este sistema está pensado para troqueles de corte (figura 2-10).

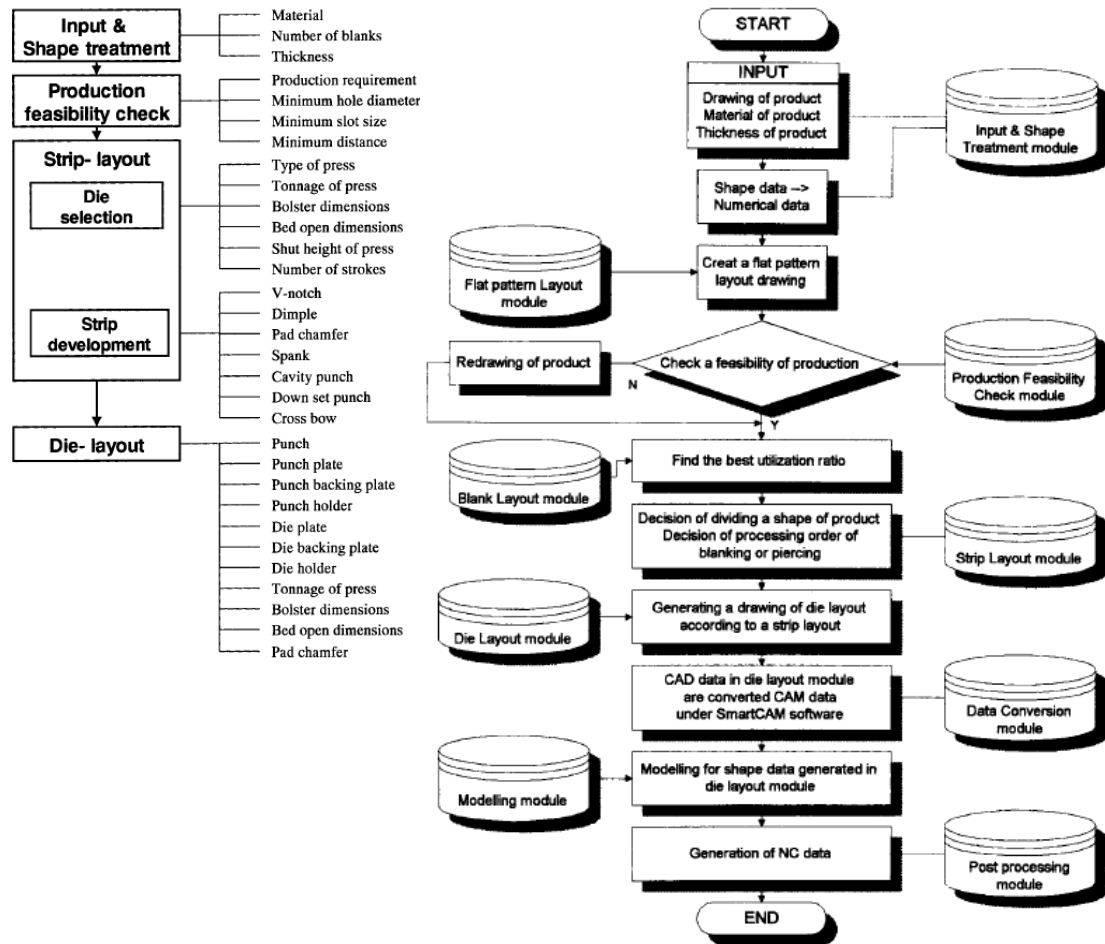


Figura 2-10: Proceso de diseño según Choi (1999).

Se observa que los investigadores dividen el proceso de diseño de un troquel progresivo en dos fases claramente diferenciadas:

Diseño de banda. Se denomina banda a la porción de material (tira de chapa) que circula en cada momento en el interior del troquel. Al realizar el diseño se determina la anchura, longitud, paso, número de etapas del troquel, y otros parámetros.

Diseño del troquel. A partir del diseño de banda se diseña el troquel, es decir, las placas, herramientas, etc., siendo frecuente redefinir el diseño de banda original, hasta obtener el troquel más adecuado para la pieza a fabricar.

Por lo tanto se trata de dos fases diferenciadas pero íntimamente relacionadas entre sí. Cada una de estas fases se divide a su vez en diferentes apartados, como puede verse en la figura 2-11, en la que se expone el proceso que se define en este trabajo.

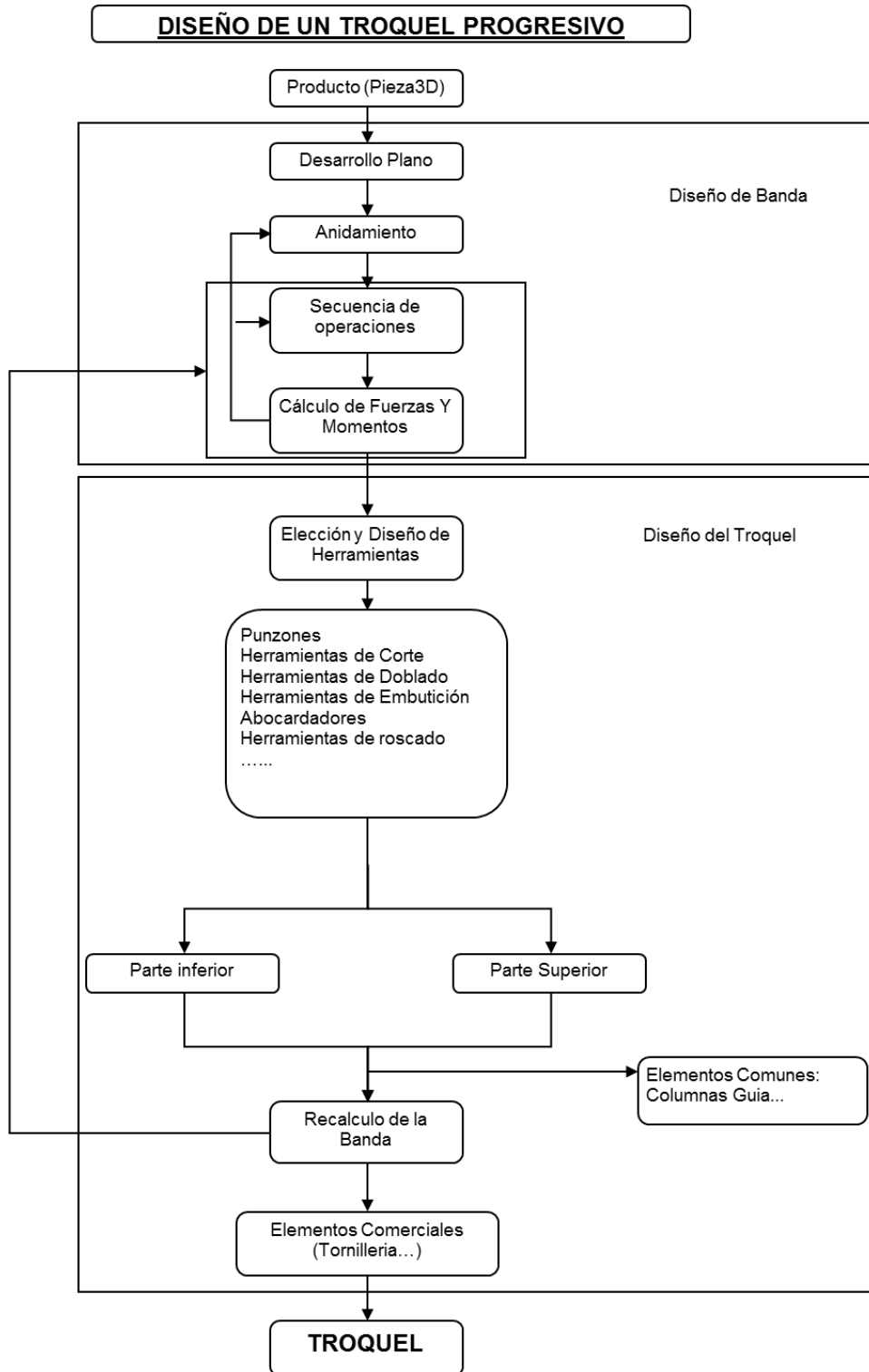


Figura 2-11: Proceso de diseño de un troquel progresivo.

2.6. Diseño de banda.

El diseño de banda es la etapa inicial en el diseño de un troquel. Una vez definido, se realiza el diseño del troquel tomándolo como referencia. De hecho, la observación del diseño de banda informa de la evolución que se produce en la tira de chapa a medida que ésta va recorriendo el troquel, así como el efecto que tienen las diferentes operaciones que la transforman desde una tira plana hasta la pieza acabada.

En el diseño de banda los datos de partida surgen de la configuración y las características de la pieza que se va a fabricar. Por lo tanto, antes de proceder a su diseño se realiza un análisis exhaustivo, del que se obtendrá la información para diseñar la banda y el troquel correspondiente.

El diseño de banda se puede organizar siguiendo la secuencia que se muestra en la figura 2-12, que se inicia con el desarrollo plano de la pieza, incluyendo finalmente el cálculo de las fuerzas y momentos que intervienen en el proceso. En los siguientes apartados se exponen con detalle los pasos a seguir en el diseño de banda.

DISEÑO DE BANDA

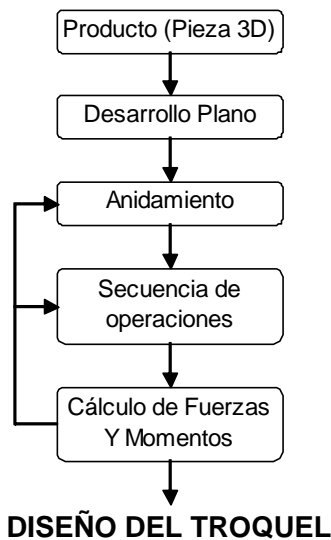


Figura 2-12: Secuencia del diseño de Banda

2.6.1 Desarrollo plano.

Como el elemento a fabricar (figura 2-13) se va a obtener a partir de una tira plana de chapa, es necesario obtener su desarrollo plano, el cual se irá transformando mediante las operaciones a las que se somete en el interior del troquel hasta obtener la pieza deseada.

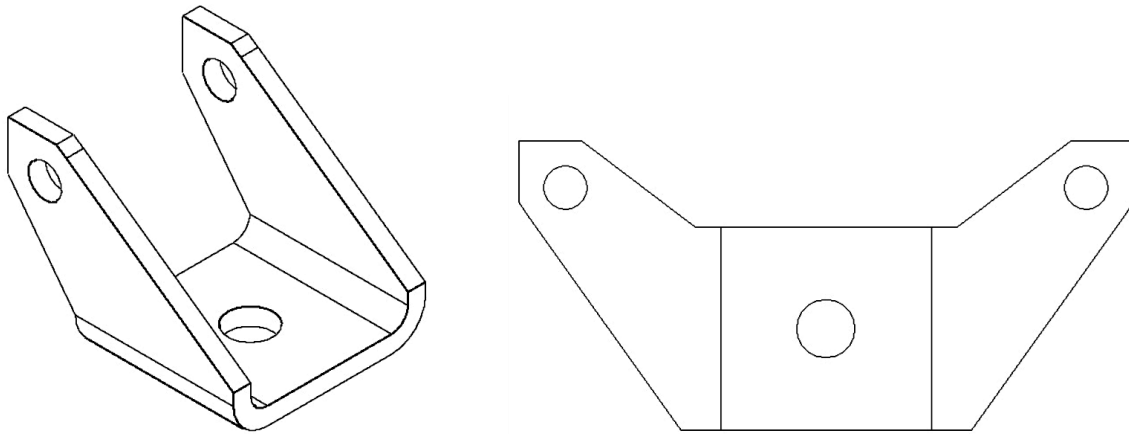


Figura 2-13: Desarrollo Plano.

El desarrollo plano de la pieza se obtiene “desdoblando” los dobleces de la pieza, los demás elementos que cambian la forma de la chapa no se tienen en cuenta al trazar el desarrollo, por lo que dichas operaciones se agregan posteriormente.

Por tanto, para determinar el desarrollo plano de una pieza se determina la longitud de las partes dobladas (figura 2-14). Para ello se ha de conocer la posición de la fibra neutra del elemento doblado, que depende principalmente de la relación entre el espesor y el radio interior de la chapa, aplicándose para su determinación tablas experimentales. Una vez determinada la posición de la fibra neutra, la longitud de los elementos doblados se obtiene como sigue:

$$L = (r + Ks) \times \beta \quad (\text{ec. 3})$$

siendo:

L: Longitud desplegada;

r: Radio interior;

$K = y/s$, factor que indica la posición de la fibra neutra;

β : Ángulo de doblado;

s: Espesor de la chapa;

y: distancia entre la fibra neutra y el exterior de la chapa;

Esto se aprecia en la figura 2-14.

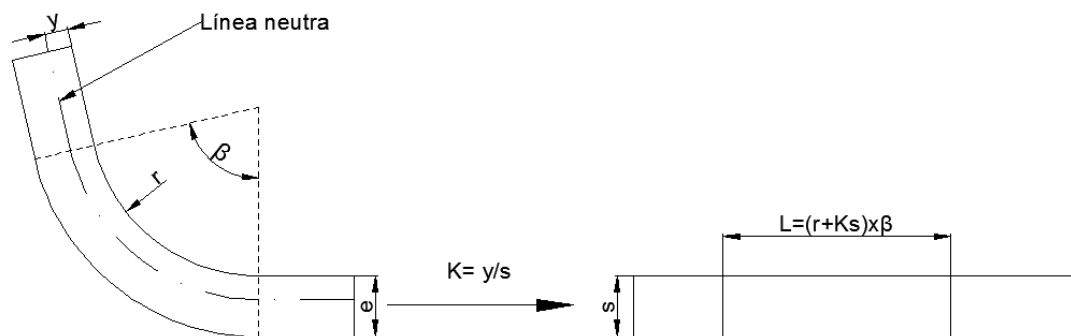


Figura 2-14: Factor K.

Actualmente la gran mayoría de los programas CAD que contienen módulos específicos para el diseño de piezas de chapa, realizan este proceso automáticamente, basándose en los fundamentos expuestos, aunque según sea el software los procedimientos empleados para obtenerla varían.

Algunos de los principales procedimientos que se emplean son:

Factor K.

El método clásico consiste en indicar directamente el valor del factor K, mediante el cual se determina la posición de la fibra neutra. Este factor depende del material, espesor, del radio de curvado y de la amplitud del ángulo.

Norma DIN 6935.

La norma DIN 6935 sobre el conformado en frío incluye un factor de calibración K que tiene en cuenta las variaciones longitudinales de generadas en el plegado. El factor K considerado es $K = y/(s/2)$. Esta norma proporciona unas fórmulas empíricas para su

determinación, dependiendo de la relación entre el radio de doblado y el espesor de la chapa:

$$\begin{aligned} \text{Si } r/s > 5 & \rightarrow K = 1 \\ \text{Si } r/s \leq 5 & \rightarrow K = 0.65 + \frac{1}{2} \log\left(\frac{r}{s}\right) \end{aligned}$$

Siendo la longitud desplegada $L = a + b + v$ (figura 2-15).

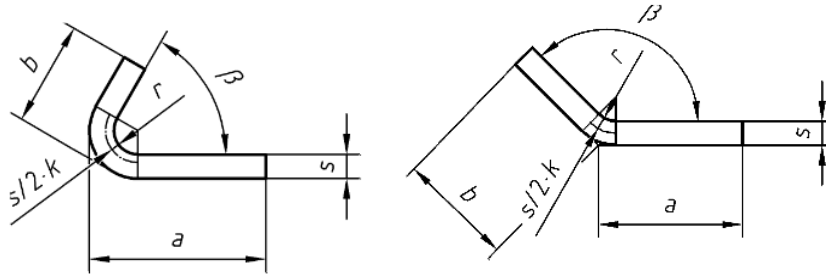


Figura 2-15: Longitud desplegada según DIN 6935.

siendo v:

$$\begin{aligned} \text{para } 0 < \beta \leq 90^\circ & \rightarrow v = \pi \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) \cdot \left(r + \frac{s}{2} \cdot K \right) - 2(r + s) \\ \text{para } 90 < \beta \leq 165^\circ & \rightarrow v = \pi \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) \cdot \left(r + \frac{s}{2} \cdot K \right) - 2(r + s) \tan\left(\frac{180^\circ - \beta}{2}\right) \end{aligned}$$

Tabla de plegado.

Estas tablas (tabla 2-2), dependiendo del ángulo, radio y espesor de la pieza, proporcionan el valor de la longitud de la línea neutra.

La gran ventaja de estas tablas es que son los propios ingenieros los que introducen dichos valores, por lo que, realizando los correspondientes ensayos para cada tipo de material que se vaya a emplear, se obtienen los resultados que más se aproximan a las características de la pieza una vez fabricada.

Tabla 2-2: Ejemplo de tabla de plegado (ASM Handbook Vol. 14)

Table 2 Bond allowances for 90° bends in low-carbon steel and aluminum alloy 5052

Metal thickness (t)		Bend allowance mm (in.), for bends with inside radius (r) of:									
		0.8 mm ($\frac{1}{32}$ in.)		1.6 mm ($\frac{1}{16}$ in.)		2.4 mm ($\frac{3}{32}$ in.)		3.2 mm ($\frac{1}{8}$ in.)		6.4 mm ($\frac{1}{4}$ in.) steel	13 mm ($\frac{1}{2}$ in.) steel
mm	in.	Steel	Aluminum	Steel	Aluminum	Steel	Aluminum	Steel	Aluminum		
0.81	0.032	1.50 (0.059)	1.45 (0.057)	1.68 (0.066)	1.73 (0.068)	2.01 (0.079)	2.08 (0.082)	2.36 (0.093)	2.41 (0.095)	3.71 (0.146)	6.45 (0.254)
1.27	0.050	2.21 (0.087)	1.98 (0.078)	2.57 (0.101)	2.31 (0.091)	2.90 (0.114)	2.67 (0.105)	3.28 (0.129)	3.00 (0.118)	4.27 (0.168)	7.01 (0.276)
1.57	0.062	2.67 (0.105)	2.41 (0.095)	3.00 (0.118)	2.74 (0.108)	3.35 (0.132)	3.05 (0.120)	3.68 (0.145)	3.38 (0.133)	4.65 (0.183)	7.37 (0.290)
1.98	0.078	3.25 (0.128)	2.95 (0.116)	3.61 (0.142)	3.33 (0.131)	3.94 (0.155)	3.66 (0.144)	4.29 (0.169)	3.99 (0.157)	5.13 (0.202)	7.87 (0.310)
2.29	0.090	3.71 (0.146)	3.30 (0.130)	4.06 (0.160)	3.66 (0.144)	4.39 (0.173)	3.99 (0.157)	4.75 (0.187)	4.32 (0.170)	5.52 (0.217)	8.23 (0.324)
3.18	0.125	5.03 (0.198)	4.44 (0.175)	5.36 (0.211)	4.80 (0.189)	5.69 (0.224)	5.16 (0.203)	6.17 (0.243)	5.49 (0.216)	6.61 (0.260)	9.32 (0.367)
4.78	0.188	7.34 (0.289)	6.50 (0.256)	7.67 (0.302)	5.51 (0.217)	8.02 (0.316)	7.19 (0.283)	8.36 (0.329)	7.54 (0.297)	9.73 (0.383)	11.3 (0.443)
6.35	0.250	9.71 (0.382)	8.59 (0.338)	10.0 (0.395)	8.92 (0.351)	10.4 (0.409)	9.27 (0.365)	10.8 (0.424)	9.60 (0.378)	12.1 (0.476)	13.2 (0.519)
7.95	0.313	12.0 (0.474)	...	12.4 (0.488)	...	12.7 (0.501)	...	13.1 (0.515)	...	14.5 (0.569)	17.2 (0.676)
9.52	0.375	14.4 (0.566)	...	14.7 (0.580)	...	15.1 (0.593)	...	15.4 (0.607)	...	16.8 (0.661)	19.5 (0.768)
11.1	0.437	16.7 (0.658)	...	17.1 (0.672)	...	17.4 (0.685)	...	17.8 (0.699)	...	19.1 (0.752)	21.8 (0.860)
12.7	0.500	19.0 (0.750)	...	19.4 (0.764)	...	19.7 (0.777)	...	20.1 (0.791)	...	21.5 (0.845)	24.2 (0.952)

2.6.2 Anidamiento.

Determinado el desarrollo plano del elemento a fabricar se analiza cuál es la posición más adecuada de la figura en la tira de chapa o fleje. Además, una vez determinada su posición se ha de calcular el ancho de banda y la separación entre dos piezas adyacentes. Esta operación se denomina **anidamiento** de las figuras.

Consiste en calcular dicha separación y también el paso de banda (figura 2-16), es decir la distancia entre un punto de una pieza y el mismo punto de la pieza contigua. Dado que un troquel progresivo tiene diferentes etapas en las que se va modificando la

tira de chapa a medida que se desplaza se ha de determinar la separación mínima entre posiciones contiguas. La distancia mínima entre dos piezas contiguas se recomienda que sea al menos 1.5 veces el espesor de la chapa (Oehler-Kaiser 1977).

La posición óptima depende de varios factores, algunos de ellos contrapuestos, siendo uno de los más importantes el ahorro de material. Debido a las grandes producciones para las cuales se diseñan este tipo de troqueles, es importante considerar el material desechado en el coste de la producción. Por lo tanto, un correcto diseño de la banda, en el que la ubicación de la figura es fundamental, permite obtener un coste menor aunque a veces complica el diseño del troquel.

Para maximizar la utilización de material y obtener menor cantidad de desecho se han desarrollado una serie de algoritmos y procedimientos que han ido evolucionando, obteniéndose métodos más precisos. El porcentaje de utilización del material se determina según la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{A_0}{A_1} = \frac{A_0}{d_p \cdot h_B}$$

siendo

A_0 : área útil

A_1 : área total

d_p : distancia entre dos piezas

h_b : anchura de banda.

Otro de los parámetros importantes para el diseño del troquel que se obtiene en esta fase del diseño es el ancho de banda. El ancho de banda se calcula sumando a la anchura de la pieza plana o desplegada unos márgenes de seguridad que eviten fallos o roturas de la chapa y disponga de suficiente rigidez; como regla práctica se recomienda que este margen sea al menos 1.5 veces el espesor de la chapa (Oehler-Kaiser 1977).

Además de tener en cuenta cuál es la distribución más adecuada para obtener el mayor ahorro de material, hay que atender a factores tecnológicos, que también influyen en la elección de la distribución más adecuada. El más importante de estos factores es la

dirección del grano en la chapa, principalmente cuando hay elementos doblados. En tal caso se recomienda que la dirección del doblado no sea paralela a la dirección del grano, para evitar roturas de la chapa, siendo recomendable que el ángulo formado por la dirección del grano y el doblado sea mayor que 45°.

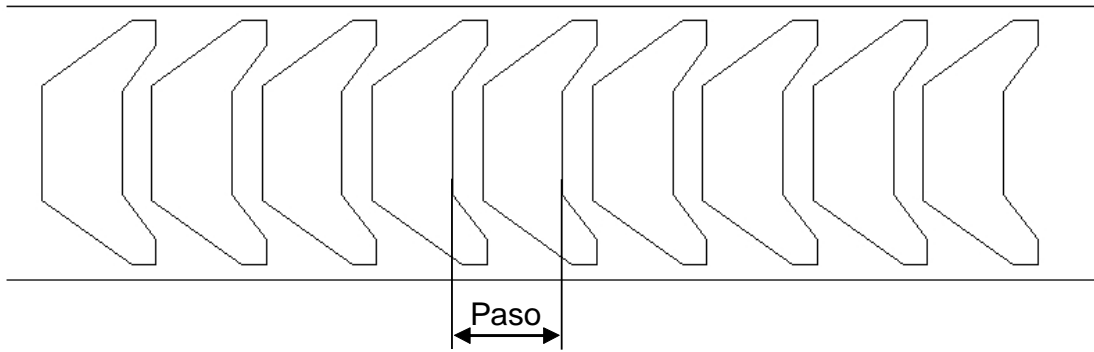


Figura 2-16: Distribución de la figura y anidamiento

Posteriormente se analiza exhaustivamente esta fase del proceso.

2.6.3 Etapas del troquel. Secuencia de operaciones.

Después de haber definido la posición idónea de la pieza plana, la separación entre cada pieza y el ancho de banda hay que precisar el número de etapas que se van a realizar en el interior del troquel, es decir, cuantos pasos o golpes de prensa son necesarios para obtener la pieza final partiendo de la tira de chapa. Por lo tanto, se han de determinar las diferentes operaciones que se han de realizar, el orden y las operaciones que se realizarán en cada etapa del troquel (figura 2-17).

En lo que se refiere al orden de las operaciones hay una serie de recomendaciones prácticas extraídas de la experiencia que es conveniente tener en cuenta, ya que ayudan a obtener piezas de mayor calidad y precisión. Algunas de las principales recomendaciones se indican a continuación:

- En las primeras etapas del troquel es conveniente realizar las operaciones de punzonado. En la primera etapa del troquel se punzonan los orificios en los que se acoplan los buscadores, que son los elementos que guían la banda.

- Los procesos de embutición, así como otros que llevan asociada una deformación plástica importante de la chapa, como abocardados y roscados, es aconsejable realizarlos, también, en las primeras etapas del troquel. Esto es debido, a que al no haberse eliminado mucho material de la banda, su rigidez es mayor, y el trabajo más preciso.
- En los pasos sucesivos se llevan a cabo las restantes operaciones de corte, hasta dar forma a la pieza que se busca.
- Los doblados es recomendable que se realicen en las últimas etapas del troquel. La operación final es el corte que separa a la pieza del resto de la banda y elimina el trozo que la une a la siguiente.

Resumiendo, se trata de que el fleje mantenga la mayor rigidez posible durante el proceso, para lo cual las operaciones de posicionamiento se realizan en las etapas iniciales y las que requieren mayores esfuerzos se hacen principalmente en etapas centrales de forma que se compensen los momentos.

Este orden recomendado, puede modificarse dependiendo de las características del elemento a fabricar. Además en una misma etapa se pueden realizar varias operaciones siempre que sean compatibles y la separación entre las herramientas lo permita.

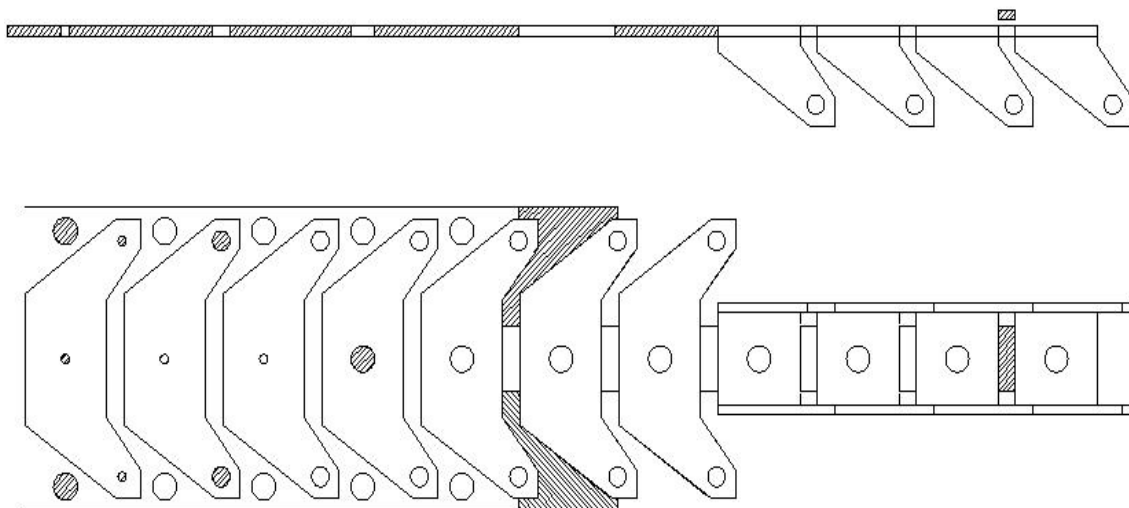


Figura 2-17: Etapas del troquel

También suele ser necesario introducir alguna etapa en la que no se realice ninguna operación para evitar interferencias entre operaciones y dejar espacio para colocar los elementos y herramientas interiores del troquel.

La optimización de este proceso es uno de los objetivos que se abordan en el desarrollo de esta tesis.

2.6.4 Determinación de esfuerzos.

El cálculo de las fuerzas necesarias para realizar cada operación y los momentos que generan es de vital importancia en el diseño de la banda, llegando a influir tanto en el orden de operaciones como en el número de etapas a realizar. El valor de estos esfuerzos depende del tipo de operación (corte, doblado...), del espesor de la chapa y del material, influyendo directamente en la elección de la prensa más adecuada para fabricar la pieza. Otra consecuencia, quizás más importante, es la elección de los ejes (X, Y) del troquel, que han de coincidir con los de la prensa evitando de esta manera momentos que ocasionarían menor precisión y mayor desgaste de herramienta.

En la siguiente tabla se indican las ecuaciones empleadas para el cálculo de las fuerzas necesarias para los principales procesos que se realizan en el troquel:

Tabla 2-3: Fuerzas que intervienen en el proceso

Punzonado	$F = \sigma \cdot A = 2\pi R \cdot s \cdot \sigma$	s: espesor de la chapa σ : resistencia del material R: radio del punzón
Corte	$F = \sigma \cdot A = L \cdot s \cdot \sigma$	L: Perímetro del área a cortar
Doblado	$F = \rho \frac{Ls^2\sigma}{h}$	L: longitud de la zona doblada; h: ancho de la herramienta de doblado; ρ : factor que depende de la forma de la herramienta de doblado

Después se calculan los momentos que producen, para lo cual se determinan inicialmente unos ejes (X, Y) coincidentes con los ejes de la banda y se calculan los momentos con respecto a dichos ejes. Es necesario que haya un equilibrio de momentos para garantizar una mayor precisión y un menor desgaste de las herramientas, y conseguir un mejor pisado de la chapa. Cuando esto no se consigue hay otros procedimientos de compensación, dependiendo del eje (X o Y) respecto del que exista desequilibrio.

En el caso de que el desequilibrio sea respecto del eje X, se plantean las siguientes opciones:

- Modificar las operaciones a realizar en cada etapa (si es posible).
- Añadir etapas en las que no se realice ninguna operación, cambiando de esta forma la distribución de momentos.

Si el desequilibrio es respecto del eje Y, las soluciones son bastante más complejas:

- Cambiar la posición de dicho eje.
- Incluir dos piezas simétricas en la banda.
- Diseñar un troquel en el que entren dos tiras de chapa a la vez, estando estas dispuestas simétricamente respecto del eje Y.

2.7. Diseño del troquel.

De acuerdo con el proceso que se ha propuesto en la figura 2-11, una vez realizado el diseño de banda, se pasa al diseño del troquel que se corresponde con dicho diseño de banda, en el que se definen los elementos que lo forman, su ubicación y las relaciones y dependencias entre ellos, así como su ensamblaje.

En primer lugar se aborda el diseño de las herramientas de conformado (punzones, herramientas de corte,...). Esta fase se realiza a partir del diseño de banda previo, a partir del cual se extraen los parámetros geométricos que definen esas herramientas. Inicialmente es aconsejable definir las herramientas normalizadas, tales como punzones, abocardadores, herramientas de roscar... y sus correspondientes matrices.

Posteriormente se diseñan las herramientas que son específicas del troquel. Se desarrolla a continuación en esta tesis una metodología para el diseño de herramientas de corte de áreas irregulares que dan forma a la chapa.

El siguiente paso es el diseño de las dos partes que configuran el troquel, superior e inferior, con sus correspondientes placas. La forma de estas placas ha de adaptarse a las herramientas que se han diseñado, de tal forma que se puedan alojar en su interior y desplazarse sin interferencias entre sí y los demás elementos del troquel, además de adaptarse al diseño de banda propuesto. Cuando se producen interferencias entre elementos del troquel es necesario redefinir el diseño de banda, bien introduciendo etapas libres o bien redistribuyendo las operaciones de cada etapa.

2.8. Diseño de herramientas de corte no normalizadas.

Dentro del proceso de diseño de troqueles, una vez obtenido el diseño de banda acorde a la secuencia de operaciones previamente definida, se procede a diseñar o determinar las herramientas necesarias para realizar el trabajo. El conjunto punzón-troquel queda definido por la geometría del elemento que se quiere cortar. Las formas geométricas más comunes (por ejemplo, formas circulares para la realización de agujeros...) se encuentran normalizadas o cuentan con herramientas comerciales por lo que los útiles empleados en su fabricación también lo están, no siendo necesario por tanto su diseño, sino la elección de la herramienta correcta.

Sin embargo, hay otras herramientas que han de ser específicas para cada troquel o pieza, no siendo posible obtenerlas a partir de catálogo, ya que es necesario que su diseño se adapte a la geometría propia de la pieza.

Este apartado se centra en el diseño de las herramientas de corte propias para cada troquel, que se han de adaptar a la geometría que presenta la pieza, por lo que generalmente no son herramientas catalogadas o estándar.

Al igual que en el diseño de troqueles progresivos, el diseño de las herramientas específicas se realiza “manualmente”, basándose en la experiencia del diseñador.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado algunas aplicaciones informáticas que automatizan el proceso de diseño tanto del troquel como de las herramientas que lo componen.

Muchas de estas herramientas se centran en el estudio de las relaciones y restricciones que hay entre los diferentes elementos mecánicos del troquel (Jia et al. 1999, Jiang et al. 2006)...

Otras de las herramientas desarrolladas se centran en la localización y diseño de los buscadores (Ghatrehnaby and Arezoo 2009), diseño de las diferentes placas que conforman el troquel con la creación y localización de los agujeros que las configuran (Jiang et al. 2006, Jia et al. 2010b) ...

Se han desarrollado también sistemas para la elección y diseño de herramientas normalizadas y/o parametrizadas por los propios usuarios incluyendo bases de datos, librerías, catálogos... que simplifican y automatizan su selección (Jia et al. 2010b, Zhao 2006, Jia et al. 2008, Chen et al. 2009)...

Otros sistemas desarrollados se aplican al diseño de piezas y troqueles específicos, no generalistas, principalmente para componentes de sistemas eléctricos (Choi 1998a, Jia 2011).

El diseño de herramientas no normalizadas o de catálogo la han desarrollado pocos investigadores, generalmente incluida dentro de una aplicación o metodología más amplia (Choi 1998b, Choi 2001).

2.8.1 Características principales de las herramientas de corte.

La operación de corte de la chapa es una de las más frecuentes y está presente en todos los troqueles progresivos. Las herramientas para realizar el corte de la chapa (figura 2-18) están formadas por dos elementos:

- Punzón. Herramienta que presiona la chapa. Tiene la forma de la sección a cortar.

- Matriz. Es el negativo del punzón, debe ser hueca, con la forma de la sección a recortar, para que penetre el punzón y se produzca el corte. También ha de permitir la salida o expulsión del elemento cortado.



Figura 2-18: Conjunto de Punzón y Matriz.

El factor más importante sobre la calidad final del corte es el juego entre el punzón y la matriz. El juego o tolerancia, en el caso de punzones cilíndricos, es la diferencia de diámetro entre el punzón y la matriz (figura 2-19).

$$Juego = \frac{\phi_{Punzón} - \phi_{Matriz}}{2}$$

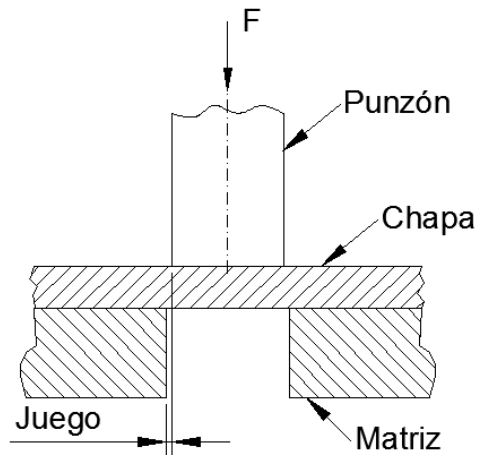


Figura 2-19: Juego entre el punzón y la matriz.

Dependiendo de que la pieza a obtener sea la que se expulsa o la que queda en la banda, el juego se aplica al diámetro del troquel o de la matriz, así:

- Se aplica a la matriz en el caso de que el material expulsado en el corte sea producto de desecho. De esta manera la chapa que continua dentro del troquel tiene la medida deseada. Es el caso habitual en los troqueles progresivos.

$$\phi_{Matriz} = \phi_{Punzón} + 2 \times \text{espesor} * \text{Juego}$$

- Se aplica al punzón cuando el material cortado es propiamente la pieza que se desea fabricar, obteniendo así la pieza con la forma buscada.

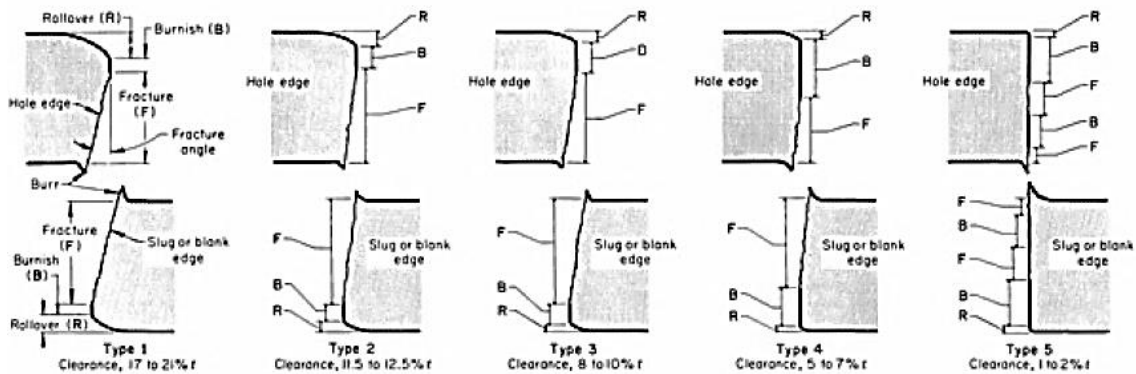
$$\phi_{Punzón} = \phi_{Matriz} - 2 \times \text{espesor} * \text{Juego}$$

A medida que su valor aumenta la zona de corte es más rugosa y la zona de deformación es mayor (figura 2.1). El juego suele darse en función del espesor “t” de la chapa. Sus valores más usuales varían entre 0.05 y 0.1 del espesor, aunque también dependen del tipo de material de la chapa. En la tabla 2-4 (ASM Handbook 1988), se indican los valores recomendados, en % del espesor de la chapa, en función del material y de la calidad deseada del corte, el tipo 1 tiene menos calidad y más juego y el tipo 5 tiene máxima calidad y menor juego (tabla 2-5).

Tabla 2-4: Juego recomendado en función de la calidad y precisión (ASM Handbook, 1988)

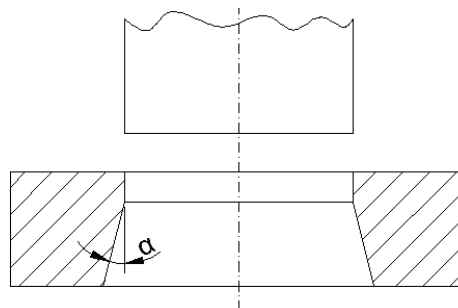
Work metal	Clearance per side, % of stock thickness				
	Type 1 ^(a)	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Low-carbon steel	21	11.5-12.5	8-10	5-7	1-2
High-carbon steel	25	17-19	14-16	11-13	2.5-5
Stainless steel	23	12.5-13.5	9-11	3-5	1-2
Aluminum alloys					
Up to 230 MPa (33 ksi) tensile strength	17	8-10	6-8	2-4	0.5-1
Over 230 MPa (33 ksi) tensile strength	20	12.5-14	9-10	5-6	0.5-1
Brass, annealed	21	8-10	6-8	2-3	0.5-1
Brass, half hard	24	9-11	6-8	3-5	0.5-1.5
Phosphor bronze	25	12.5-13.5	10-12	3.5-5	1.5-2.5
Copper, annealed	25	8-9	5-7	2-4	0.5-1
Copper, half hard	25	9-11	6-8	3-5	1-2
Lead	22	8-10	6.5-7.5	4-6	1.5-2.5
Magnesium alloys	16	5-7	3.5-4.5	1.5-2.5	0.5-1

Tabla 2-5: Calidad del corte (ASM Handbook, 1988).



Edge characteristic	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Fracture angle	14-16°	8-11°	7-11°	6-11°	...
Rollover ^(a)	10-20% <i>t</i>	8-10% <i>t</i>	6-8% <i>t</i>	4-7% <i>t</i>	2-5% <i>t</i>
Burnish ^(a)	10-20% <i>t</i> ^(b)	15-25% <i>t</i>	25-40% <i>t</i>	35-55% <i>t</i> ^(c)	50-70% <i>t</i> ^(d)
Fracture	70-80% <i>t</i>	60-75% <i>t</i>	50-60% <i>t</i>	35-50% <i>t</i> ^(e)	25-45% <i>t</i> ^(f)
Burr	Large, tensile plus part distortion	Normal, tensile only	Normal, tensile only	Medium, tensile plus compressive ^(g)	Large, tensile plus compressive ^(g)

Otro parámetro de diseño que se ha de considerar es el ángulo de desahogo (figura 2-20). Las matrices de corte suelen tener una ligera inclinación para permitir que el material cortado se extraiga fácilmente, y se evite el gripado del punzón con la matriz, mejorando la durabilidad del conjunto. A dicha inclinación se denomina ángulo de desahogo.



α : Ángulo de desahogo

Figura 2-20: Ángulo de desahogo.

2.8.2 Proceso de diseño.

Vistas las principales características del proceso de corte y de las herramientas correspondientes se presenta la metodología que se ha desarrollado para diseñar tanto el punzón como la matriz siguiendo los requisitos que se establecen para realizar esta operación. La fase más característica de este proceso es la delimitación de los contornos de corte.

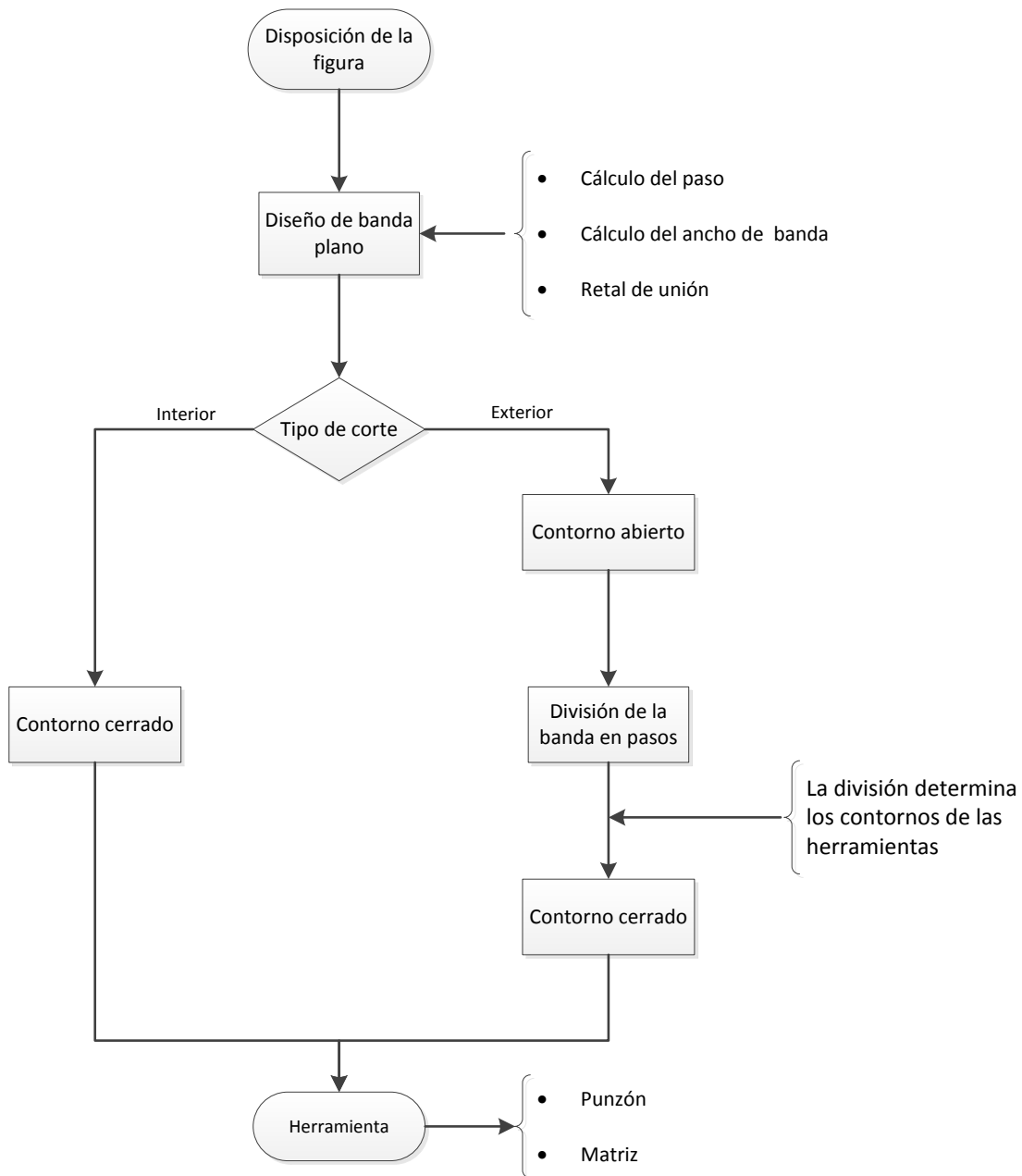


Figura 2-21: Proceso de diseño de herramientas de corte.

El punto de partida es la disposición óptima de la figura, obtenida anteriormente. A continuación se determina el diseño de banda manteniendo en todas las etapas la forma plana, ya que el procedimiento está orientado para desarrollar las herramientas de corte. Como se observa en la figura 2-21 el diseño de la herramienta de corte se centra en el cálculo del paso y el ancho de banda adecuados.

Se van a tener en cuenta consideraciones geométricas y características del material, tipo y espesor, para lo cual se aplican los parámetros correspondientes.

Detección de contornos.

La parte principal del proceso es detectar y definir el perfil de las herramientas de corte. Estos contornos pueden ser:

Contorno cerrado. Cuando el perfil a cortar es interno, es decir, situado en el interior de la pieza.

Contorno abierto. Es el perfil que define la forma exterior de la pieza. Generalmente se requiere más de una operación de corte. En este caso el perfil a cortar es abierto. Para cerrarlo se considera el contorno del fleje. La geometría de la herramienta suele sobrepasar ligeramente dicho contorno para evitar posibles rebabas y mejorar la distribución de fuerzas y momentos.

Si el contorno del corte es cerrado o interior se inicia el proceso con la definición de la geometría del corte a realizar y se procede al diseño de la herramienta de corte, considerando los parámetros que definen el punzón y la matriz (juego, ángulo de desahogo...).

Cuando el contorno de la forma a recortar es abierto el procedimiento varía ligeramente, ya que aunque la generación del punzón y de la matriz siguen un proceso similar la definición del contorno es diferente.

Para obtener el contorno se divide la banda en igual número de tramos que el de etapas de la banda diseñada bien en la misma posición o desplazadas una determinada medida, de tal manera que se obtenga la geometría más favorable para el diseño de la herramienta. La anchura de cada una de estos tramos es igual al paso.

División de la banda:

Para elegir el punto de división el principal criterio es que la longitud de corte sea mínima, así las fuerzas son menores, si bien se proponen otras alternativas tales como:

- Como norma general se divide la banda a partir del punto más cercano al contorno de la banda (figura 2-22), ya que la longitud de corte suele ser mínima.

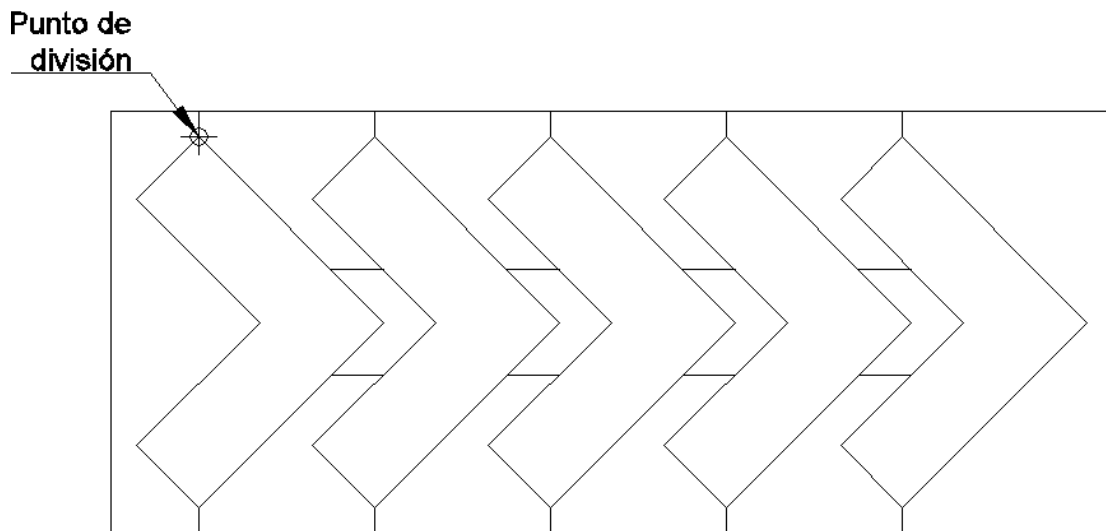


Figura 2-22: División de la banda considerando el punto más cercano al contorno.

- En el caso de que haya varios puntos a la misma distancia del borde de la banda, se toma una de ellos, a elección del diseñador. Como se ve en la figura 2-23 se han tomado 3 posibles opciones para dividir la banda. En este caso la segunda opción, en la que el punto de división está situado en el medio de la arista, se considera el más aconsejable.

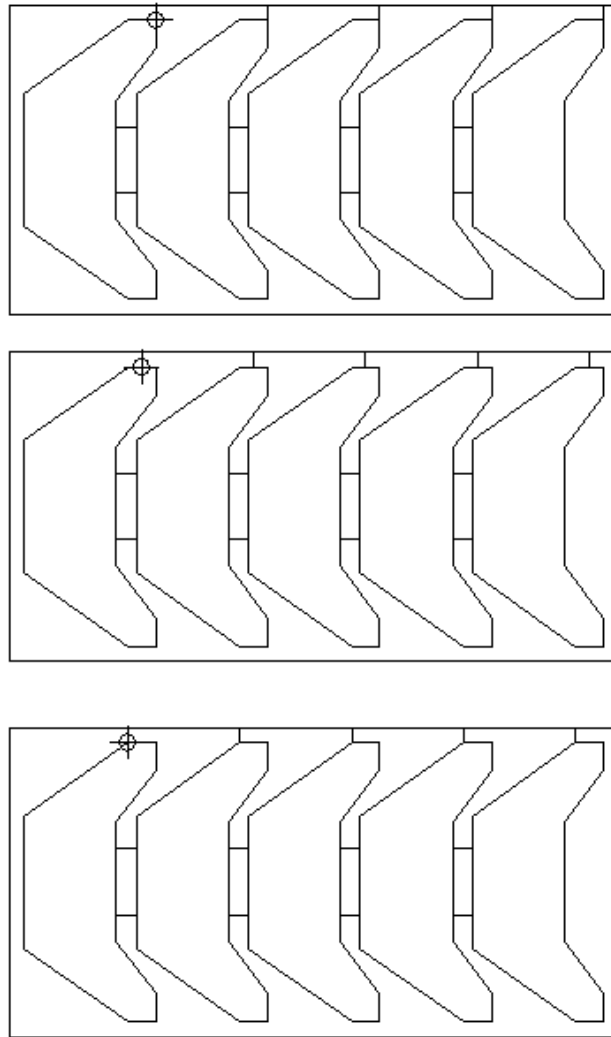


Figura 2-23: Opciones de división de banda.

- En el caso de piezas simétricas, para elegir la disposición más adecuada, se presentan los siguientes criterios:
 1. Que el punto de inicio coincida con el eje de simetría de la pieza (figura 2-24).
 2. Que el eje de simetría de la división coincida con el eje de simetría de la pieza, así la figura queda situada en el centro de un rectángulo cuyas dimensiones son el paso y el ancho de banda (figura 2-25).

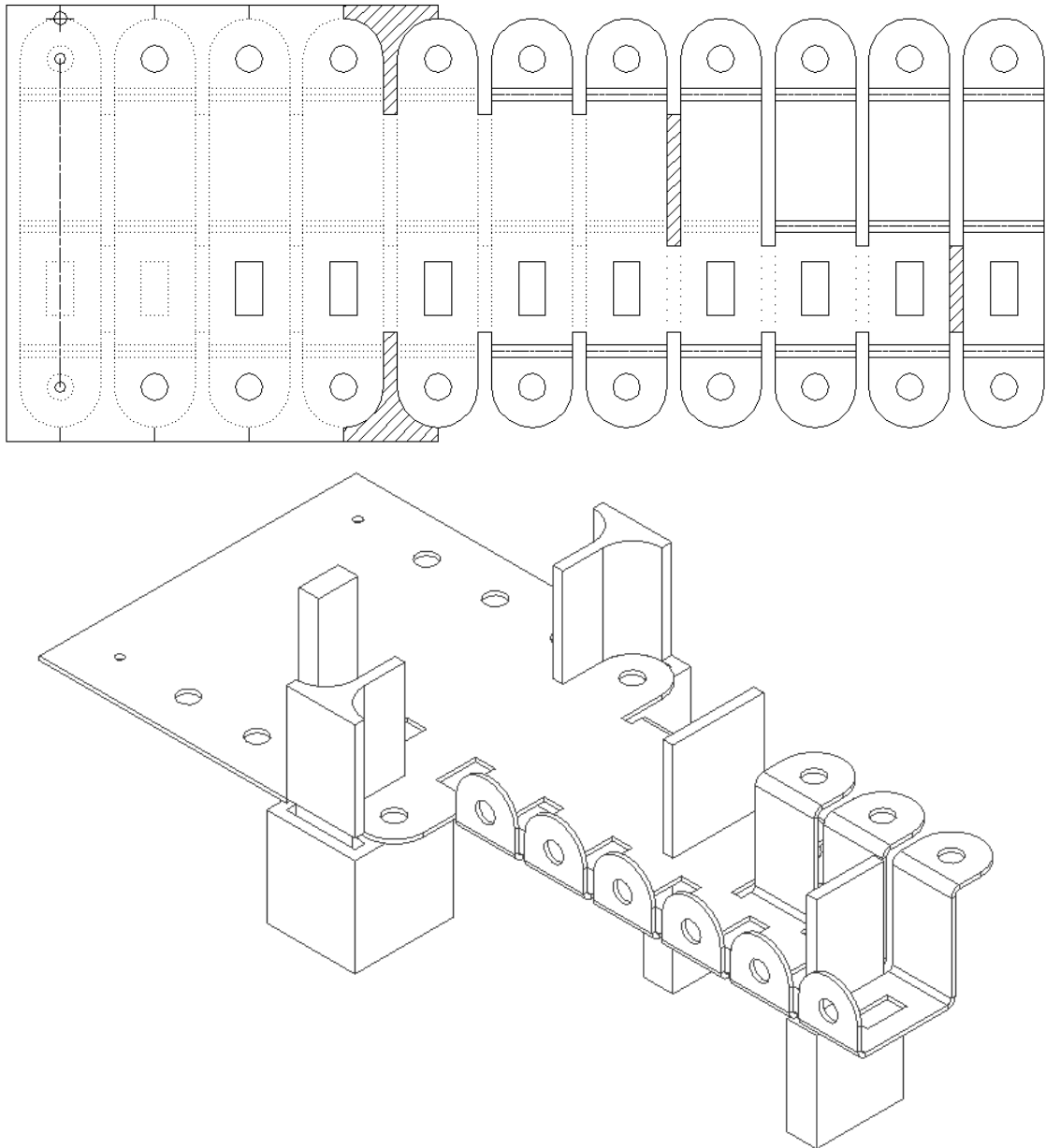


Figura 2-24: División de banda en piezas simétricas. El lado del rectángulo coincide con el eje de simetría de la pieza.

La elección de la opción más adecuada depende de la forma de la pieza. En el ejemplo mostrado la elección más adecuada es la primera (figura 2-24), al tener la herramienta menor longitud de corte por lo que los esfuerzos son menores y la herramienta resulta más robusta, es decir, secciones mayores, lo que aporta mayor durabilidad y menor mantenimiento.

Dividida la banda en partes iguales se selecciona el contorno de la herramienta de corte, siendo este proceso similar al del contorno cerrado.

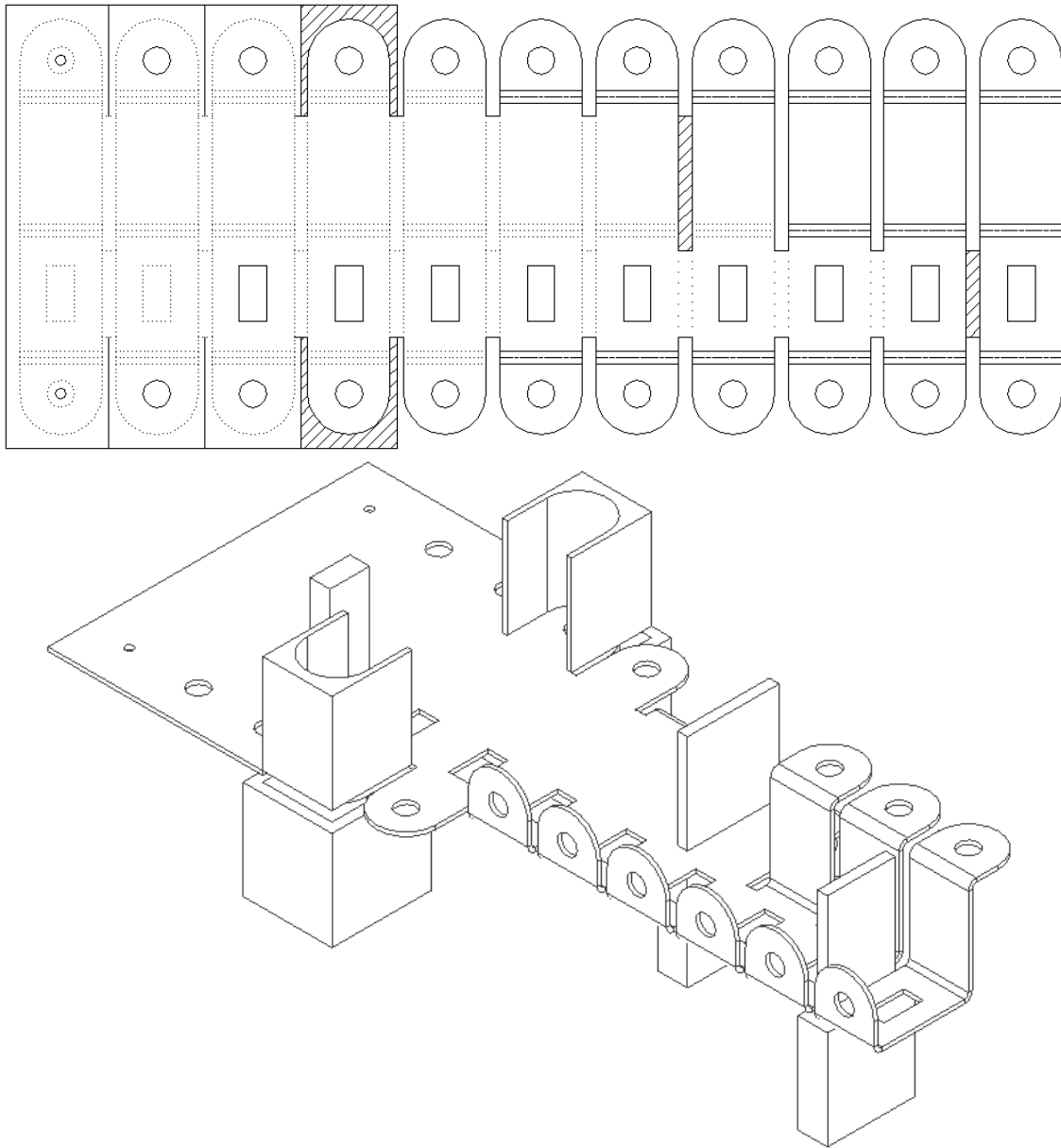


Figura 2-25: División de la banda en la que el eje de simetría de la división coincide con eje de simetría de la pieza.

CAPITULO III

DISEÑO DE BANDA

3.1. INTRODUCCIÓN.

En el diseño de banda se desarrollan dos aspectos fundamentales como son el anidamiento y la secuencia de operaciones y que son objeto de estudio detallado en este trabajo.

3.2. DISPOSICIÓN DE LA FIGURA. ANIDAMIENTO.

Como se ha señalado anteriormente, uno de los aspectos más importantes en el diseño de banda de piezas estampadas es la distribución de la figura en la banda. La elección más adecuada depende de varios factores, siendo uno de los más importantes el ahorro de material. Debido a las grandes producciones para las cuales se diseñan este tipo de troqueles, un coste muy importante recae sobre el material, por lo que se ha de procurar que el material de desecho sea mínimo. Por lo tanto una correcta distribución de la figura permite obtener ventajas económicas aunque a veces complique el diseño del troquel.

También hay que considerar factores tecnológicos que influyen en la calidad del producto como es la dirección del grano en la chapa, sobre todo cuando se incluyen operaciones de doblado. En tal caso se recomienda que la dirección de doblado y la dirección del grano no sean paralelas y entre ambas formen un ángulo mayor de 45° para evitar grietas y roturas de la chapa. Definida la orientación de la figura se determina el paso y el ancho de banda.

El ancho de banda es recomendable que sea el ancho de la pieza, en la orientación que se ha definido más unos márgenes que den la rigidez necesaria y eviten fallos o roturas. Como regla práctica se recomienda que éste margen sea, al menos 1.5 veces el espesor de la chapa. Para el cálculo del paso, a la longitud propia de la pieza se suma la separación entre dos piezas contiguas, que se recomienda sea igualmente 1.5 veces el espesor de la chapa.

3.2.1 Algoritmos de cálculo de la distribución óptima.

Inicialmente la búsqueda de la distribución más adecuada se realizaba manualmente, dependiendo de la experiencia y habilidad del diseñador.

Para optimizar la utilización de material y minimizar el material de desecho se han desarrollado algoritmos y procedimientos que han ido evolucionando a medida que se obtenían métodos más precisos.

Se puede indicar que algunos de los más usados son:

- Mínimo rectángulo
- Algoritmos rotacionales
- Suma de Minkowsky

de los cuales se explica el concepto en el que se basan y la mejora o diferencia con respecto al precedente.

3.2.2 Mínimo rectángulo.

Consiste en determinar el mínimo rectángulo que abarca la pieza desplegada (figura 3-1). A continuación se determina cual sería la posición óptima de la figura, es decir, la que menos excedentes deja (figura 3-2) distribuyéndose según la dirección de uno de los lados del rectángulo, generalmente el de menor longitud. La separación de las figuras, o paso, se corresponde con la longitud del lado del rectángulo que se ha tomado como eje.

La aparición del ordenador y de los primeros sistemas CAD trajo consigo el desarrollo de los primeros algoritmos que intentaban resolver este problema. Una de las primeras soluciones aportadas es la de Adamowicz y Albano (1976), que proponían calcular el rectángulo de menor área que contenía la figura, repitiéndolo después a lo largo de la tira de chapa. La utilización de este procedimiento no garantizaba la obtención de la solución óptima en la gran mayoría de las situaciones.

Una variación de este algoritmo fue contener la figura en otros polígonos conocidos, así Dori y Ben Bassat (1984) circunscribían la figura en polígonos convexos, repitiéndolo después a lo largo de la chapa. Al igual que en el caso del mínimo

rectángulo estos procedimientos no garantizaban en muchos casos la obtención de la solución óptima.

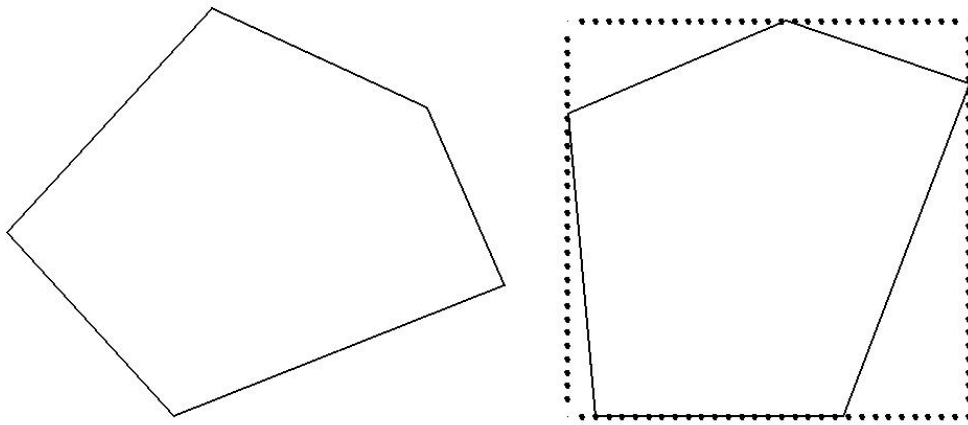


Figura 3-1: Mínimo rectángulos que contiene la figura

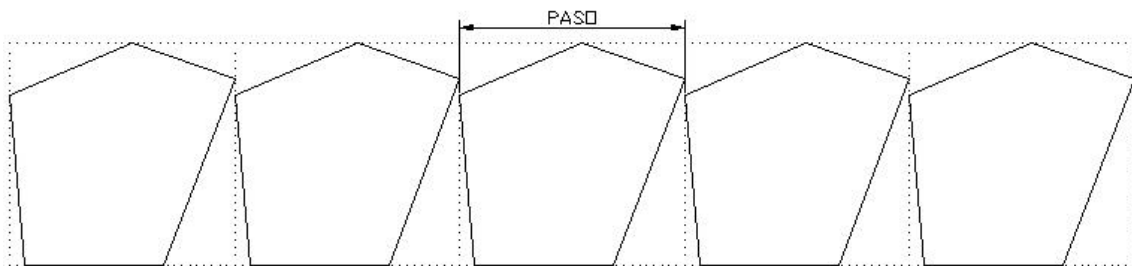


Figura 3-2: Distribución de la figura

Para calcular el mínimo rectángulo (figura 3-1) que contiene la figura hay diferentes procedimientos que se pueden emplear. Inicialmente, el procedimiento consiste en ir rotando la figura y, considerar los lados del rectángulo paralelos a los ejes X e Y respectivamente, calculando el rectángulo que la contiene en cada instante (Adamowicz y Albano 1976). La precisión de este procedimiento depende de la magnitud del incremento de ángulo que se tome. La posición óptima es aquella en la que el área del rectángulo es menor.

Si se observan las figuras 3-1 y 3-2 el menor rectángulo se corresponde, en este caso, con una posición en la cual un lado de dicho rectángulo es coincidente con una de las aristas del polígono. Esta es una propiedad en la que se basan Freeman y Shapira (1975). El procedimiento se simplifica notablemente al rotar la figura de modo que una

de sus aristas coincide con un lado del rectángulo (figura 3-3). El número de cálculos a realizar se reduce considerablemente, dependiendo del número de aristas de la figura y no del valor del ángulo incremento.

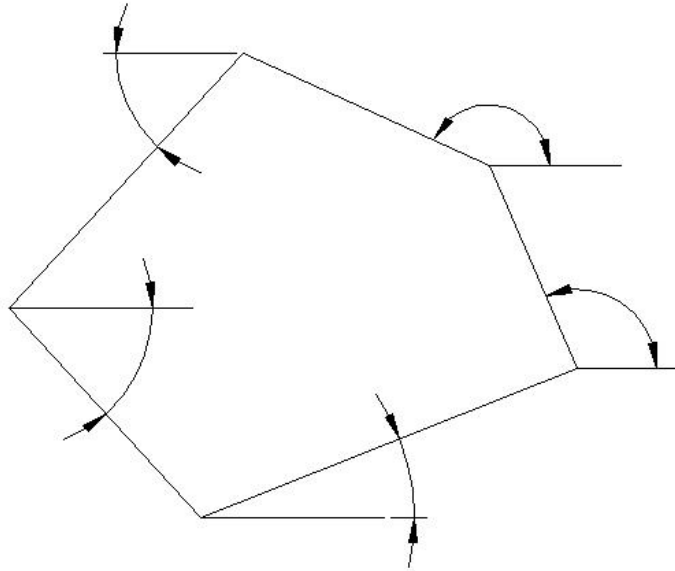


Figura 3-3: Ángulo de las aristas respecto al horizontal

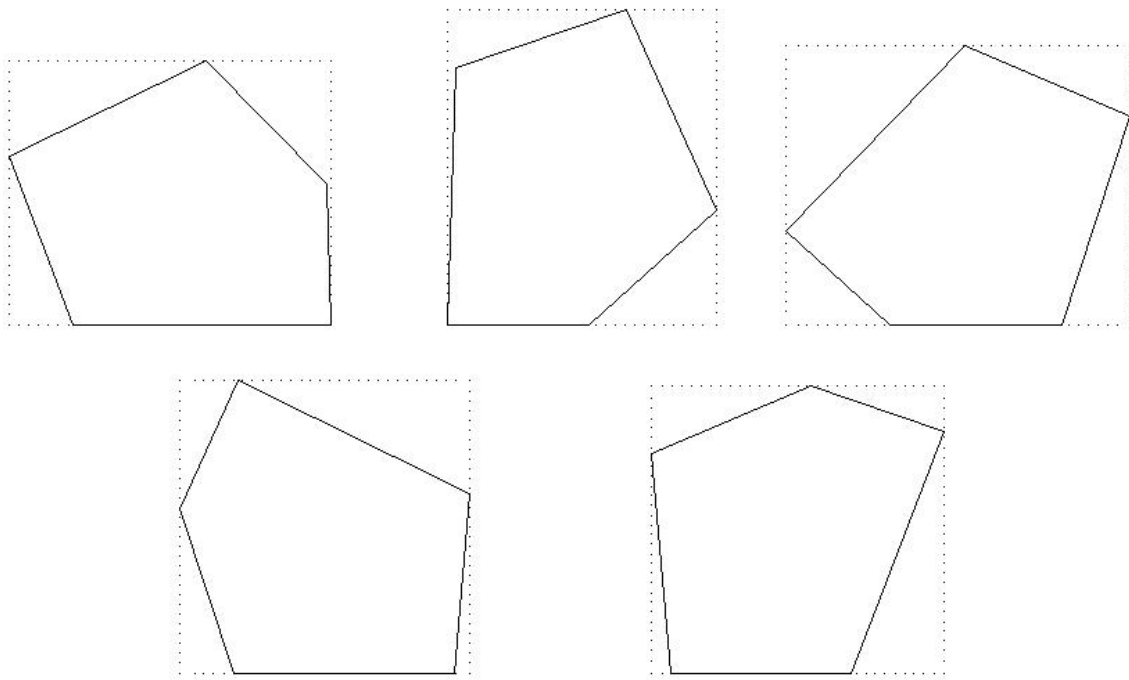


Figura 3-4: Posiciones a considerar

Cuando el polígono a considerar es convexo, como el de la figura 3-3, el número de rotaciones a realizar coincide con el número de aristas del polígono. Si es cóncavo lo anterior ya no se cumple. Para estudiar este caso se analiza el polígono cóncavo de la

figura 3-5 en el que las aristas 3-4 y 4-5 se observa que no pueden estar sobre un rectángulo que contenga a dicho polígono. Esto se resuelve considerando la envolvente convexa del polígono inicial, en la que se sustituyen los lados 3-4 y 4-5 por el 3-5.

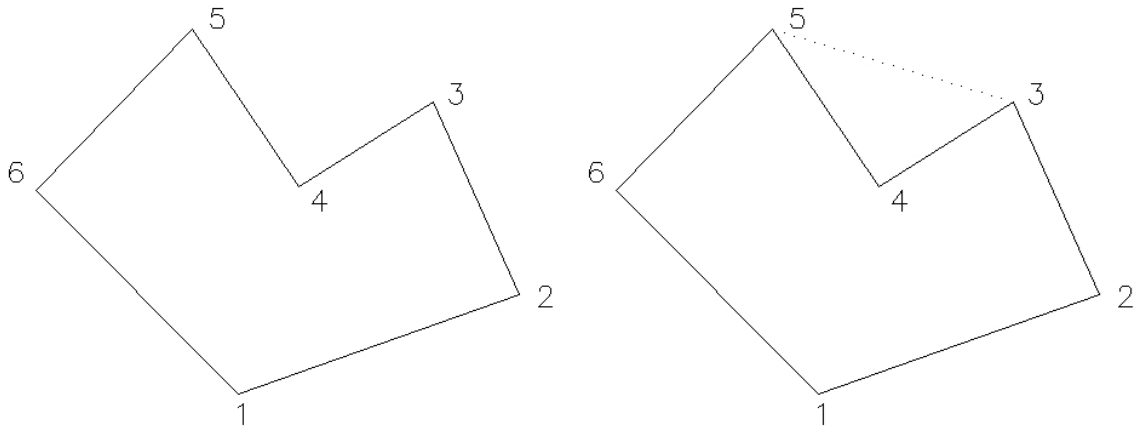


Figura 3-5: Envolvente convexa

Otra mejora introducida en el procedimiento inicial es el cálculo analíticamente exacto de la separación entre dos figuras adyacentes, el paso. Inicialmente se ha tomado como paso la longitud del lado del rectángulo coincidente con el eje lo cual en la mayoría de los casos hace que las dos figuras no estén en contacto, sino que estén separadas entre sí (figura 3-2). Para el cálculo del paso mínimo (figura 3-6) se determina la anchura máxima de la figura en la dirección de trabajo elegida, que ha de coincidir con uno de los vértices. Si se tienen en cuenta factores tecnológicos que obligan a que haya una separación mínima entre figuras consecutivas, se incrementa el paso mínimo obtenido (como se indicó anteriormente, este incremento depende del espesor de la chapa).

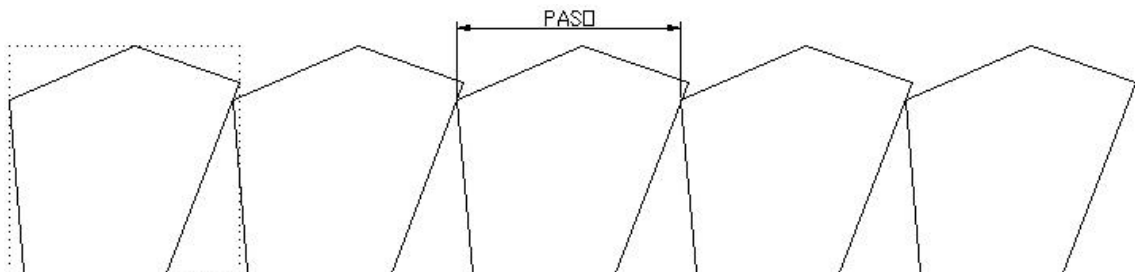


Figura 3-6: Distribución final

En este procedimiento los pasos se estructuran:

1. Representación de la figura inicial.
2. Obtención de la envolvente convexa de dicha figura. Si ya es convexa el resultado sería la inicial.
3. Cálculo de los ángulos que forman las aristas de la envolvente convexa con uno de los ejes de referencia.
4. Rotar la figura inicial dichos ángulos y calcular el rectángulo que la contiene en cada caso. Inicialmente, el rectángulo de menor área de los calculados indica cual es la posición más favorable de la figura, que usualmente se corresponde con el mayor ratio de ocupación de la chapa, aunque las mejoras introducidas en el cálculo del paso (figura 3-6) pueden hacer que en el rectángulo inicial estén superpuestos elementos de las figuras adyacentes, haciendo que el mayor ratio de utilización de la chapa no coincida necesariamente con el rectángulo de menor área.
5. Cálculo del paso.
6. Representación de la distribución obtenida.

3.2.3 Algoritmos rotacionales

Los algoritmos rotacionales (figura 3-7) consisten en determinar la distribución más adecuada de la figura rotándola incrementalmente, determinando en cada paso el ratio de utilización del material (Nee 1984). Se considera que la distribución es óptima cuando el ratio sea mayor.

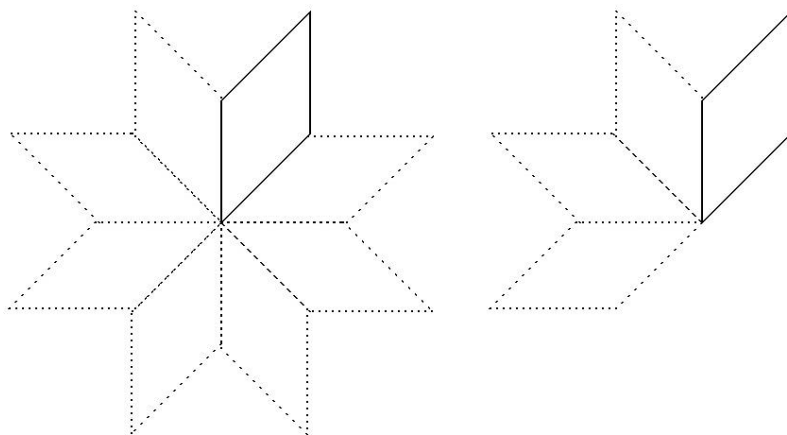


Figura 3-7: Rotación de la figura

En cada giro, el cálculo de la utilización del material se obtiene como sigue (figura 3-8):

- Se determina la separación entre dos figuras adyacentes (el paso). Para ello se calcula la anchura que tiene la figura en cada vértice, según la dirección elegida, siendo el paso el mayor valor calculado, y se incrementa considerando los factores tecnológicos correspondientes.
- El ancho de banda se determina trazando líneas paralelas a la dirección de trabajo por los puntos extremos de la figura, siendo la anchura la distancia entre estas dos líneas paralelas incrementada en lo referente al factor para que la banda mantenga la necesaria rigidez.
- El ratio es el cociente entre la superficie de la figura y el rectángulo de banda asociado. Se ha de tener en cuenta que dentro del rectángulo puede haber, además de la figura completa correspondiente, parte de las contiguas que se superponen. Esto se analiza en el anexo a este capítulo.

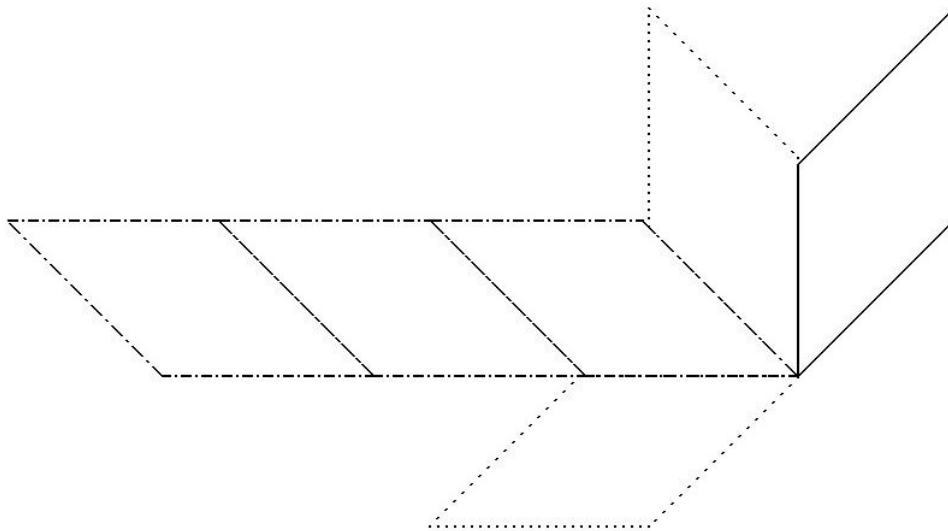


Figura 3-8: Solución óptima.

El principal inconveniente de este algoritmo radica en que no proporciona la distribución óptima, sino que ésta posición depende de la magnitud del ángulo incremento que se utilice, lo cual influye notablemente en la velocidad de cálculo. A medida que el incremento del ángulo disminuye el resultado obtenido se aproxima más

a la distribución ideal, en consecuencia la precisión aumenta, pero el tiempo de ejecución del programa se incrementa proporcionalmente.

En el ejemplo que se muestra en la figura 3-9 se puede comprobar el efecto que tiene el valor de ángulo incremento en la precisión del resultado.

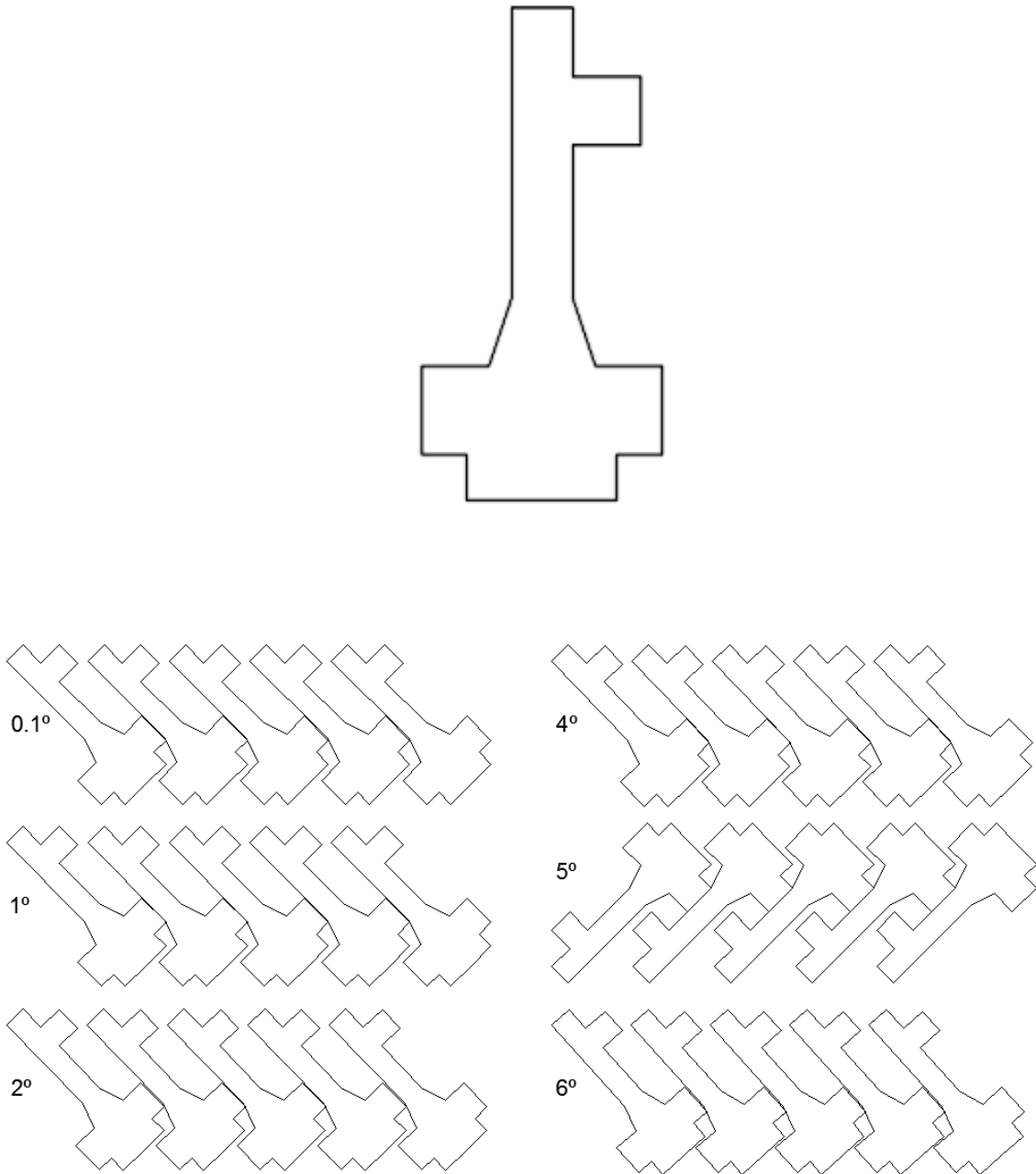


Figura 3-9: Distribución de la figura variando el incremento de ángulo.

En la tabla 3-1 se aprecia el tiempo de cálculo y la precisión obtenida.

Tabla 3-1 Influencia de la variación del incremento de ángulo

Δ Angulo	Tiempo (seg.)	Angulo	% Utilización
0.1°	103.25	45°	62.54
1°	10.75	45°	62.54
2°	5.23	44°	62.34
4°	2.5	44°	62.34
5°	2.1	135°	62.54
6°	1.73	42°	62.01

Las etapas de este procedimiento son:

1. Representación de la figura inicial.
2. Se fija el valor del incremento de ángulo.
3. Rotación de la figura.
4. Cálculo del paso.
5. Cálculo del porcentaje de utilización del material.
6. Iteración de los pasos 3-4-5 incrementado el ángulo de rotación.
7. Representación de la distribución óptima.

3.2.4 Suma de Minkowski

Los algoritmos más recientes utilizados para determinar la mejor orientación de la figura se basan en un concepto procedente de la geometría computacional, la suma de Minkowski, que se aplica en diferentes áreas. Mediante estas técnicas (Nye 2001a) se obtiene la posición óptima de la figura en la que el ratio de utilización de la banda es máximo.

La suma de Minkowski (figura 3-10) se define como:

$$A \oplus B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$$

donde $a + b$ es un vector que representa la suma de los vectores a y b , es decir $(a+b) = (ax+bx, ay+by)$.

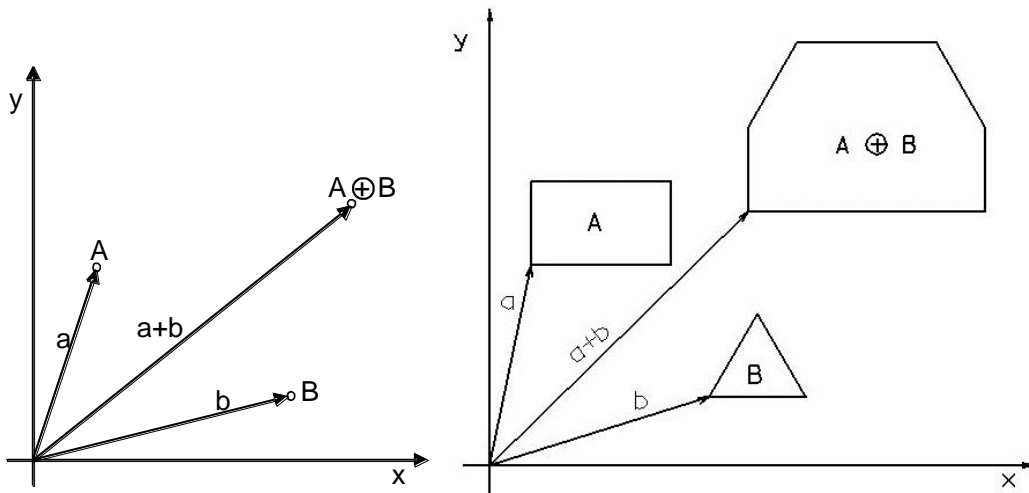


Figura 3-10: Suma de Minkowski de dos puntos (a) y de dos figuras (b)

La propiedad más interesante en este campo de aplicación, es la que permite determinar si existe superposición entre dos figuras geométricas. Para detectar superposición entre dos figuras A y B (figura 3-11) se realiza la suma $A \oplus (-B)$. Si A y B están superpuestos el polígono resultante de la suma $[A \oplus (-B)]$ contiene el origen. Por lo tanto, si se desplaza el polígono suma a una posición en la que el origen no esté en su interior, las figuras iniciales A y B no estarán superpuestas. Este desplazamiento no afecta a la forma de los polígonos iniciales, siendo la única variación que se produce, un desplazamiento de A o de B de igual magnitud que el desplazamiento sufrido por el polígono suma.

En el caso particular de piezas estampadas en el cuál se tiene una sola figura que se repite a lo largo de la banda, la suma que se ha de realizar es $[A \oplus (-A)]$, coincidiendo siempre el centro del polígono suma con el origen de coordenadas. De esta forma, para evitar que exista superposición entre una figura y la adyacente, sólo se ha de desplazar el polígono suma una determinada distancia, hasta que el origen de coordenadas esté fuera de dicho polígono.

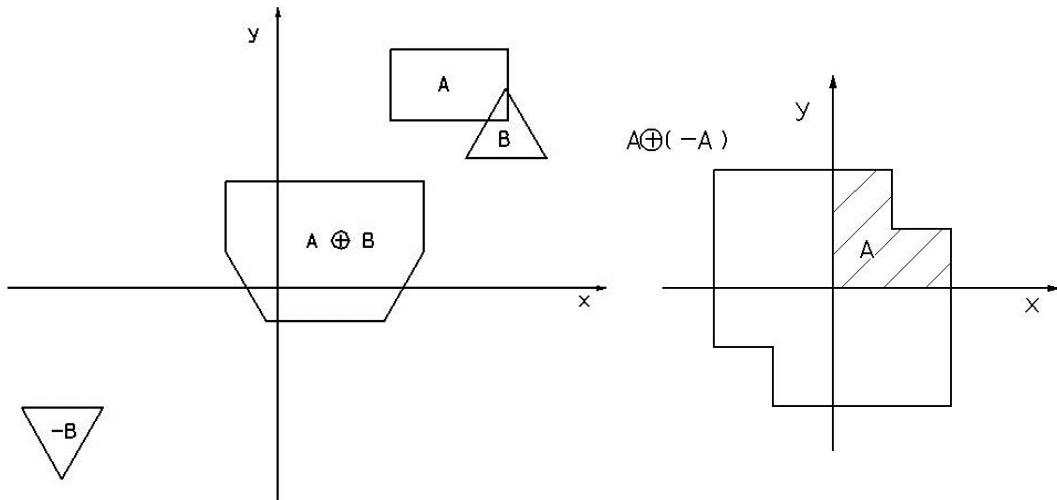


Figura 3-11: (a) Suma $A \oplus (-B)$ y (b) Suma $A \oplus (-A)$

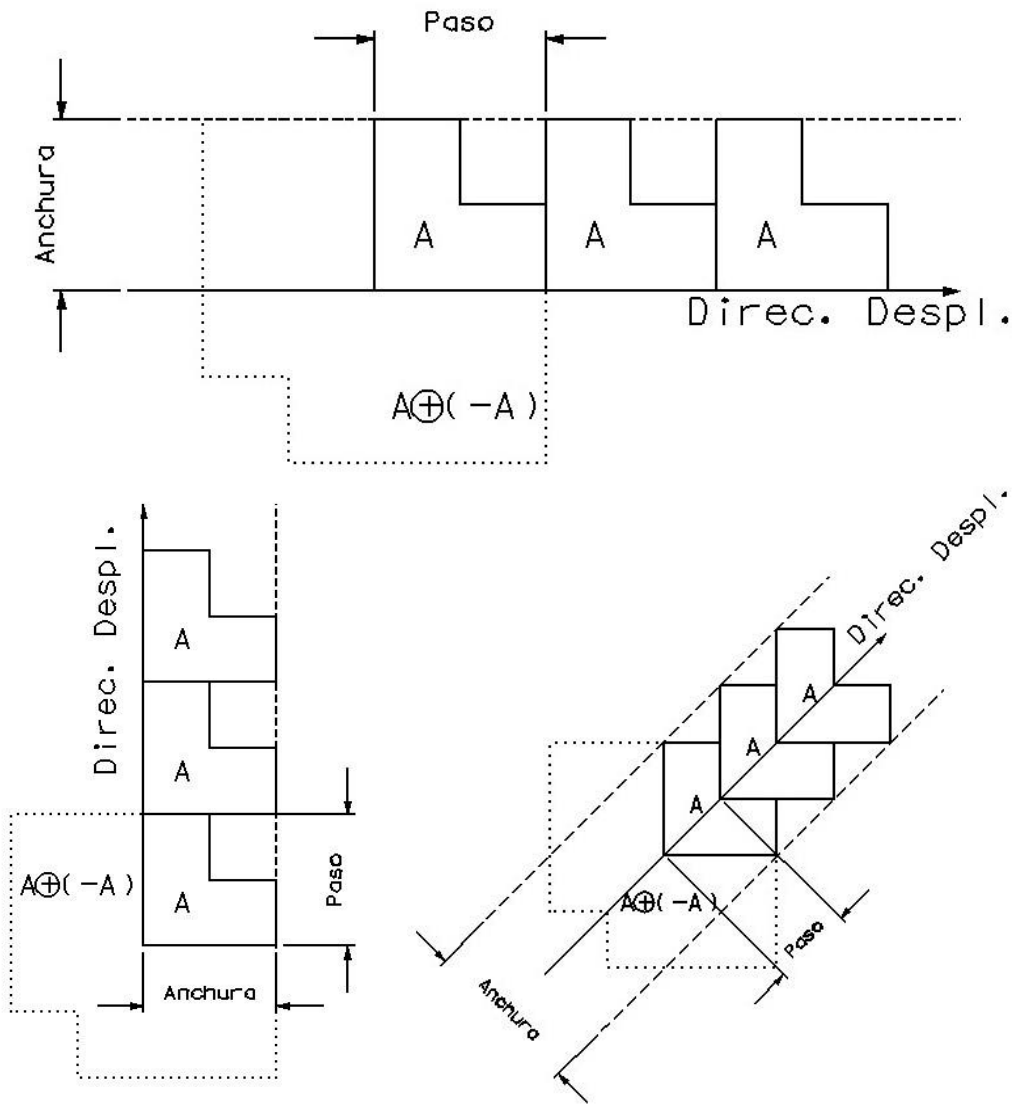


Figura 3-12: Ancho de banda y paso

La observación de esta propiedad (figura 3-12) lleva a la conclusión de que la distancia desde el origen hasta el perímetro del polígono suma en cualquier dirección es la distancia o separación entre dos figuras adyacentes en la banda (paso). Asimismo, el ancho de banda viene definido por la máxima distancia perpendicular entre la dirección de desplazamiento y el perímetro del polígono suma.

Obtenida la Suma de Minkowski se calcula la orientación de la figura, el paso, y el ancho de banda. Para obtener la orientación óptima se ha de calcular la utilización del material para cada una de las posiciones posibles.

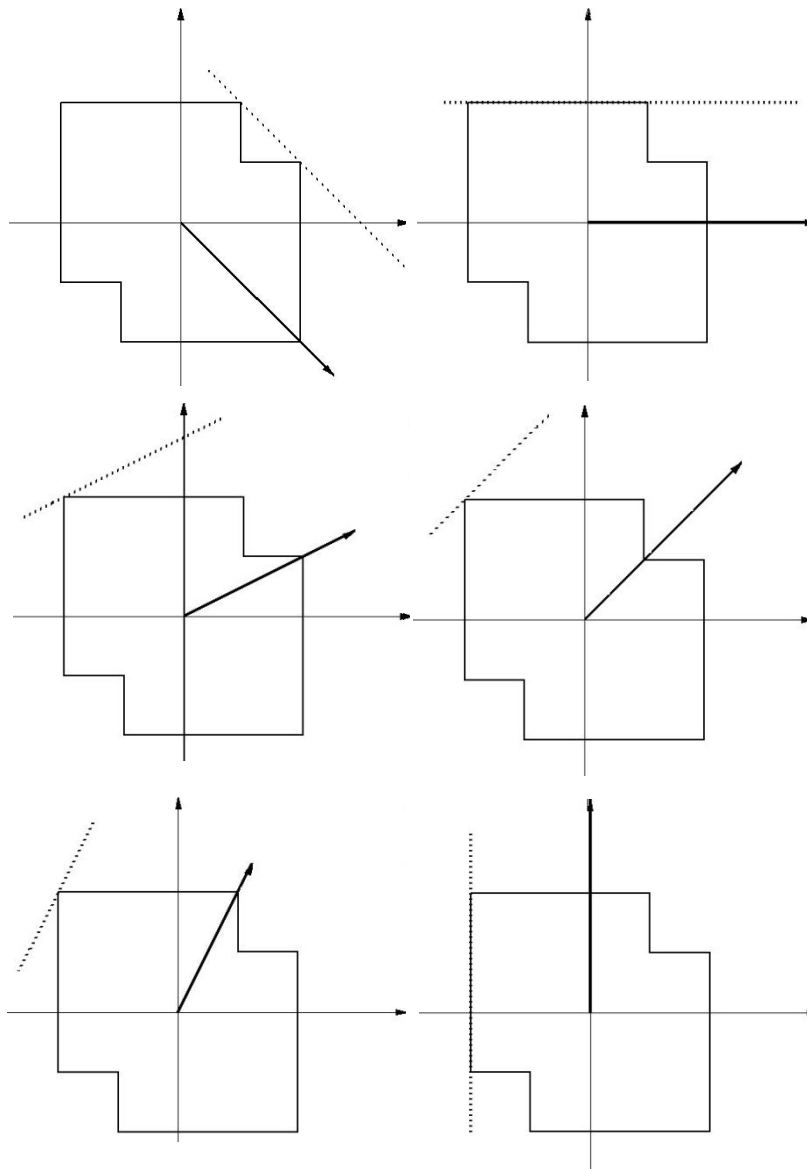


Figura 3-13: Direcciones a considerar para obtener la dirección óptima de la banda.

Para calcular el ancho de banda se usa una línea de barrido (figura 3-13), uno de cuyos extremos es coincidente con el origen, abarcando 180° (no es necesario 360° debido a la simetría del polígono suma). Esta línea de barrido se corresponde con el eje longitudinal de la tira de chapa.

La distancia entre el origen y el contorno del polígono suma (el paso de la chapa) varía suavemente a medida que la línea de barrido recorre una arista, pero esta distancia cambia bruscamente cuando la línea sobrepasa el vértice de la arista y pasa a la siguiente. Por lo tanto, se determina el ratio de utilización del material solamente para los puntos más característicos: los vértices del polígono suma.

Otros puntos característicos en los que también es necesario determinar el ratio de utilización del material son aquellos en los que la línea de barrido es paralela a una de las aristas de la envolvente convexa del polígono suma. Al igual que en los algoritmos anteriores se han de tener en cuenta los factores tecnológicos que modifican el ancho de banda y el paso, incrementándolos respecto de los valores teóricos para que de esta forma la pieza conserve la rigidez necesaria.

Las etapas a seguir para la aplicación de éste algoritmo son:

1. Obtención de la figura suma de Minkowski:

$$A \oplus B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$$

2. Cálculo de los ángulos que forman los vértices de la Suma de Minkowski, con el origen, considerando solamente un barrido de 180°, ya que la figura suma es simétrica.
3. Cálculo de la envolvente convexa de la Suma de Minkowski.
4. Cálculo de los ángulos de las aristas de la envolvente convexa.
5. Cálculo del porcentaje de utilización de la chapa para cada uno de los ángulos determinados, tanto los que forman los vértices del polígono suma con el origen como los que forman las aristas de la envolvente convexa. La orientación óptima

es aquella en la que el porcentaje de utilización es más alto. Hay que tener en cuenta los factores tecnológicos.

6. Representación de la distribución obtenida.

La figura 3-14 representa la solución óptima obtenida aplicando el algoritmo suma de Minkowski, siendo el ratio de utilización de la chapa del 75%. El tiempo de cálculo empleado ha sido de 0.16 segundos.

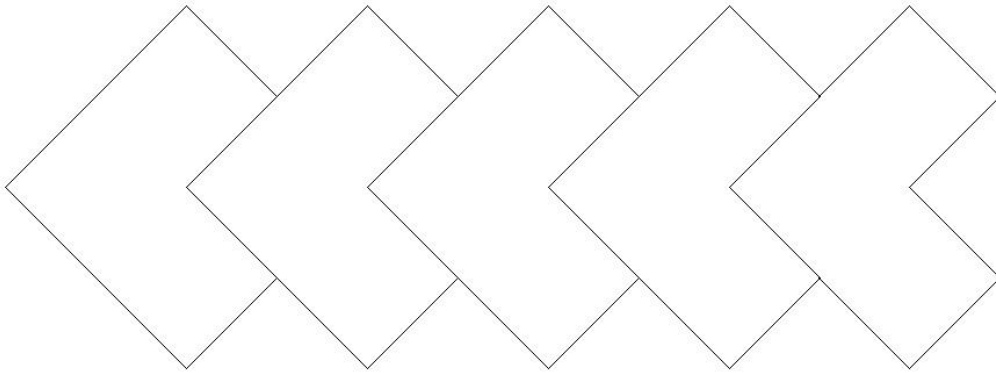


Figura 3-14: Solución óptima del anidamiento.

3.2.5 Casos de aplicación.

Se presentan seis casos, en los cuales se aplican los algoritmos presentados para la obtención de la disposición óptima de la figura en la banda que mejor se adecua a cada uno.

Para ello se ha desarrollado una aplicación específica con la que se obtienen y comparan los procedimientos expuestos.

Caso 1°.

En la figura 3-15 se muestra el primer caso, una figura convexa, siendo el resultado obtenido con los diferentes algoritmos el representado en la figura 3-16 y la tabla 3-2.

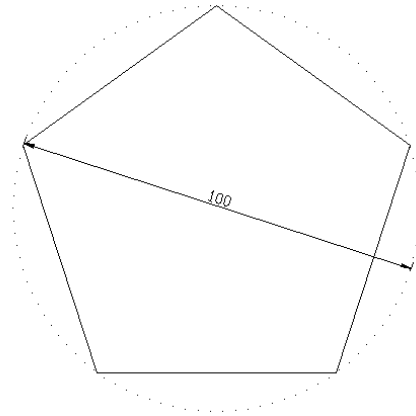


Figura 3-15: Caso 1

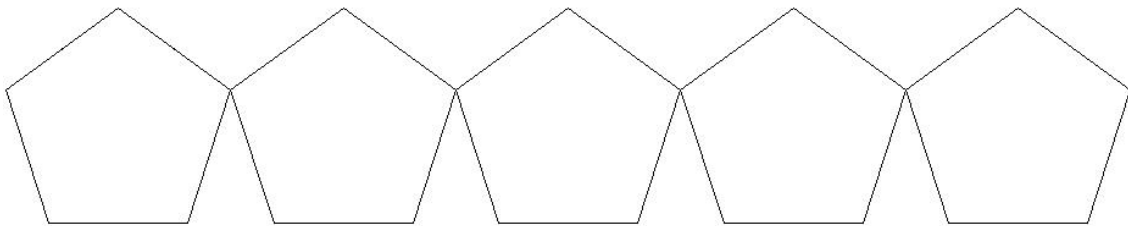


Figura 3-16: Posición óptima caso 1

Resultados obtenidos:

Tabla 3-2: Resultados del caso 1

	Tiempo (seg.)	Paso (mm)	Ancho de Banda (mm)	Ángulo	Ratio (%)
Rectángulo	0.10	90.10	90.45	0	69.09
Rotacional (1°)	3.85	90.10	90.45	0	69.09
Minkowski	0.21	90.10	90.45	0	69.09

Caso 2°

La forma que se muestra en la figura 3-17 da lugar a diferentes resultados (figura 3-18) según sea el algoritmo aplicado. Se observa la mejora que suponen los algoritmos “rotacional” y de “Suma de Minkowski” frente al del “mínimo rectángulo”. De forma análoga, la tabla 3-3 muestra los resultados del análisis.

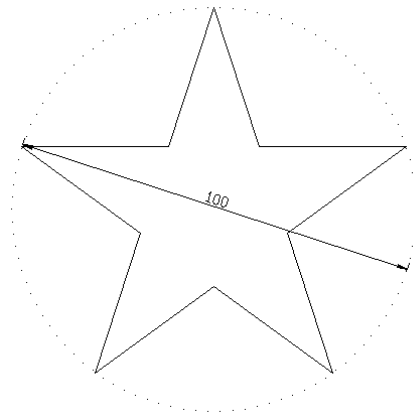


Figura 3-17: Caso 2

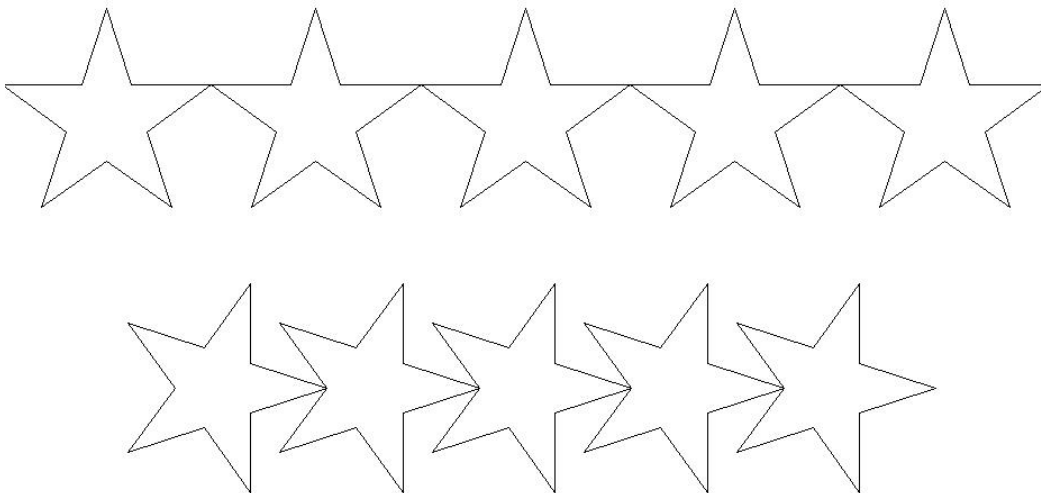


Figura 3-18: Resultados: (sup) Mínimo rectángulo; (inf) Rotacional y Minkowski

Tabla 3-3: Resultados del caso 2

	Tiempo (seg.)	Paso (mm)	Ancho de Banda (mm)	Ángulo	Ratio (%)
Rectángulo	0.42	95.10	90.45	216	32.62
Rotacional (1°)	4.84	69.09	95.10	90	39.91
Minkowski	0.39	69.09	95.10	90	39.91

Caso 3°

En la figura 3-19 se muestra el caso 3, que se corresponde con una figura más próxima a las que se aplican en los troqueles progresivos. Los resultados, figura 3-20, de características similares al caso anterior, se completan con la tabla 3-4.

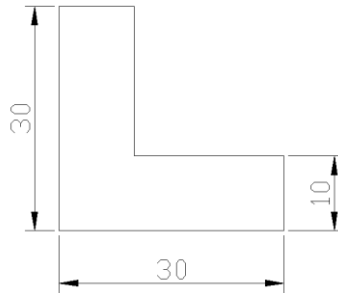


Figura 3-19: Caso 3.

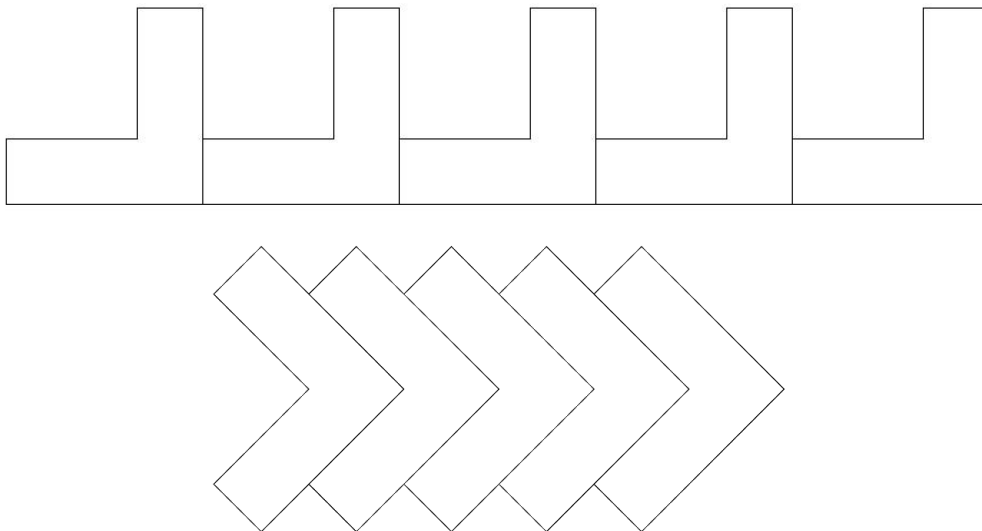


Figura 3-20: Resultados: (sup) Mínimo rectángulo; (inf) Rotacional y Minkowski

Resultados obtenidos:

Tabla 3-4: Resultados del caso 3.

	Tiempo (seg.)	Paso (mm)	Ancho de Banda (mm)	Ángulo	Ratio (%)
Rectángulo	0.09	30	30	270	55.55
Rotacional (1°)	4.47	14.14	42.42	135	83.33
Minkowski	0.18	14.14	42.42	135	83.33

Caso 4°

En el caso correspondiente a la figura 3-21, se obtienen unas ciertas diferencias entre los algoritmos rotacional y de suma de Minkowski (figura 3-22, tabla 3-5).

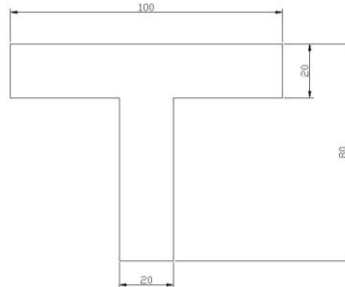


Figura 3-21: Caso 4.

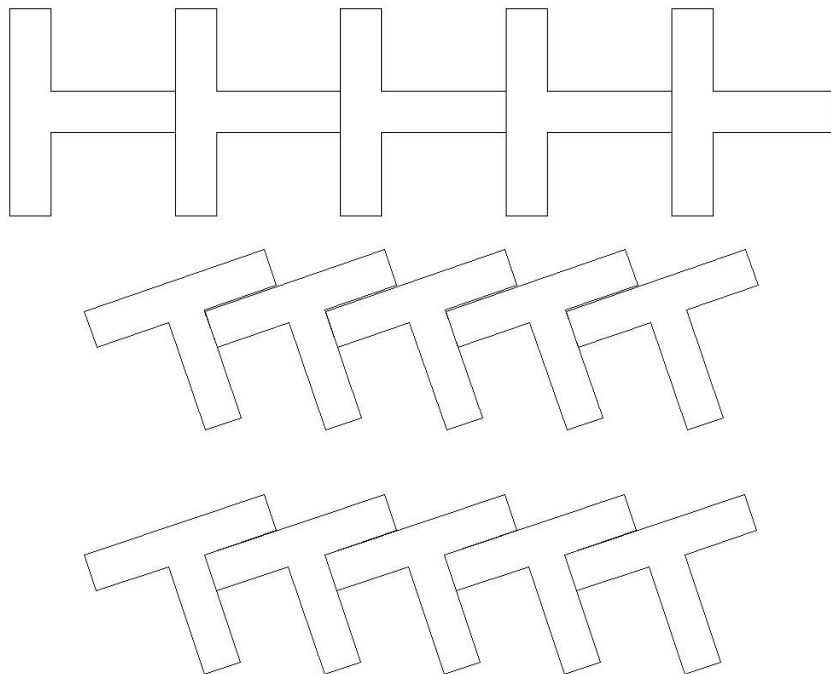


Figura 3-22: Resultados: (a) Mínimo rectángulo; (b) Rotacional;(c) Minkowski.

Tabla 3-5 Resultados del caso 4.

	Tiempo (seg.)	Paso (mm)	Ancho de Banda (mm)	Ángulo	Ratio (%)
Rectángulo	0.16	80	100	270	40.00
Rotacional (1°)	4.92	63.45	95.17	19	54.67
Minkowski	0.30	63.24	94.86	161.56	54.86

Caso 5°

La figura 3-23 muestra un caso, que se puede considerar más general que los anteriores y de mayor complejidad. Los resultados de los diferentes algoritmos son idénticos (figura 3-24, tabla 3-6) aunque con diferentes tiempos de cálculo.

Un dato llamativo de este ejemplo es el hecho de que el algoritmo del mínimo rectángulo obtenga el mismo resultado que los otros dos. En esta figura el resultado no se corresponde con el mínimo rectángulo circunscrito a la figura pero sí, a aquel que da un mejor ratio de utilización de material. Esto se debe a las mejoras que se han introducido en el algoritmo.

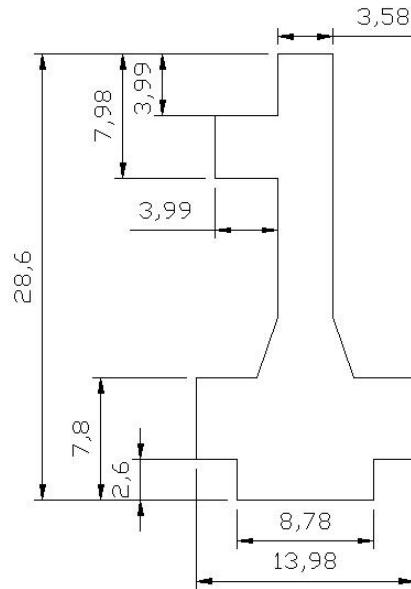


Figura 3-23: Caso 5.

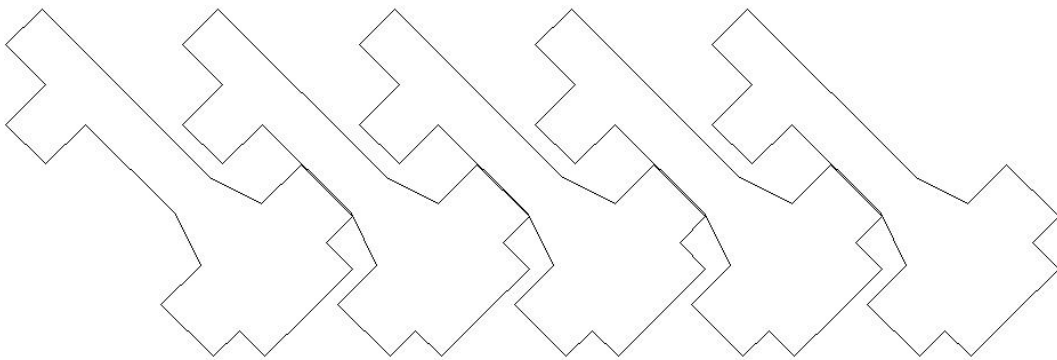


Figura 3-24: Resultado del caso 5.

Tabla 3-6: Resultados del caso 5.

	Tiempo (seg.)	Paso (mm)	Ancho de Banda (mm)	Ángulo	Ratio (%)
Rectángulo	0.39	12.53	24.59	45	62.54
Rotacional (1°)	4.47	12.53	24.59	45	62.54
Minkowski	1.29	12.53	24.59	45	62.54

Caso 6°

El caso de la figura 3-25 se corresponde con el modelo simplificado de una bisagra que se analiza posteriormente con detalle.

Los resultados se presentan gráficamente en la figura 3-26 y analíticamente en la tabla 3-7.

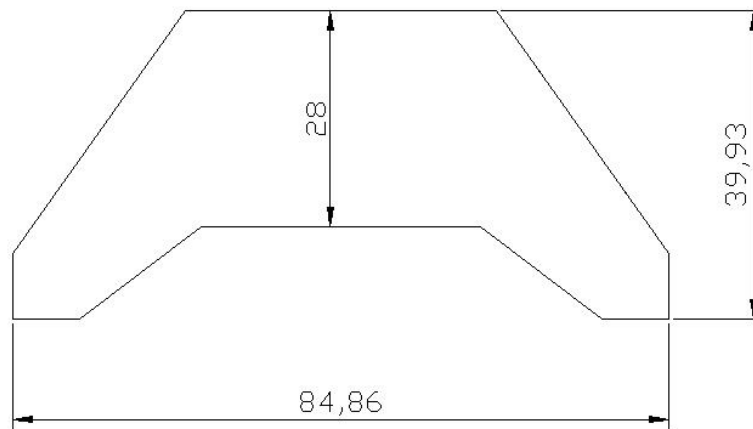


Figura 3-25: Caso 6.

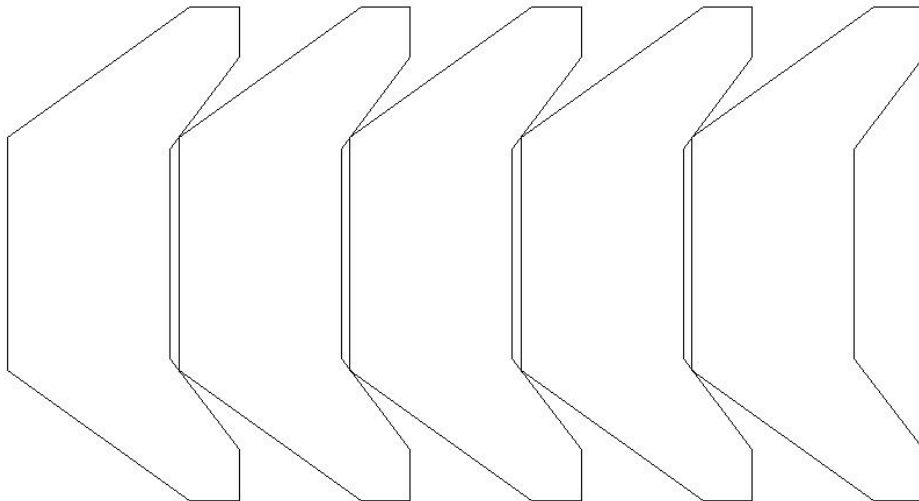


Figura 3-26: Resultados correspondientes al caso 6.

Tabla 3-7: Resultados del caso 6.

	Tiempo (seg.)	Paso (mm)	Ancho de Banda (mm)	Ángulo	Ratio (%)
Rectángulo	0.15	29.52	84.85	90	85.08
Rotacional (1°)	5.30	29.52	84.85	90	85.08
Minkowski	0.35	29.52	84.85	90	85.08

3.2.6 Análisis de resultados.

- El procedimiento más rápido siempre es el correspondiente al algoritmo que busca el menor rectángulo posible, aunque el que emplea la suma de Minkowski es prácticamente igual de rápido. Por el contrario, el método rotacional necesita un tiempo de cálculo considerablemente superior.
- El procedimiento que emplea la suma de Minkowski siempre proporciona la solución óptima en todos los casos, como cabía de esperar.

- En la mayoría de los casos presentados el procedimiento rotacional obtiene la solución óptima, aunque se observa que en la figura 3-22 la solución no es la mejor, sino que es una aproximación. En este caso la precisión obtenida, dado que es un método iterativo, depende del orden del valor de iteración empleado, aunque tampoco estaría garantizado la obtención del valor exacto sino solamente una mayor precisión. De todos modos, la diferencia entre la solución obtenida y la exacta sería prácticamente despreciable; en el caso 4° (figura 3-22) la diferencia de ratio de utilización del material es solamente de un 0,19%.
- El procedimiento del menor rectángulo solamente garantiza la obtención de la solución óptima en los casos en que la figura sea convexa (caso 1). También se observa que en los ejemplos 5 y 6 este procedimiento obtiene la mejor solución. Esto es debido a las mejoras introducidas en el procedimiento básico, como el cálculo del paso y del ratio.

3.3. SECUENCIA DE OPERACIONES.

Visto el anidamiento de figuras, el siguiente paso trata de determinar la secuencia de operaciones que es preciso realizar para obtener el diseño de banda que se corresponde con la pieza a fabricar.

Hay diversos métodos, en un principio basados en la experiencia, pero que se han ido completando mediante metodologías como la lógica difusa, técnicas de inteligencia artificial y otras. La gran mayoría de estas técnicas resultan de la aplicación de las técnicas que se emplean para obtener la secuencia de doblado para piezas plegadas (Ong et al. 1997, Duflou et al. 1999).

En este capítulo se presentan dichas metodologías y se desarrolla una propia: **“obtención de la secuencia de operaciones mediante diagrama relacional”** que se expone detalladamente.

3.3.1 Métodos basados en la experiencia.

Se hace referencia a métodos basados en la experiencia para resolver problemas del diseño en diferentes etapas.

Esta etapa del proceso de diseño es la menos automatizada y en la que menos investigaciones se han llevado a cabo, por lo que la experiencia del diseñador es fundamental, al no contar con metodologías o pautas de diseño sistemáticas.

Se consideran recomendaciones genéricas basadas en la experiencia. Algunas de ellas, expuestas anteriormente en el apartado 2.6.3, son:

- En las primeras etapas del troquel es conveniente realizar las operaciones de punzonado. En la primera etapa del troquel se punzonan los orificios en los que se acoplan los buscadores, que son los elementos que guían la banda.
- Los procesos de embutición, así como otros que llevan asociada una deformación plástica importante de la chapa, como abocardados y roscados, es aconsejable realizarlos, también, en las primeras etapas del troquel. Esto

es debido, a que al no haberse eliminado mucho material de la banda, su rigidez es mayor, y el trabajo más preciso.

- En los pasos sucesivos se llevan a cabo las restantes operaciones de corte, hasta dar forma a la pieza que se busca.
- Los doblados es recomendable que se realicen en las últimas etapas del troquel. La operación final es el corte que separa a la pieza del resto de la banda y elimina el trozo que la une a la siguiente.

Estas recomendaciones se han de adecuar a cada pieza, siendo necesario introducir modificaciones que se adapten a cada diseño.

Varios investigadores han desarrollado metodologías aplicando técnicas de inteligencia artificial para obtener una secuencia de operaciones basándose en reglas empíricas como las expuestas anteriormente. A continuación se indican dos de los autores que aplican dichas técnicas.

Kumar (2008) ha propuesto un sistema experto compuesto por seis módulos para automatizar el diseño de banda, uno de ellos dedicado a la secuencia de operaciones. Este sistema incluye más de 800 reglas, para lo cual requiere que se introduzca información de la pieza, a partir de la cual define diferentes aspectos del proceso de diseño.

Tor (2003, 2005a, 2005b) aplica técnicas basadas en CBR (Case-Based Reasoning, razonamiento basado en casos) y en Blackboard Framework en las que la secuencia de operaciones se obtiene basándose en soluciones empleadas para casos anteriores. El principal inconveniente de esta técnica es que es necesario tener un número suficiente de casos resueltos para obtener una solución.

3.3.2 Determinación de la secuencia de operaciones mediante lógica difusa.

Uno de los métodos más usados para determinar la secuencia de operaciones es la lógica difusa (Kim et al. 2006, Farsi and Arezoo 2009). Consiste en establecer una serie

de reglas, las cuales se definen para cada entorno de trabajo en el que se aplique. Cada una de estas reglas lleva asociada una función lógica que asigna valores entre cero y uno a cada uno de los parámetros que se están analizando, siendo en este caso las operaciones que se han de realizar.

Los valores obtenidos para cada uno de los parámetros mediante la aplicación de las reglas son procesados matricialmente. Dado que no todas las reglas tienen igual grado de influencia en el proceso, se aplica una ponderación dependiendo de la importancia de cada una de ellas. Una vez aplicada dicha ponderación se procede a la suma final de todos los valores para cada uno de los parámetros, obteniendo un valor numérico que depende de la importancia o valor asignado a cada parámetro: a mayor valor más influencia tiene dicho parámetro en el proceso.

En el caso que nos ocupa, los parámetros que se van a valorar son las diferentes operaciones que ha de realizar el troquel, por lo que a mayor valor final obtenido en la matriz mayor prioridad ha de tener dicha operación, es decir, antes debe ejecutarse.

Por lo tanto, se han definido una serie de reglas en las que el mayor valor de la función lógica “1” se asigna cuando la operación sea adecuada para ser realizada en las estaciones iniciales del troquel.

3.3.2.1 Reglas aplicadas.

Se han definido las siguientes reglas (Ong et al. 1997, Kim et al. 2006) a partir de consideraciones teóricas (teoría de la plasticidad) y prácticas (conocimientos empíricos extraídos de la experiencia de los diseñadores).

Se clasifican las reglas en función de las operaciones a las que afectan: a las de corte o de doblado.

a) Operaciones de corte y punzonado.

1. Regla de relación.

Según se consideren las relaciones entre un elemento plano o pestaña y las operaciones de corte y estampado a realizar en ellas se definen, tres tipos principales de relaciones:

- Is-in. Una operación de corte tiene una relación “is-in” con el plano en el que está situado, cuando dicha operación se realiza totalmente en el interior del contorno. Por ejemplo, un agujero o un corte tienen este tipo de relación. A este tipo de relaciones se les asigna un valor 0,5 en la matriz difusa.
- Is-on. Este tipo de relación se da cuando la operación a realizar también se produce en el interior del contorno del elemento plano, aunque a diferencia de la anterior en el que las operaciones generan un elemento plano en este caso el resultado es un elemento con “volumen” situado en dicho plano. Ejemplos de este tipo de relaciones son los abocardados y formas estampadas. Tiene un valor 1 en la matriz.
- Is-along. Se da cuando el corte no se produce completamente en el interior del contorno. El valor en la matriz es 0.

La función lógica para esta regla se muestra en la figura 3-27:

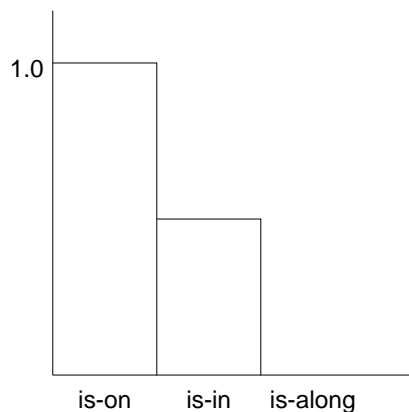


Figura 3-27: Función lógica para la regla de relación.

2. Regla de longitud de corte.

Esta regla determina la prioridad del proceso de corte de acuerdo con la longitud de la forma a cortar o punzonar. Las operaciones se numeran correlativamente en función de su longitud (figura 4.2). En abscisas: la de menor longitud se le asigna el valor cero y a la de mayor longitud se le asigna el valor 1. Las operaciones con igual longitud se numeran correlativamente. En ordenadas: la que tiene una menor longitud se le asigna el valor 1 y a la operación con mayor longitud de corte 0 en la matriz. Cuando dos o más operaciones tienen igual longitud de corte, el valor asignado en la matriz se corresponde con la que tenga el valor en abscisas más alto.

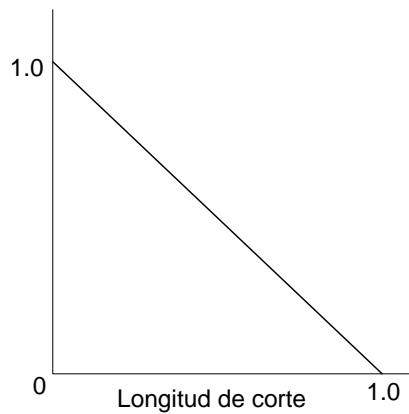


Figura 3-28: Función lógica para la regla de longitud de corte.

3. Regla de “proximidad”.

Se aplica a formas que sean adyacentes ya que la operación de corte se puede realizar con un solo punzón (figura 3-29). Si el número de formas adyacentes es mayor o igual a dos se le asigna el valor máximo (1), mientras que si las formas no tienen ninguna otra adyacente el valor asignado es el mínimo (0).

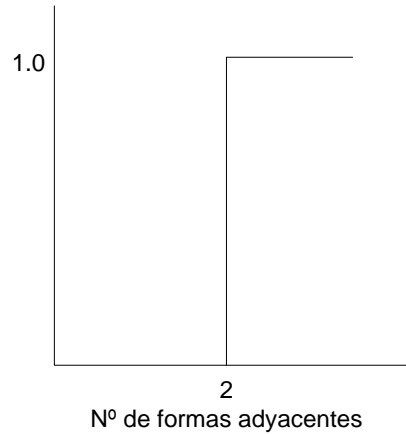


Figura 3-29: Función lógica para la regla de proximidad.

b) Operaciones de doblado.

4. Regla de distancia.

Esta regla describe la influencia en la secuencia de operaciones que tiene la distancia o el número de formas planas entre un pliegue y el plano establecido como base. A mayor distancia entre un pliegue y el plano base primero se realiza esa operación de plegado, por lo que a mayor distancia se asigna un mayor valor en la matriz (figura 3-30).

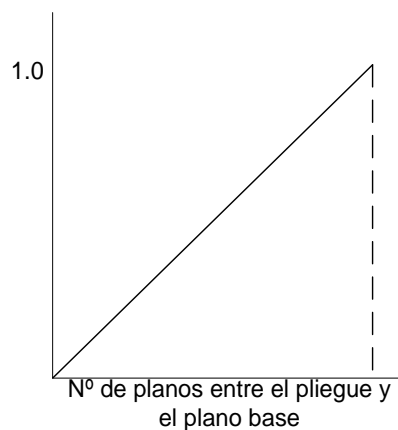


Figura 3-30: Función lógica para la regla de distancia.

5. Regla de “plano independiente”.

Un plano independiente es aquel que está conectado mediante un solo doblado o pliegue a la pieza. Generalmente, ese pliegue tiene una influencia menor en el

conjunto de la geometría de la pieza. Por lo tanto, los planos individuales pueden ser doblados en las etapas iniciales sin interferir en el resto de los doblados (figura 3-31).

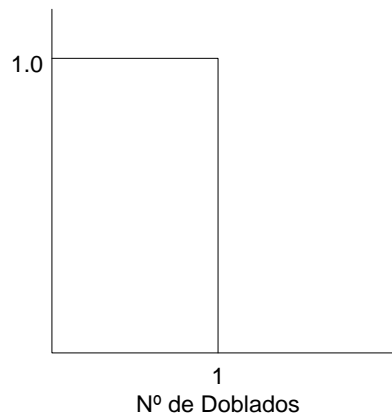


Figura 3-31: Función lógica para la regla de plano independiente.

6. Regla angular.

Esta regla determina en la matriz la influencia del ángulo que tienen los planos con respecto al plano base (figura 3-32). Si el ángulo de doblado es mayor de 90° el doblado se suele hacer en más de una operación. El valor es la unidad cuando el ángulo es menor que 90° , siendo 0 cuando el ángulo es mayor o igual a 90° .

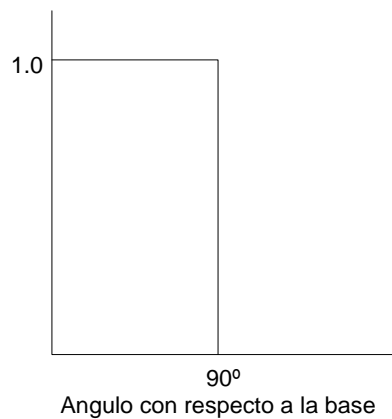


Figura 3-32: Función lógica para la regla angular.

7. Regla de conformado simultáneo.

Esta regla se aplica para doblados que tienen la misma dirección, ya que pueden realizarse simultáneamente si no existen interferencias entre los punzones y el troquel. Por lo tanto, si más de dos doblados tienen la misma dirección, pueden realizarse a la

vez. Si hay más de dos doblados en la misma dirección el valor en la matriz es la unidad, si no, es cero.

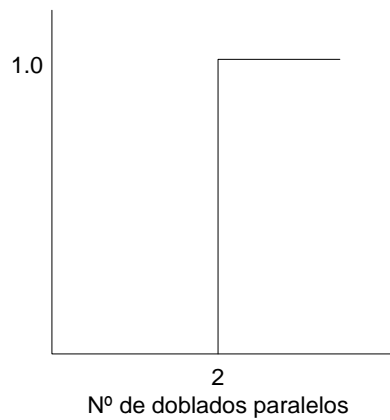


Figura 3-33: Función lógica para la regla de conformado simultáneo.

8. Regla de dirección de alimentación.

Esta regla tiene en cuenta la dirección del doblado, si es paralelo o no a la dirección de alimentación o movimiento del fleje (figura 3-34). Después de realizar el doblado es necesario un espacio de escape en el interior del troquel, en la placa superior o en la inferior, para que la pieza una vez doblada pueda trasladarse por el interior del troquel.

Los doblados que requieran mayor espacio de salida han de ejecutarse en las etapas finales para minimizarlo. Dado que un doblado en la dirección de alimentación necesita menos espacio se le asigna el valor 1 en la matriz. En el caso que el doblado no sea paralelo el valor asignado es cero.

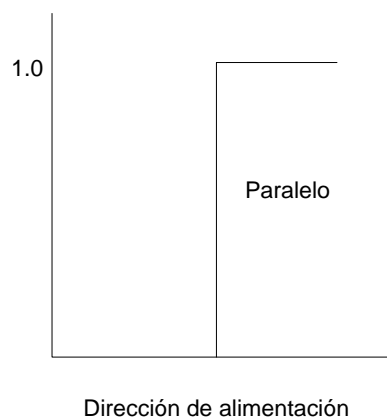


Figura 3-34: Función lógica para la regla de dirección de alimentación.

3.3.2.2 Generación de la matriz difusa

Las relaciones entre los parámetros y las reglas se representan en una matriz difusa.

a) Operaciones de corte.

$C = \{c_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ representa el conjunto de todas las operaciones o formas que se han de considerar como corte, donde c_i es una de las operaciones de corte a considerar.

$R = \{r_j | j = 1, 2, 3\}$ representa el conjunto de las reglas de corte a aplicar, donde r_j representa uno de los criterios.

El valor de la función lógica se expresa como $(v_{ij})_c = f(c_i, r_j)$, obteniendo la siguiente matriz difusa para las operaciones de corte y punzonado:

Tabla 3-8: Matriz difusa de las operaciones de corte y punzonado.

	Regla 1 (r_1)	Regla 2 (r_2)	Regla 3 (r_3)
c_1	$V_{rl}(c_1, r_1)$	$V_{Lc}(c_1, r_2)$	$V_{Pr}(c_1, r_3)$
c_2	$V_{rl}(c_2, r_1)$	$V_{Lc}(c_2, r_2)$	$V_{Pr}(c_2, r_3)$
...
c_n	$V_{rl}(c_n, r_1)$	$V_{Lc}(c_n, r_2)$	$V_{Pr}(c_n, r_3)$

b) Operaciones de doblado.

$D = \{d_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ representa el conjunto de todas las operaciones de doblado o plegado a realizar, donde d_i es una de las operaciones de doblado.

$R = \{r_j | j = 4, 5, 6, 7, 8\}$ representa el conjunto de las reglas de doblado a aplicar, donde r_j representa uno de los criterios.

El valor de la función lógica es expresado como $(v_{ij})_d = f(d_i, r_j)$, obteniendo la siguiente matriz difusa para las operaciones de doblado:

Tabla 3-9: Matriz difusa de las operaciones de doblado.

	Regla 4 (r ₄)	Regla 5 (r ₅)	Regla 6 (r ₆)	Regla 7 (r ₇)	Regla 8 (r ₈)
d ₁	$V_{Ds}(d_1, r_4)$	$V_{Pi}(d_1, r_5)$	$V_{An}(d_1, r_6)$	$V_{Cs}(d_1, r_7)$	$V_{Da}(d_1, r_8)$
d ₂	$V_{Ds}(d_2, r_4)$	$V_{Pi}(d_2, r_5)$	$V_{An}(d_2, r_6)$	$V_{Cs}(d_2, r_7)$	$V_{Da}(d_2, r_8)$
...
d _m	$V_{Ds}(d_m, r_4)$	$V_{Pi}(d_m, r_5)$	$V_{An}(d_m, r_6)$	$V_{Cs}(d_m, r_7)$	$V_{Da}(d_m, r_8)$

Expresando de manera conjunta las dos matrices se obtiene la matriz conjunta en la que todas las reglas están representadas. En esta matriz, las reglas de corte al ser aplicadas a las operaciones de doblado el valor es obviamente cero, ocurriendo lo mismo al aplicar las reglas de doblado a las operaciones de corte.

Tabla 3-10: Matriz difusa conjunta.

	Regla 1 (r ₁)	Regla 2 (r ₂)	Regla 3 (r ₃)	Regla 4 (r ₄)	Regla 5 (r ₅)	Regla 6 (r ₆)	Regla 7 (r ₇)	Regla 8 (r ₈)
c ₁	$V_{ri}(c_1, r_1)$..	$V_{Pr}(c_1, r_3)$	0	0	0	0	0
c ₂	$V_{ri}(c_2, r_1)$	$V_{Lc}(c_2, r_2)$	$V_{Pr}(c_2, r_3)$	0	0	0	0	0
...
c _n	$V_{ri}(c_n, r_1)$	$V_{Lc}(c_n, r_2)$	$V_{Pr}(c_n, r_3)$	0	0	0	0	0
d ₁	0	0	0	$V_{Ds}(d_1, r_4)$	$V_{Pi}(d_1, r_5)$	$V_{An}(d_1, r_6)$	$V_{Cs}(d_1, r_7)$	$V_{Da}(d_1, r_8)$
d ₂	0	0	0	$V_{Ds}(d_2, r_4)$	$V_{Pi}(d_2, r_5)$	$V_{An}(d_2, r_6)$	$V_{Cs}(d_2, r_7)$	$V_{Da}(d_2, r_8)$
...
d _m	0	0	0	$V_{Ds}(d_m, r_4)$	$V_{Pi}(d_m, r_5)$	$V_{An}(d_m, r_6)$	$V_{Cs}(d_m, r_7)$	$V_{Da}(d_m, r_8)$

3.3.2.3 Matriz final de valores (MFV).

Cada una de las reglas anteriores tiene una influencia diferente en la obtención de la secuencia final, dado que no todas las reglas influyen de igual manera, por lo que es necesario realizar una ponderación de cada una de las reglas.

La MFV es otra matriz difusa en la que se considera la importancia relativa de cada una de las reglas anteriores sobre el proceso final.

El peso de cada una las reglas es representado en los vectores que definen los siguientes conjuntos difusos:

$$W_c[R] = \{r_1 \times 2.0, r_2 \times 1.5, r_3 \times 1.0\}$$

aplicado a las reglas de corte ,

$$W_d[D] = \{r_4 \times 1.2, r_5 \times 1.0, r_6 \times 0.8, r_7 \times 0.6, r_8 \times 0.4\}$$

aplicado a las reglas de doblado.

Los valores de los pesos son asignados en base a la experiencia de los diseñadores (Kim et al. 2006).

Por lo tanto, la matriz MFV queda definida por:

$$MFV = [V_c] \times W_c(R) + [V_d] \times W_d(R)$$

$$MFV(c) = \begin{bmatrix} v_{Rl}(1,1) & v_{Lc}(1,2) & v_{Pr}(1,3) \\ v_{Rl}(2,1) & v_{Lc}(2,2) & v_{Pr}(2,3) \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{Rl}(n,1) & v_{Lc}(n,2) & v_{Pr}(n,3) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W(c_1) \\ W(c_2) \\ W(c_3) \end{bmatrix}$$

$$MFV(d) = \begin{bmatrix} v_{Ds}(4,1) & v_{Pi}(5,1) & v_{An}(6,1) & v_{Cs}(7,1) & v_{Da}(8,1) \\ v_{Ds}(4,1) & v_{Pi}(5,2) & v_{An}(6,2) & v_{Cs}(7,2) & v_{Da}(8,2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{Ds}(4,m) & v_{Pi}(5,m) & v_{An}(6,m) & v_{Cs}(7,m) & v_{Da}(8,m) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W(d_1) \\ W(d_2) \\ W(d_3) \end{bmatrix}$$

La tabla 3-11 muestra la MFV una vez ponderadas las reglas.

Tabla 3-11: Matriz difusa con reglas ponderadas.

	Regla 1 (r ₁)	Regla 2 (r ₂)	Regla 3 (r ₃)	Regla 4 (r ₄)	Regla 5 (r ₅)	Regla 6 (r ₆)	Regla 7 (r ₇)	Regla 8 (r ₈)
c ₁	$V_{r1}(c_1, r_1) \times 2.0$	$V_{Lc}(c_1, r_2) \times 1.5$	$V_{Pr}(c_1, r_3) \times 1.0$	0	0	0	0	0
c ₂	$V_{r1}(c_2, r_1) \times 2.0$	$V_{Lc}(c_2, r_2) \times 1.5$	$V_{Pr}(c_2, r_3) \times 1.0$	0	0	0	0	0
...
c _n	$V_{r1}(c_n, r_1) \times 2.0$	$V_{Lc}(c_n, r_2) \times 1.5$	$V_{Pr}(c_n, r_3) \times 1.0$	0	0	0	0	0
d ₁	0	0	0	$V_{Ds}(d_1, r_4) \times 1.2$	$V_{Pi}(d_1, r_5) \times 1.0$	$V_{An}(d_1, r_6) \times 0.8$	$V_{Cs}(d_1, r_7) \times 0.6$	$V_{Da}(d_1, r_8) \times 0.4$
d ₂	0	0	0	$V_{Ds}(d_2, r_4) \times 1.2$	$V_{Pi}(d_2, r_5) \times 1.0$	$V_{An}(d_2, r_6) \times 0.8$	$V_{Cs}(d_2, r_7) \times 0.6$	$V_{Da}(d_2, r_8) \times 0.4$
...
d _m	0	0	0	$V_{Ds}(d_m, r_4) \times 1.2$	$V_{Pi}(d_m, r_5) \times 1.0$	$V_{An}(d_m, r_6) \times 0.8$	$V_{Cs}(d_m, r_7) \times 0.6$	$V_{Da}(d_m, r_8) \times 0.4$

3.3.2.4 Valoración de la influencia de cada parámetro

Una vez determinada la matriz final de valores (MFV) se procede a calcular el orden de las operaciones, a interpretar los resultados obtenidos. Hasta ahora las reglas se han aplicado de manera independiente a cada uno de los parámetros definidos en el proceso. Para determinar la secuencia de operaciones se han de considerar en conjunto los resultados obtenidos.

El método empleado para el análisis de los datos consiste en la suma de los valores ponderados (método de suma simple ponderada) obtenidos al aplicar las reglas a cada uno de los parámetros:

$$V_i = \sum_{j=1}^8 V_{ij} \times w_j$$

$$\text{VectorFinal} = \begin{bmatrix} V_{c_1} = \sum_{j=1}^8 V_{c_1j} \times W_j \\ V_{c_2} = \sum_{j=1}^8 V_{c_2j} \times W_j \\ \dots \\ V_{c_n} = \sum_{j=1}^8 V_{c_nj} \times W_j \\ V_{d_1} = \sum_{j=1}^8 V_{d_1j} \times W_j \\ V_{d_2} = \sum_{j=1}^8 V_{d_2j} \times W_j \\ \dots \\ V_{d_m} = \sum_{j=1}^8 V_{d_mj} \times W_j \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} V_{rl}(c_1, r_1) \times 2.0 + V_{lc}(c_1, r_2) \times 1.5 + V_{pr}(c_1, r_3) \times 1.0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 \\ V_{rl}(c_2, r_1) \times 2.0 + V_{lc}(c_2, r_2) \times 1.5 + V_{pr}(c_2, r_3) \times 1.0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 \\ \dots \\ V_{rl}(c_n, r_1) \times 2.0 + V_{lc}(c_n, r_2) \times 1.5 + V_{pr}(c_n, r_3) \times 1.0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 \\ 0 + 0 + 0 + V_{Ds}(d_1, r_4) \times 1.2 + V_{Pi}(d_1, r_5) \times 1.0 + V_{An}(d_1, r_6) \times 0.8 + V_{Cs}(d_1, r_7) \times 0.6 + V_{Da}(d_1, r_8) \times 0.4 \\ 0 + 0 + 0 + V_{Ds}(d_2, r_4) \times 1.2 + V_{Pi}(d_2, r_5) \times 1.0 + V_{An}(d_2, r_6) \times 0.8 + V_{Cs}(d_2, r_7) \times 0.6 + V_{Da}(d_2, r_8) \times 0.4 \\ \dots \\ 0 + 0 + 0 + V_{Ds}(d_m, r_4) \times 1.2 + V_{Pi}(d_m, r_5) \times 1.0 + V_{An}(d_m, r_6) \times 0.8 + V_{Cs}(d_m, r_7) \times 0.6 + V_{Da}(d_m, r_8) \times 0.4 \end{bmatrix}$$

El vector final obtenido contiene la suma de los valores ponderados para cada uno de los elementos considerados, siendo este valor el que indica la prioridad de un elemento sobre otro. El orden de las operaciones depende del dicho valor final, realizándose en orden decreciente, es decir, se ejecutan primero aquellas operaciones cuyo valor sea superior.

Una particularidad de esta metodología, presente en todos los autores analizados, es que las operaciones de corte y de doblado son consideradas de manera independiente, realizándose siempre en primer lugar todas las operaciones de corte según el orden determinado, mientras que las operaciones de doblado son ejecutadas posteriormente, no pudiendo estar entrelazadas. Esta característica limita las piezas a las que se puede aplicar satisfactoriamente.

3.3.2.5 Ejemplo de aplicación.

Se procede a realizar un ejemplo de determinación de la secuencia de operaciones mediante lógica difusa para una mejor comprensión dicha metodología. En la figura 3-35 se muestra la pieza objeto del análisis y las operaciones que son necesario realizar para su fabricación, tanto corte (Ci) como doblado (Di). El plano base es en el que está situado el corte rectangular.

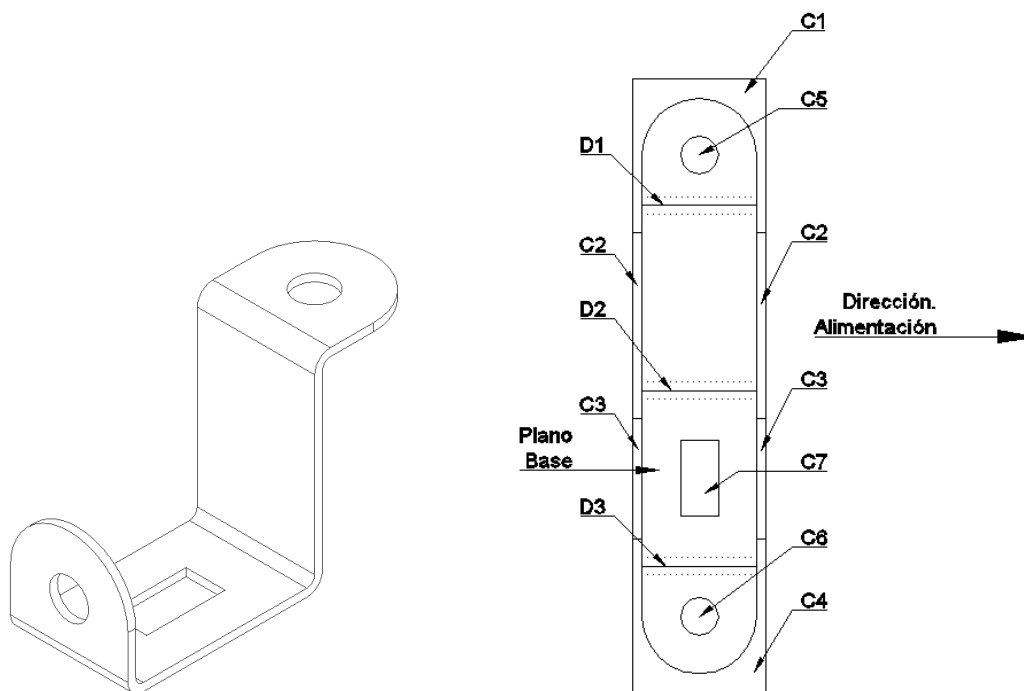


Figura 3-35: Pieza ejemplo y elementos considerados.

– Matrices difusas.

El primer paso consiste en determinar las matrices difusas de cada tipo de operación en las estén representados los valores de las diferentes reglas para cada una de las operaciones definidas. Se determinan la matriz difusa de corte/punzonado (tabla 3-12) y

la matriz difusa de doblado (tabla 3-13). La operación C3 tiene asignado el valor cero en todas las reglas dado que es la operación final que separa la pieza de la chapa.

Tabla 3-12: Matriz difusa de las operaciones de corte de la pieza ejemplo.

	Regla 1 (r_1)	Regla 2 (r_2)	Regla 3 (r_3)
C ₁	0	0,15	1
C ₂	0	0	1
C ₃	0	0	0
C ₄	0	0,15	1
C ₅	0,5	1	0
C ₆	0,5	1	0
C ₇	0,5	0,61	0

Tabla 3-13: Matriz difusa de las operaciones de corte de la pieza ejemplo.

	Regla 4 (r_4)	Regla 5 (r_5)	Regla 6 (r_6)	Regla 7 (r_7)	Regla 8 (r_8)
D ₁	1	1	0	1	1
D ₂	0	0	0	1	1
D ₃	0	1	0	1	1

La combinación de las tablas 3-12 y 3-13 da como resultado la matriz difusa (tabla 3-14).

Tabla 3-14: Matriz difusa de la pieza ejemplo.

	Regla 1	Regla 2	Regla 3	Regla 4	Regla 5	Regla 6	Regla 7	Regla 8
C ₁	0	0,15	1	0	0	0	0	0
C ₂	0	0	1	0	0	0	0	0
C ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₄	0	0,15	1	0	0	0	0	0
C ₅	0,5	1	0	0	0	0	0	0
C ₆	0,5	1	0	0	0	0	0	0
C ₇	0,5	0,61	0	0	0	0	0	0
D ₁	0	0	0	1	1	0	1	1
D ₂	0	0	0	0	0	0	1	1
D ₃	0	0	0	0	1	0	1	1

– Ponderación de las reglas (MFV)

Obtenida la matriz difusa se han de ponderar las reglas y así tener en cuenta la importancia que tiene cada una de ellas dentro de la metodología. Los valores empleados son los siguientes (Kim et al. 2006):

$$W_c[R] = \{r_1 \times 2.0, r_2 \times 1.5, r_3 \times 1.0\}$$

$$W_d[D] = \{r_4 \times 1.2, r_5 \times 1.0, r_6 \times 0.8, r_7 \times 0.6, r_8 \times 0.4\}$$

La matriz final resultante se muestra en la tabla 3-15.

Tabla 3-15: MFV de la pieza ejemplo.

	Regla 1	Regla 2	Regla 3	Regla 4	Regla 5	Regla 6	Regla 7	Regla 8
C ₁	0	0,225	1	0	0	0	0	0
C ₂	0	0	1	0	0	0	0	0
C ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₄	0	0,225	1	0	0	0	0	0
C ₅	1	1,5	0	0	0	0	0	0
C ₆	1	1,5	0	0	0	0	0	0
C ₇	1	0,915	0	0	0	0	0	0
D ₁	0	0	0	1,2	1	0	0,6	0,4
D ₂	0	0	0	0	0	0	0,6	0,4
D ₃	0	0	0	0	1	0	0,6	0,4

– Secuencia de operaciones.

La posición y el orden de cada una de las operaciones analizadas se define sumando los valores obtenidos mediante la aplicación de las reglas en cada uno de ellos. El vector final obtenido se muestra en la tabla 3-16.

Tabla 3-16: Valoración final de las operaciones.

	Suma	Posición
C ₁	1,225	3C
C ₂	1	4C
C ₃	0	Final
C ₄	1,225	3C
C ₅	2,5	1C
C ₆	2,5	1C
C ₇	1,915	2C
D ₁	3,2	1D
D ₂	1	3D
D ₃	2	2D

La secuencia de operaciones resultante es:

$C_5-C_6/C_7/ C_1-C_4/C_2/D_1/D_3/D_2/C_3$

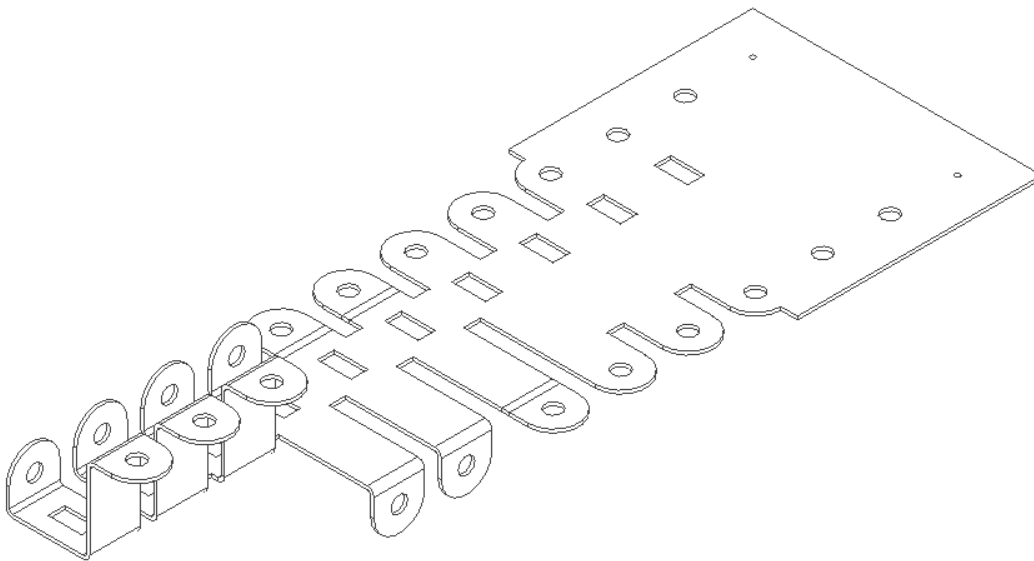


Figura 3-36: Diseño de banda según la secuencia obtenida por el método fuzzy.

3.3.3 SECUENCIA DE OPERACIONES. DIAGRAMA RELACIONAL

El paso previo a cualquier estudio para el diseño de un troquel, independientemente del tipo que sea, es el análisis geométrico y morfológico inicial de la pieza que se va a fabricar. La finalidad de este examen previo es la definición de los parámetros básicos que proporcionan la información necesaria para obtener un conocimiento preciso y claro de la configuración y estructura del elemento o pieza objeto del estudio.

Este análisis está estructurado en diferentes fases o etapas de las que se obtienen y/o representan tanto los datos geométricos que definen la morfología de la pieza y de los diferentes elementos que la configuran, como las relaciones existentes entre ellos, lo cual es la parte principal y de mayor influencia en el proceso de diseño de banda, y por ende del troquel.

Aunque se trata de un aspecto previo al diseño de banda, este análisis se puede considerar como una etapa fundamental en la definición de la secuencia de operaciones, debido a que, como posteriormente se precisará, dicha secuencia es el objetivo principal de este análisis: la obtención de la secuencia de operaciones.

En la figura 3-37 se ha representado el proceso a seguir en esta fase del diseño. Partiendo de la representación tridimensional de la figura, un modelo 3D, se obtienen los datos y parámetros que la caracterizan y se plantean una serie de procesos intermedios hasta definir la secuencia de operaciones a realizar. El proceso a seguir es el siguiente:

1. Extracción de los datos básicos del material. Hay una serie de datos fundamentales, como son el espesor y el tipo de material de la chapa que, aunque no forman parte intrínseca del estudio morfológico en sí, son dos factores básicos en el diseño del troquel y del proceso de fabricación principalmente en las operaciones de trabajo (espesor) como en el cálculo de las fuerzas y tensiones que intervienen en la fabricación del elemento (espesor y material), por lo que han sido incluidos en esta fase previa del análisis.
2. Análisis geométrico. Identificar los diferentes elementos que configuran geoméricamente la pieza.

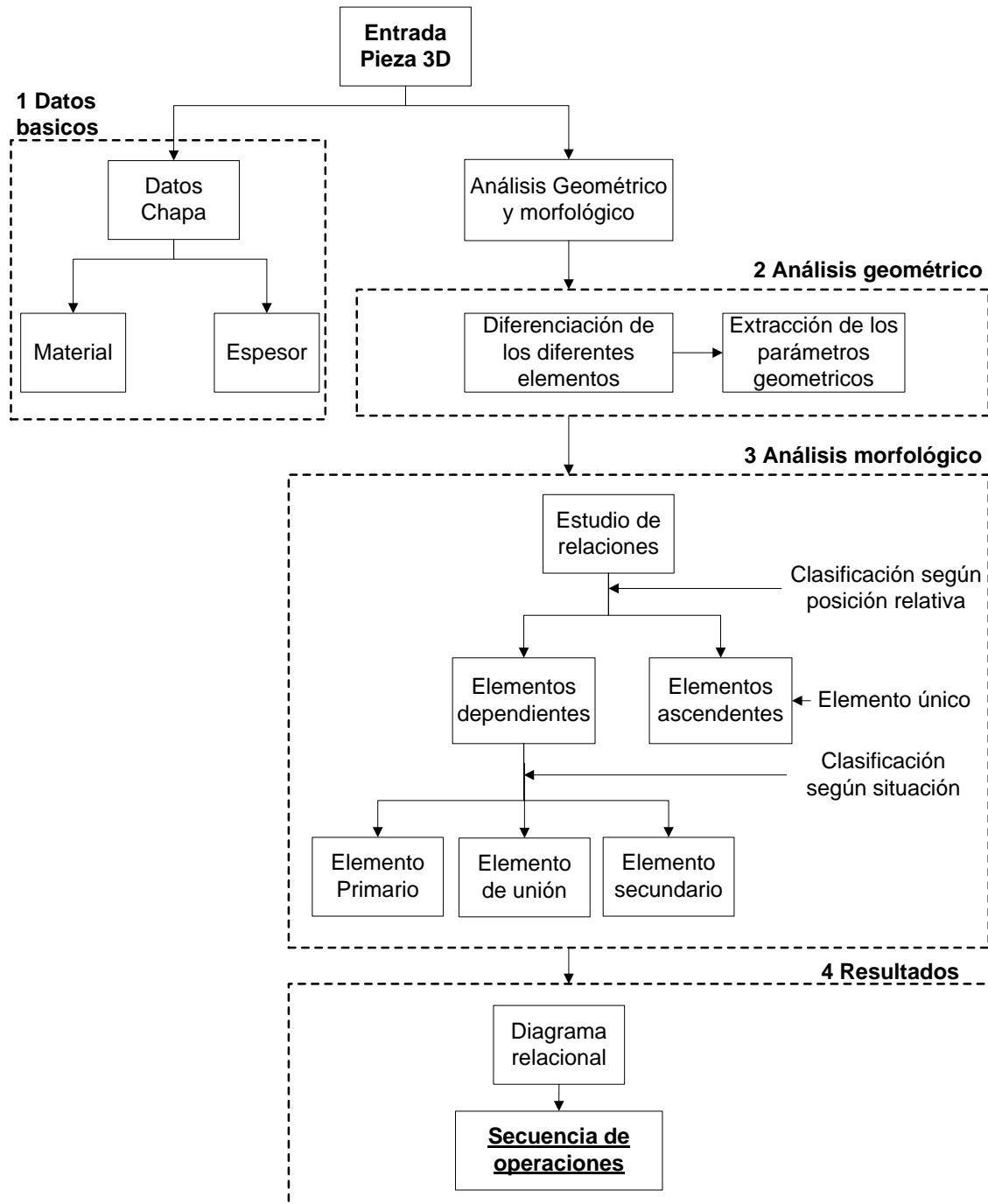


Figura 3-37: Representación esquemática del proceso

3. Análisis morfológico. Partiendo del análisis geométrico se identifican las relaciones e interdependencias existentes entre los elementos identificados.
4. Resultados. La parte final del proceso consiste en la representación de los datos obtenidos en los apartados previos (diagrama relacional) y en su posterior interpretación para obtener el objetivo deseado: la secuencia de operaciones.

A continuación se explican más detalladamente las diferentes fases de este proceso, definiendo los elementos que lo integran y la forma de ordenarlos, su secuenciación y el modo de interpretarlos para llegar a definir la secuencia de operaciones.

3.3.3.1 Análisis geométrico y morfológico.

a) Análisis geométrico. Elementos característicos

En esta fase del proceso se procede a clasificar los aspectos geométricos que definen la configuración espacial de la pieza, desde el punto de vista del proceso de fabricación que se va a seguir, el conformado de chapa. Por lo tanto, se realiza dicho ordenamiento en función de los métodos tecnológicos que se emplean comúnmente en estos procesos de fabricación, principalmente corte y punzonado, doblado y embutición; indicando para cada uno de ellos los parámetros esenciales que los condicionan.

Para ello se procede a diferenciar cada uno de los elementos que componen la pieza dato, realizando el análisis de cada uno de ellos para así obtener diferentes datos según sea el enfoque.

Los elementos se pueden clasificar según tres categorías principales: elementos primarios, elementos de unión y elementos secundarios.

Elementos primarios. Son aquellos que configuran estructuralmente la pieza. En esta categoría están situados los elementos planos. El resto de elementos siempre tiene una relación directa con ellos.

Elementos de unión. Sirven de nexo entre los elementos primarios. En esta categoría están englobados los pliegues o dobleces.

Las dos clasificaciones anteriores también se denominan **elementos básicos** dado que definen la configuración geométrica básica de la pieza.

Elementos secundarios. Son aquellos que están situados “dentro” de otros, por ejemplo, un punzonado siempre está relacionado con el plano en el que se ha realizado. Estos elementos se consideran subordinados del elemento en el que están contenido dado que siempre son dependientes de ellos. En la mayor parte de los casos, el elemento del que dependen siempre es un elemento plano, siendo este el caso considerado.

En la tabla 3-17 están expuestos los elementos principales y subordinados tenidos en cuenta en el estudio. También se muestra la nomenclatura empleada para la identificación de cada uno de los diferentes elementos (tabla 3-18).

En este análisis cada uno de estos elementos se considera individualmente o de forma independiente, extrayéndose los parámetros que definen geoméricamente el elemento: medidas, ángulos, diámetros... así como los elementos subordinados a ellos, principalmente a los elementos planos...

Tabla 3-17: Clasificación de elementos

Elemento básico (primario o de unión)	Elementos subordinados
Elemento plano (caras, pestañas)	Agujeros/Geometría Interna
	Estampado
	Geometría externa
	Geometría interna
Pliegue/Doblez	

Tabla 3-18: Elementos. Nomenclatura

		Nomenclatura
Elementos básicos	Plano	P_i (i: nº de plano)
	Pliegue/Doblez	D_{j-k} (j, k: planos que une el pliegue)
Elementos subordinados	Agujero	A_{i-n} i: plano en el que está situado n: identificación del elemento
	Estampado	E_{i-m} i: plano en el que está situado m: identificación del elemento
	Corte interno	CI_{i-n} i: plano en el que está situado n: identificación del elemento
	Corte exterior	CE_{i-q} i: plano en el que está situado q: identificación del elemento

b) Análisis morfológico/relacional.

Consiste en obtener las relaciones entre los diferentes elementos según ciertos criterios que a continuación se desarrollan. Ninguno de los elementos que dan forma a la pieza se puede tratar independientemente del resto, siempre existe algún tipo de dependencia o relación entre ellos. El conocimiento de dichos vínculos proporciona la información necesaria para conocer en profundidad la morfología de la pieza en estudio.

Considerando los elementos globalmente, como parte de un ente superior (pieza), es decir, según las interrelaciones que se dan entre ellos, se definen las relaciones que mantiene cada elemento con el resto de los elementos que configuran la pieza. Para una mejor comprensión y entendimiento del proceso, este se expone aplicándolo paralelamente en una pieza sencilla. En la figura 3-38 se observa la pieza tomada como ejemplo así como su descomposición en los elementos básicos.

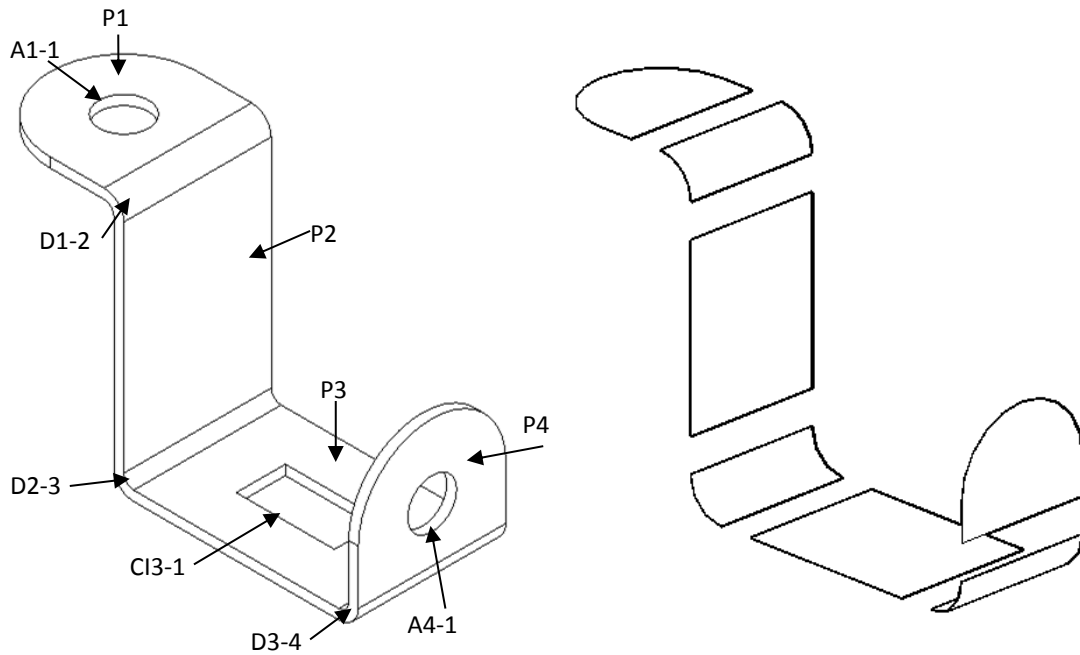


Figura 3-38: Pieza ejemplo y componentes de la misma. Descomposición en elementos básicos

Este análisis de las relaciones existentes entre los elementos se realiza en dos fases:

1. Análisis individual.

Se considera cada componente aisladamente y se busca, de entre el resto de elementos que configuran la pieza, aquellos que mantienen algún tipo de relación con el considerado. De esta manera se obtienen las dependencias entre ellos.

Ninguna de las diferentes partes de la pieza es independiente del resto, siempre está relacionada con al menos otro elemento. Por consiguiente, se comprueban los elementos que limitan con el considerado. Según la posición relativa entre los elementos las relaciones entre ellos estos se clasifican según dos tipos (siempre desde el punto de vista del elemento analizado):

Relación jerárquica. Esta relación se da cuando el elemento objeto de estudio puede tener contacto con un número indefinido de elementos, existiendo una dependencia jerárquica entre ellos, es decir, son elementos que pueden ser descendientes o ascendentes de otros. Por lo tanto, solo puede darse este tipo de

relación entre los elementos básicos, pliegues y planos. Por ese motivo también podemos denominar a los elementos básicos como elementos de contorno.

Relación de subordinación. Esta relación se da cuando un elemento depende de otro, y solo tiene relación con su ascendente, ya que siempre desciende de otro. Los elementos que tienen esta relación son los subordinados y su elemento superior siempre es un plano.

Analizando la pieza ejemplo de la figura 3-38, se obtiene que las relaciones existentes entre los diferentes componentes, que tomados aisladamente, están representadas en la figura 3-39.

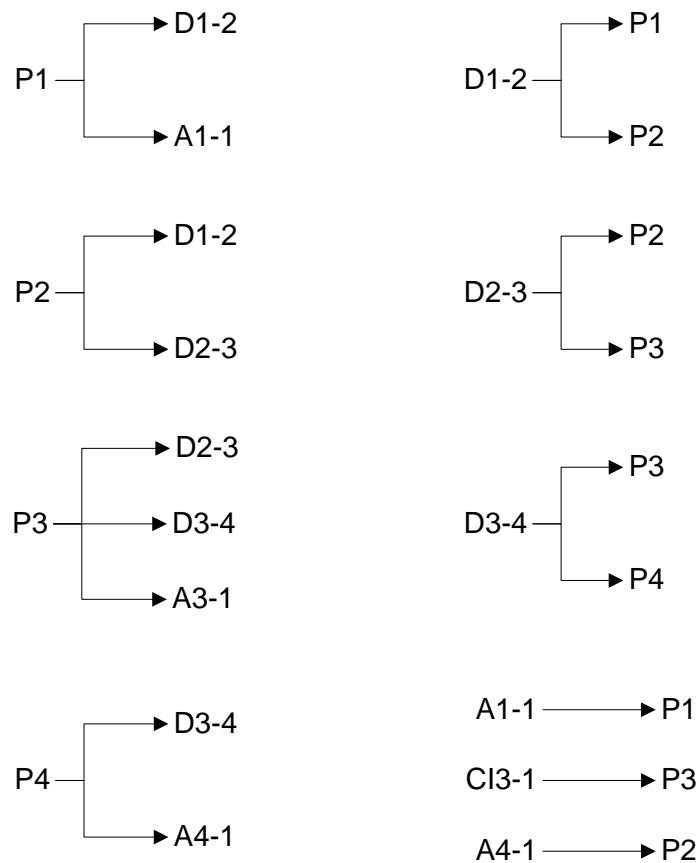


Figura 3-39: Relaciones entre los diferentes componentes de la pieza.

2. Análisis global.

Una vez obtenidas las relaciones de cada componente aislado (figura 3-39) se procede al estudio global del conjunto, es decir, se analizan las relaciones más allá de los elementos que limitan o son internos a cada parte de la pieza. Ahora se consideran todos los elementos teniendo en cuenta que pertenecen a un ente mayor, la pieza objeto del estudio. El resultado es la obtención de un diagrama relacional en el que las dependencias y/o relaciones extraídas en el apartado anterior se aprecian con mayor claridad, proporcionando una mayor información sobre la estructura y morfología de la pieza estudiada.

En este estudio se empieza tomando un elemento de partida o base (datum) y se van añadiendo el resto de componentes: primeramente se añaden aquellos que tienen una relación más directa con el elemento de partida, es decir los elementos que limitan y/o son dependientes de dicha base. Posteriormente se realiza el mismo proceso continuando con los elementos relacionados de los anteriores; el proceso sigue en cascada hasta que se llegue a los últimos componentes que solamente esta relacionados con los inmediatamente superiores a ellos.

En la figura 3-40 se observa el diagrama relacional obtenido para la pieza analizada. Se representa también el diagrama una vez que se han considerado las operaciones necesarias para su realización.

Como se puede observar, con este tipo de diagramas las relaciones e interdependencias entre los componentes de la pieza se perciben con una mayor claridad.

Analizando el diagrama desde el punto de vista de los tipos de relación entre los componentes se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Los elementos secundarios siempre están situados en los extremos de las diferentes ramificaciones existentes en el diagrama. Esto es así ya que son elementos finales, que no tienen la posibilidad de tener elementos descendientes de ellos. En la figura 3-40 se observa que en los extremos de los distintos ramales están situados los agujeros (punzonados). Aunque

desde un aspecto puramente analítico un elemento subordinado puede ser tomado como elemento base, desde un punto de vista industrial estos elementos no pueden ser elementos de partida.

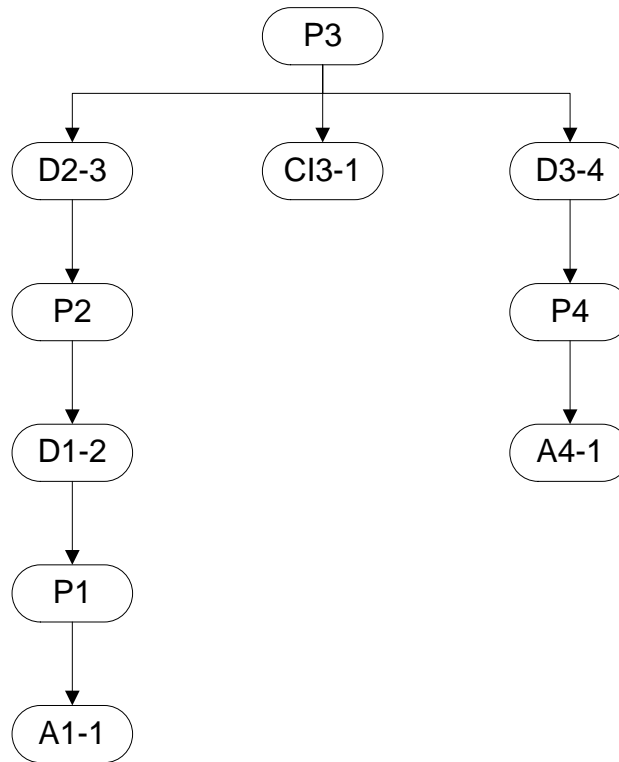


Figura 3-40: Diagrama relacional de la pieza.

- Los elementos básicos (primarios y de unión) pueden estar situados en cualquier posición en el diagrama, y por lo que cualquier elemento situado en una parte intermedia de los ramales es siempre un elemento básico, con dependencia tanto ascendente como descendente. Teóricamente cualquiera de ellos puede ser elegido como base o datum, si bien un elemento de unión no puede serlo, por lo que el elemento base siempre es siempre un elemento primario.

Un aspecto a considerar a la hora de obtener este tipo de diagramas es que estos varían en función del componente tomado como base, pudiendo ser muy diferentes según el elemento de partida considerado. Por lo tanto, esta característica tiene una

influencia decisiva a la hora de aplicar los diagramas relacionales en la obtención de la secuencia de operaciones, como se aprecia a continuación.

3.3.3.2 Criterios para la elección del elemento de partida.

Un aspecto importante en la elaboración del diagrama relacional es la elección del elemento base, el elemento a partir del cual se genera el diagrama. Como se ha comentado en el apartado anterior los elementos secundarios y los elementos de unión no pueden ser tomados como bases del diagrama, siendo únicamente posible tomar como elemento de partida a un elemento primario, es decir, cualquier elemento plano perteneciente a la pieza.

Una vez fijado que tipo de elementos son los más adecuados, la siguiente pregunta es ¿cuál de entre todos los que cumplan esas condiciones elegir? ¿Qué criterios seguir para realizar dicha elección?

Para poder responder a estas preguntas se han establecido una serie de criterios, todos ellos en función del diagrama relacional que cada una de las posibles opciones generará:

1. Criterio 1. Diagrama con el menor número de ramas posibles.

En este caso se toma como elemento de partida óptimo aquel que genere una menor dispersión o apertura del diagrama, siendo por lo tanto un diagrama más lineal y menos amplio que el de las otras opciones.

2. Criterio 2. Diagrama con longitud máxima de ramas mayor.

En este caso el elemento de partida genera un diagrama en el que las ramificaciones del diagrama tienen la mayor longitud posible, por lo tanto, los elementos estarán ordenados cuasi secuencialmente.

La práctica nos dice que los dos anteriores criterios son complementarios, generando habitualmente el mismo diagrama. La combinación de dichos criterios en uno solo genera las siguientes características:

- Como característica beneficiosa se estos diagramas generan una secuencia con un menor número de operaciones en cada estación, con lo que se obtiene un cierto desahogo o mayor amplitud en el interior del troquel.
- Como inconvenientes se obtienen troqueles con mayor número de estaciones, y una mayor dificultad para hacer la pieza en un solo troquel.

3. Criterio 3. Diagrama con el mayor número de ramas posibles.

Este criterio genera un diagrama con una mayor dispersión o apertura. El elemento de partida es aquel que está relacionado con el mayor número de componentes, el plano que más elementos dependientes de él.

4. Criterio 4. Diagrama con menor longitud de las ramas.

En esta situación la dependencia entre los elementos será menor, hay una dependencia con menor linealidad entre ellos.

Al igual que en el caso anterior estos dos últimos criterios son también complementarios entre sí. Su combinación genera un diagrama relacional que posee las siguientes características:

- Como principal ventaja obtenida se observa que al ser la longitud de los ramales mucho menor, da lugar a troqueles con un menor número de etapas o estaciones.
- Al contrario que en los primeros criterios, al tener un menor número de estaciones se produce una mayor acumulación de operaciones por cada etapa. Otro de los posibles inconvenientes también relacionado con el menor número de etapas es la existencia de probables incompatibilidades con necesidades de precisión y tolerancias.

Estos inconvenientes quedan posteriormente solucionados o minimizados con la introducción parámetros correctores que permiten modificar el diagrama original hasta

obtener modificaciones que den lugar a secuencias mejoradas que solventen los problemas anteriores teniendo ya en cuenta factores tecnológicos basados y la experiencia previa.

3.3.3.3 Influencia del análisis. Aplicación del diagrama relacional.

Los datos obtenidos sirven para, además de comprender mejor la pieza, fijar otros aspectos, siendo el principal de ellos y al que se ha dedica este estudio la obtención de la secuencia de operaciones.

I. Definición de las operaciones a realizar.

El análisis detallado de la tipología fija las características y los detalles de cada una de las operaciones que se han de realizar en la chapa o fleje original para obtener el elemento deseado. De esta forma se consigue la información precisa para la correcta elección o diseño de las herramientas más adecuadas para la ejecución de dichos procesos.

Tabla 3-19: Asignación de operaciones a cada elemento y nomenclatura empleada

	Elemento	Operación	Nomenclatura
Elementos básicos	Plano	Corte	OC _{Elemento}
	Pliegue/Doblez	Doblado	OD _{Elemento}
Elementos subordinados	Agujeros/Geometría Interna	Punzonado	OP _{Elemento}
	Estampado	Embutición	OE _{Elemento}
	Geometría interna	Corte	OCI _{Elemento}
	Geometría externa	Corte	OCE _{Elemento}

El diagrama relacional obtiene las relaciones entre los diferentes elementos que configuran la pieza, pero no define las operaciones a realizar. Obviamente cada uno de esos componentes se ha de realizar mediante su operación pertinente: agujero mediante punzonado, pliegue mediante doblado... Por lo tanto el primer paso consiste en asignar a cada elemento la operación necesaria para su obtención.

La inclusión de operaciones en el proceso se realiza modificando el diagrama original mediante la adición de nuevos eslabones que representan las operaciones a realizar según la asignación realizada en la tabla 3-19. Estos vínculos añadidos están solamente relacionados con el elemento al que hacen referencia. En la figura 3-41 se muestra el diagrama modificado con las operaciones añadidas (diagrama relacional/operacional).

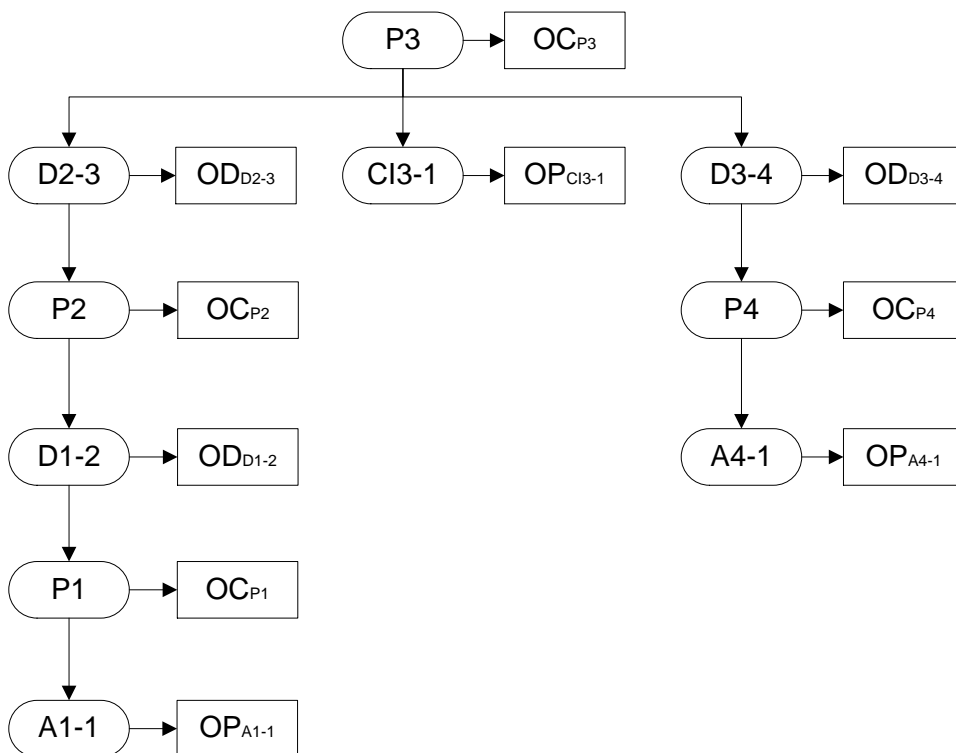


Figura 3-41: Diagrama resultante de la asignación de los procesos de trabajo

II. Definición de la secuencia de operaciones

Una vez definidas las operaciones a realizar, se ha de proceder a definir el orden según el cual estas van a ejecutarse en el interior del troquel. Partiendo del estudio inicial las primeras operaciones a realizar son aquellas que permiten obtener los elementos o entidades situadas en la parte final del diagrama, es decir, las localizadas en los extremos de cada una de las ramas del diagrama relacional. El orden en el que se realizan el resto de los elementos depende del nivel en el que estén situados en el

diagrama: primero se obtienen aquellos elementos localizados en los niveles inferiores y a continuación aquellos situados en los niveles inmediatamente superiores. Este proceso finaliza una vez que se llegue al elemento base (el último por realizar) y se realice la separación de la pieza de la banda. El elemento de partida se realiza siempre en una sola operación, que es la operación de corte mediante la cual la pieza es separada del fleje.

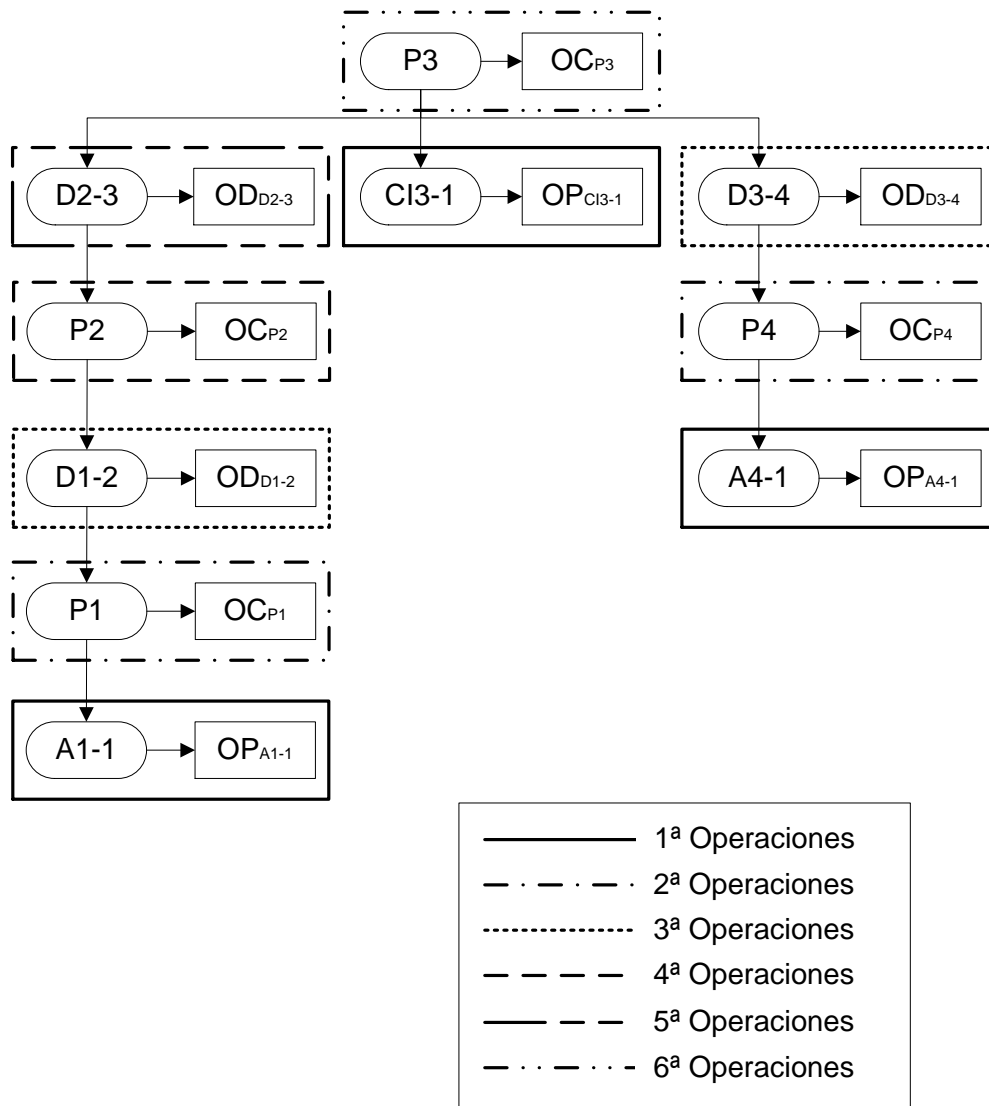


Figura 3-42: Orden de las operaciones

En la figura 3-42 se expone el diagrama de la pieza ejemplo con el orden de las operaciones, indicando las diferentes estaciones del troquel. La secuencia extraída está representada y organizada en la tabla 3-20.

Tabla 3-20: Operaciones y etapas del troquel

Etapa	Operaciones	Etapa	Operaciones
1ª Etapa	OP _{A1-1} / OP _{CI3-1} / OP _{A4-1}	4ª Etapa	OC _{P2}
2ª Etapa	OC _{P1} / OC _{P4}	5ª Etapa	OD _{D2-3}
3ª Etapa	OD _{D1-2} / OD _{D3-4}	6ª Etapa	OC _{P3}

Una modificación del gráfico como el representado en la figura 3-43, en el que se han situado las operaciones que se realizan en la misma etapa en el mismo nivel del diagrama, proporciona una interpretación más intuitiva y visual de lo anteriormente expuesto. Este último diagrama facilita la comprensión y mejora la extracción de los datos del mismo.

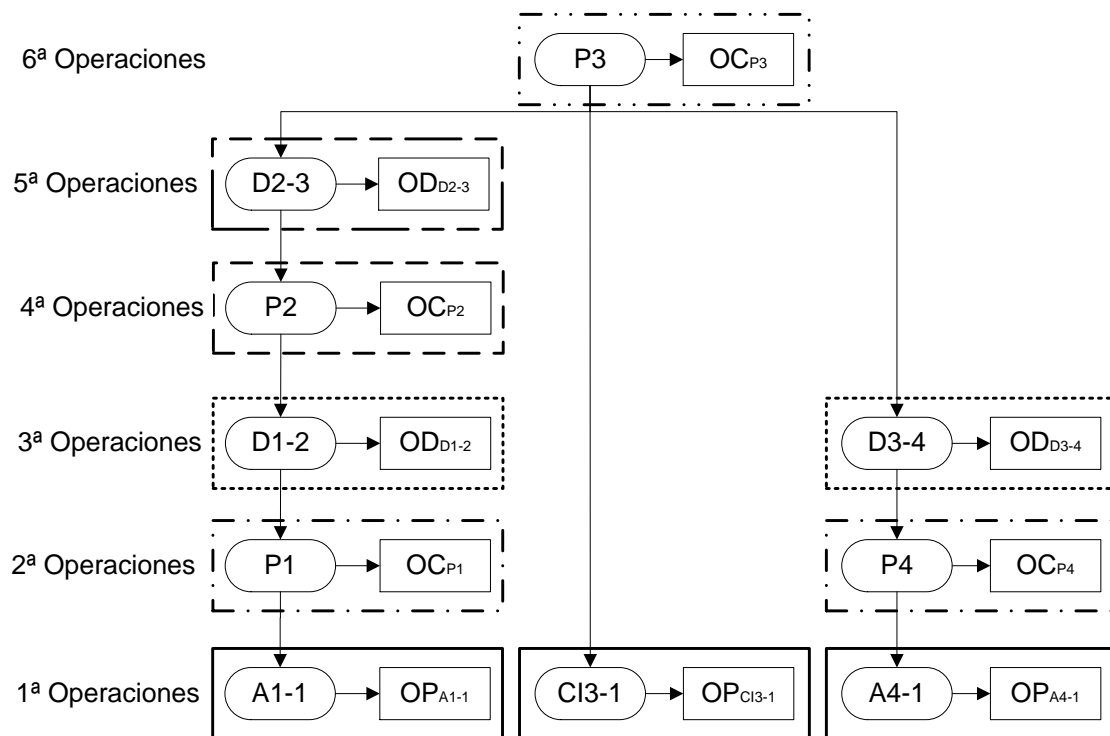


Figura 3-43: Reordenación del diagrama

III. Modificación de la secuencia obtenida

Los cambios a los que se ha de someter el diagrama no solamente pueden ser para obtener una mejor visión del mismo y de los beneficios que aporta, sino que también ha de poder modificarse para obtener secuencias derivadas de la inicial. Estos cambios del orden de las operaciones son debidos tanto a la experiencia del diseñador que le llevara a realizar los cambios oportunos en esta secuencia obtenida para de esta manera mejorar el proceso, como a la necesidad de tener también en consideración los aspectos tecnológicos (como por ejemplo precisión) que tienen gran influencia en el resultado final, por lo que se puede considerar la secuencia inicialmente obtenida como un buen punto de partida que a veces ha de ser necesario modificar.

Estos cambios que el diseñador necesita introducir, son fácilmente trasladables al diagrama relacional modificado, ya que solo es necesario cambiar el nivel en el que un determinado elemento está situado, cambiando de esta manera el orden de las operaciones a realizar y siendo la secuencia obtenida diferente a la original extraída del diagrama relacional sin modificar.

Obviamente un elemento determinado no se puede situar de manera arbitraria en una estación aleatoria, sino que ha de seguir ciertas premisas lógicas. La principal de estas premisas es que un elemento subordinado no puede estar situado en un nivel o estación igual o superior al del componente del que depende.

Aplicando lo anteriormente descrito a la pieza ejemplo se pueden realizar los siguientes cambios:

1. La primera de las etapas realiza tres operaciones de punzonado, por lo que para evitar posibles interferencias entre herramientas dicha etapa se divide en dos: en la primera se ejecutan los punzonados que dan lugar a los agujeros, mientras que en la segunda se realiza en el corte interno (forma rectangular).
2. Otra posible modificación sería realizar los cortes (OC_{P1} / OC_{P4} / OC_{P2}) que dan lugar a las pestañas en la misma operación. Esto daría lugar al diseño de una herramienta de corte menos (figura 3-44 (a)), ya que estarían las tres operaciones integradas en la misma etapa. En este caso no se ha realizado dado que los

perfiles de las herramientas que se obtienen con distribución inicial se consideran más adecuados al conservar la simetría.

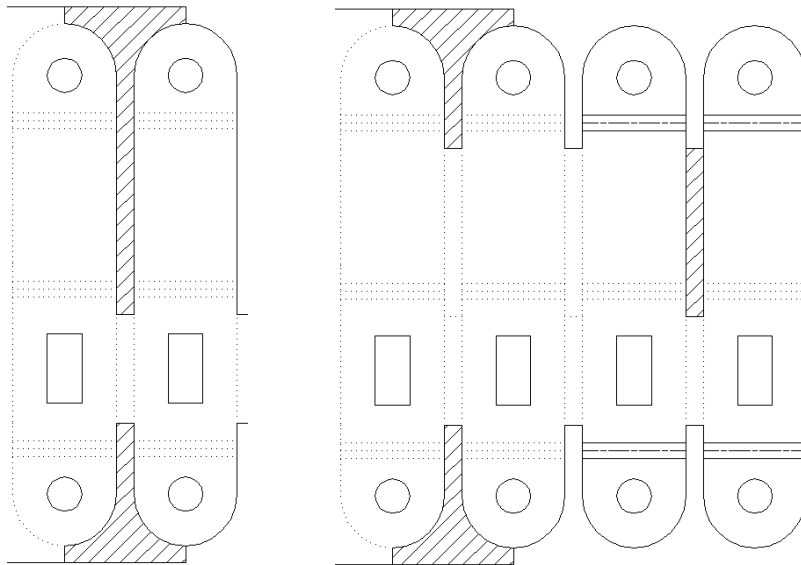


Figura 3-44: Perfiles de las herramientas de corte según la secuencia elegida (a) (b).

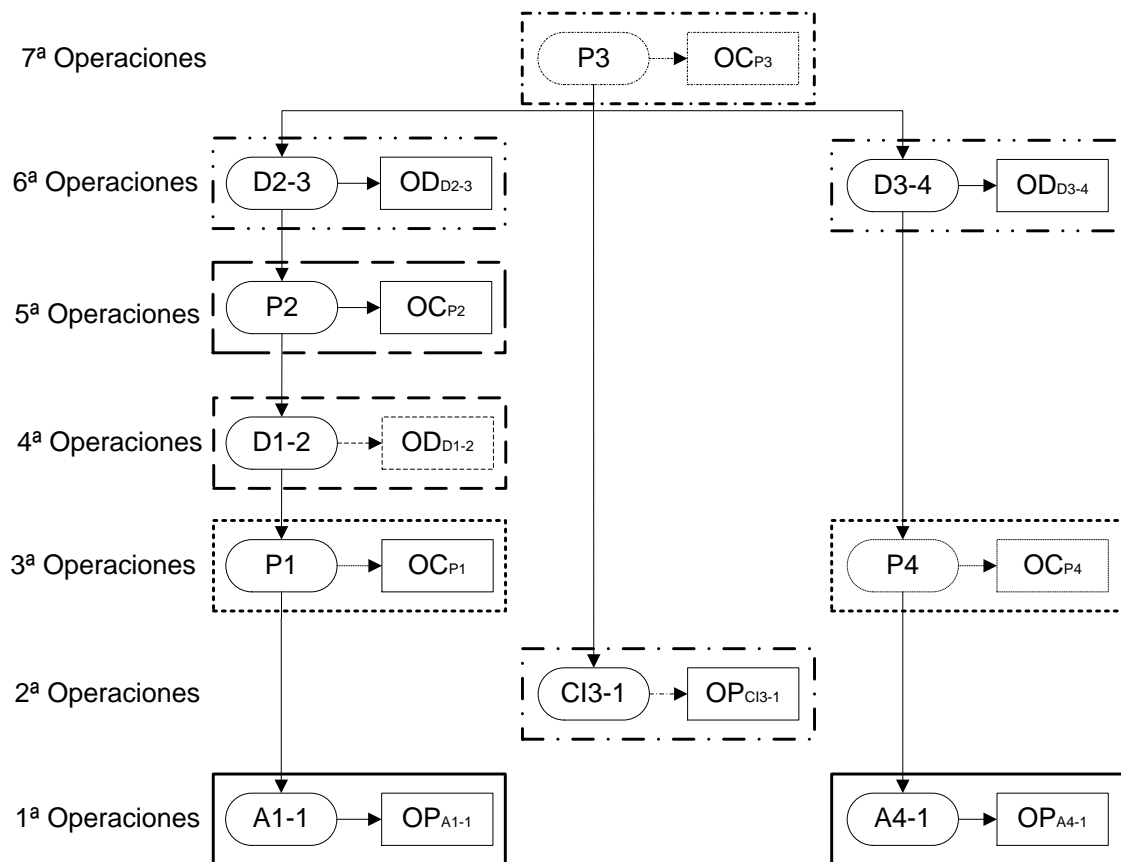


Figura 3-45: Diagrama modificado.

Después de introducir los cambios mencionados la nueva distribución del diagrama queda definido según la figura 3-45, en la que se observa que el número de estaciones o etapas ha pasado de las 6 iniciales a 7, estando las operaciones distribuidas según la tabla 3-21.

Tabla 3-21: Secuencia de operaciones final.

Etapa	Operaciones	Etapa	Operaciones
1ª Etapa	OP_{A1-1}/ OP_{A4-1}	5ª Etapa	OC_{P2}
2ª Etapa	OP_{C13-1}	6ª Etapa	OD_{D2-3}
3ª Etapa	OC_{P1}/ OC_{P4}	7ª Etapa	OC_{P3}
4ª Etapa	OD_{D1-2}/ OD_{D3-4}		

El diseño de banda correspondiente a la secuencia obtenida está representado en la figura 3-46.

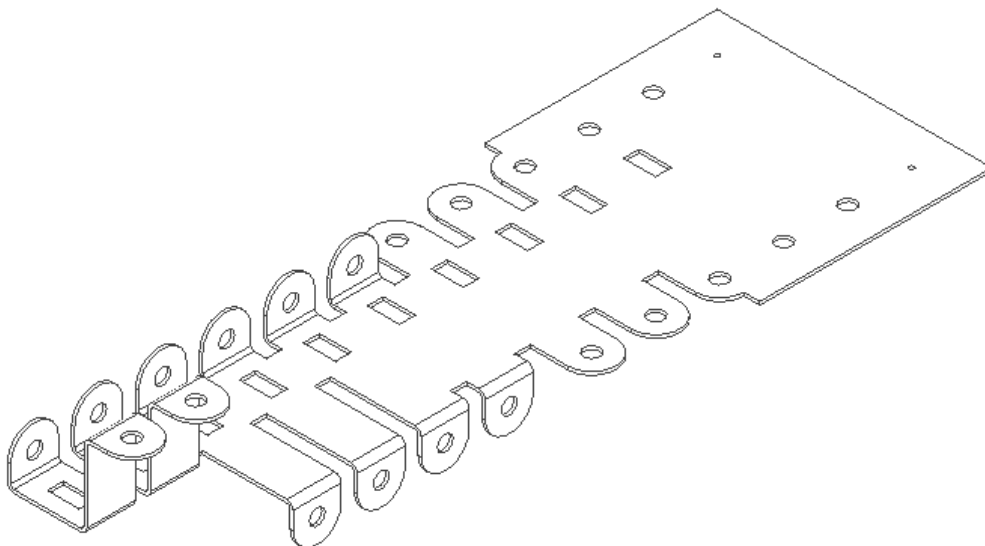


Figura 3-46: Diseño de banda según la secuencia obtenida.

Puede apreciarse al compararse con el método fuzzy (figura 3-36) la existencia de ciertas diferencias, tales como:

- Además de dar el orden de las operaciones, se asignan operaciones a etapas, flexibilizando el procedimiento.
- El método fuzzy ordena las operaciones en grupos de corte y/o doblado. En el sistema del diagrama relacional, las operaciones siguen un orden más consecuente con el proceso de fabricación. El orden de las operaciones es independiente del tipo de operación, siendo más flexible, al poder intercalar operaciones de diferente tipo.

3.3.3.4 Implementación de la metodología.

Desarrollada y expuesta la metodología de obtención de la secuencia de operaciones mediante el diagrama relacional se presenta una estructura para su implementación en una aplicación práctica. El objetivo es la generación del diagrama relacional y la posterior obtención de la secuencia de operaciones.

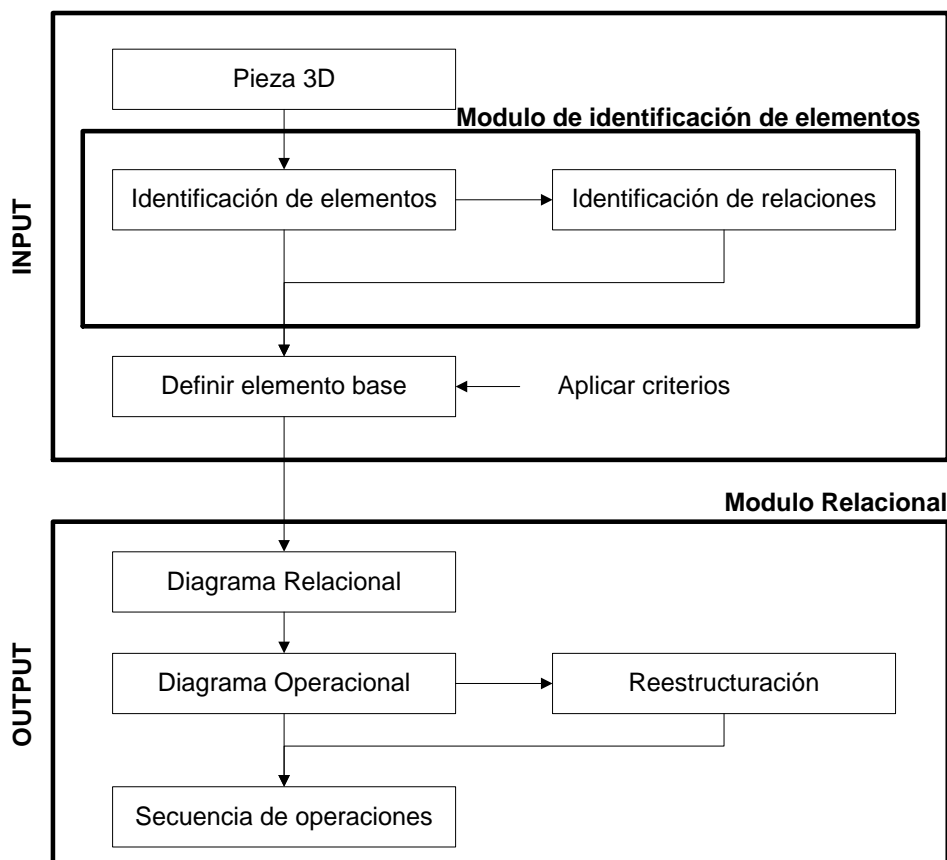


Figura 3-47: Representación esquemática de la aplicación.

La aplicación se estructura en dos módulos principales (figura 3-47) con diferentes funciones:

1. Módulo de Identificación de elementos.
2. Modulo Relacional.

3.3.3.5 Módulo de Identificación de elementos.

El módulo de la identificación de elementos ejecuta las tareas siguientes:

1. **Identificación de elementos.** Identifica los elementos que configuran la pieza, tomando sus parámetros principales: nombre, tipo de elemento, medidas básicas. El nombre tomado será el que aparezca reflejado en el diagrama relacional que se busca obtener.
2. **Identificación de relaciones.** Búsqueda, para cada elemento, de los elementos que tienen alguna relación o dependencia con él.

La relación o dependencia entre los diferentes elementos se obtiene analizando todas las superficies que forman cada elemento y, dentro de cada superficie, cada una de las aristas o bordes que las delimitan. Una arista es la intersección de dos superficies diferentes, por lo que pertenece a ambas. Como cada superficie pertenece a un solo elemento, obviamente existe una relación entre los elementos que han creado esas superficies cuya intersección es la arista analizada. De esta manera, analizando las aristas de la pieza, se extraen las relaciones entre todos los elementos que componen la pieza.

En la figura 3-48 se presenta el organigrama del módulo de identificación de elementos.

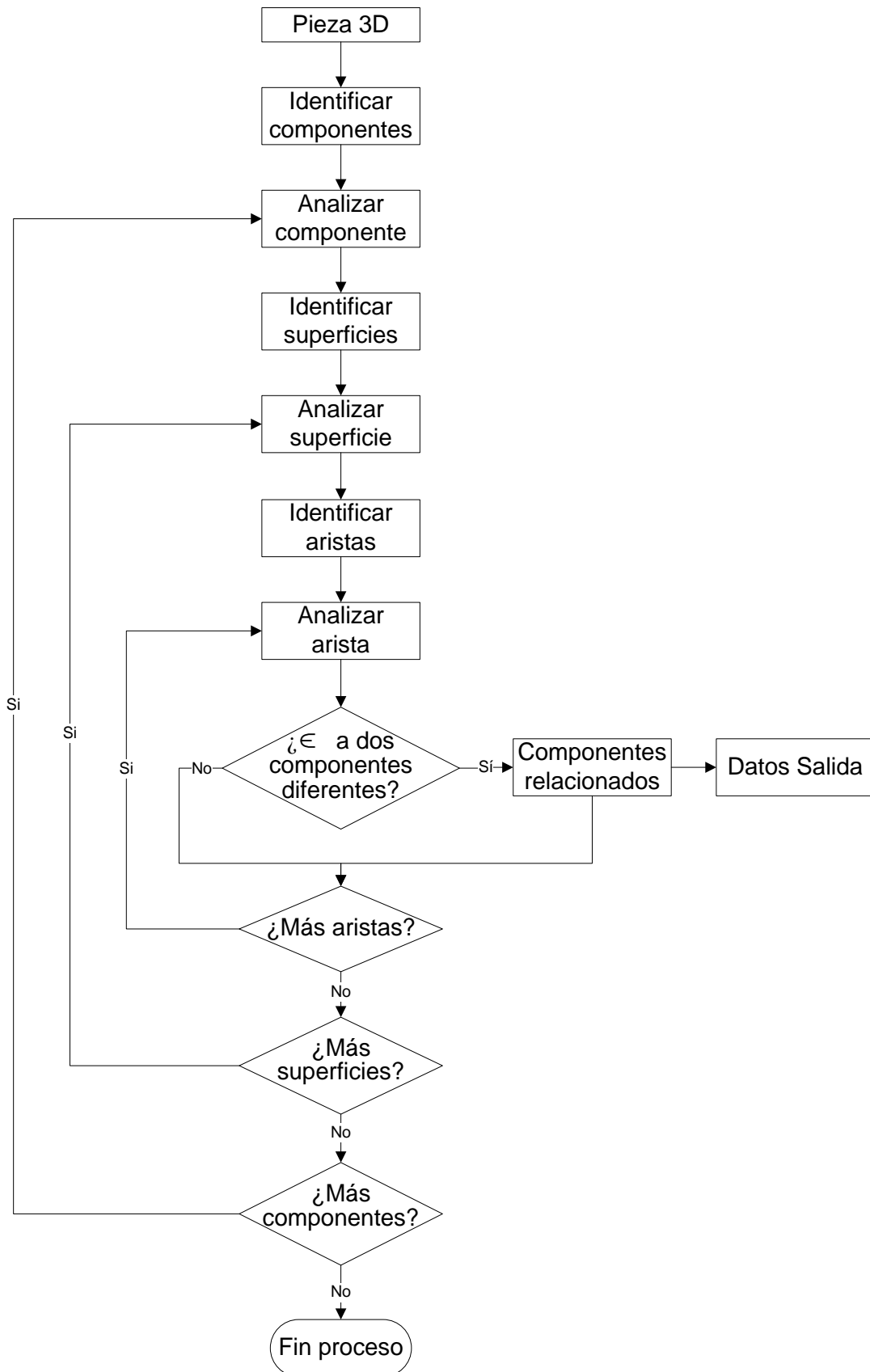


Figura 3-48: Organigrama del módulo de identificación de elementos.

3.3.3.6 Modulo relacional.

El módulo relacional analiza los datos obtenidos en el módulo de identificación de elementos y crea el diagrama relacional. Para ello se introduce el elemento base y ejecuta las tareas siguientes:

- **Diagrama relacional.** El módulo analiza los datos extraídos en el módulo de identificación de elementos y los reorganiza, creando el diagrama relacional a partir del elemento base.
- **Diagrama operacional.** Añade las operaciones correspondientes a los elementos del diagrama relacional.
- **Secuencia de operaciones.** A partir del diagrama de operaciones, se genera la secuencia de operaciones.

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA. RESULTADOS.

4.1. INTRODUCCION

A lo largo de este trabajo se han presentado nuevos procedimientos y metodologías orientados al diseño de matrices progresivas en los que se ha abordado una aproximación a la evolución de las máquinas-herramienta, aspectos relacionados con la banda como la optimización de etapas según las operaciones que se definan, lógica difusa, diseño de herramientas..., así hasta abarcar los diversos elementos que intervienen en un troquel progresivo.

Seguidamente se muestran diferentes casos en los que se aplican los procedimientos desarrollados, en los que se aprecia como se utilizan las aportaciones metodológicas realizadas al diseño de troqueles progresivos, abordando aspectos fundamentales como el diseño de banda, el diseño de herramientas... Los casos elegidos presentan diferentes morfologías con el objeto de apreciar situaciones específicas en cada uno de ellos.

Los casos que a continuación se presentan se desarrollan de acuerdo con lo planteado respecto al diseño de banda, a la secuencia de operaciones siguiendo la metodología propuesta, y al diseño de herramientas específicas.

4.2. BISAGRA

La pieza de la figura 4-1 es una bisagra utilizada en la industria de la automoción. En la propuesta de fabricación se definen todos los aspectos constructivos que se han de tener en cuenta, medidas, tolerancias o pruebas de fiabilidad que ha de superar la pieza obtenida.

Aquí se presenta el proceso de diseño aplicando las metodologías que se han desarrollado siguiendo los pasos que a continuación se indican.



Figura 4-1: Bisagra.

Paso 1. Identificación de componentes.

Se identifican y definen los componentes geométricos que configuran la pieza dato, que son los indicados en la figura 4-2. En la tabla 4-1 se presentan los componentes geométricos y la nomenclatura asignada.

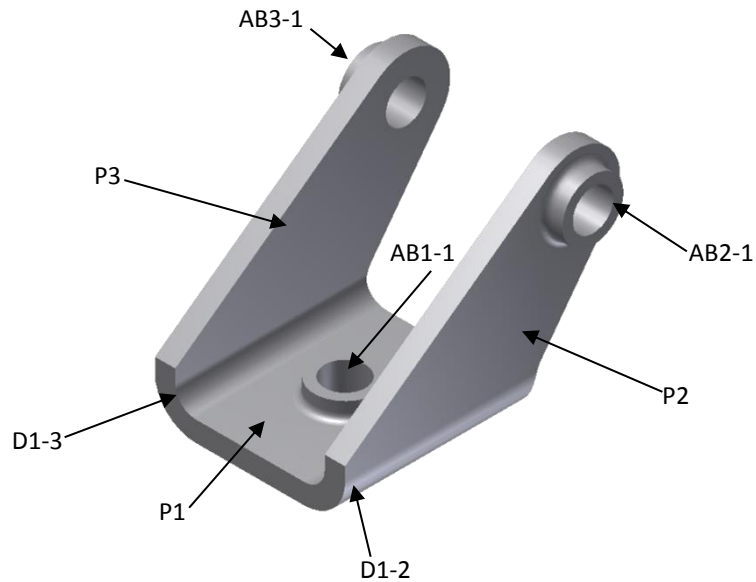


Figura 4-2: Componentes geométricos.

Tabla 4-1: Nomenclatura de los componentes de la bisagra

Elementos planos	P1	Plano intermedio
	P2	Plano lateral
	P3	Plano lateral
Doblez	D1	Doblez que enlaza el plano 1 con el 2
	D2	Doblez que enlaza el plano 1 con el 3
Abocardados	AB1	Abocardado situado en el plano 1
	AB2	Abocardado situado en el plano 2
	AB3	Abocardado situado en el plano 3

Paso 2. Identificación de las relaciones y generación del diagrama relacional.

Se procede a obtener el diagrama relacional. Como elemento clave de este paso se asigna como elemento base el plano P1, debido a la condición de simetría que presenta la pieza objeto de estudio.

Se procede al análisis de las relaciones entre los diferentes elementos considerados individualmente y se modifica la nomenclatura de algunos de ellos, para adaptarse a las características específicas de la pieza, obteniendo una mejor comprensión de las relaciones, y tomando como elementos de referencia los planos que configuran la pieza, los cuales conservan su nomenclatura. En este caso modificar la nomenclatura no resulta especialmente trascendente, pero en piezas de mayor complejidad y en las que haya posibilidad de elegir el plano base adquiere mayor relevancia y la nomenclatura podría variar según el plano considerado.

Tabla 4-2: Nomenclatura modificada de la bisagra

Doblesces	D1=D1-2	Doblez que conecta el plano 1 con el 2
	D2=D1-3	Doblez que conecta el plano 1 con el 3
Abocardados	AB1=AB1-1	Abocardado situado en el plano 1
	AB2=AB2-1	Abocardado situado en el plano 2
	AB3=AB3-1	Abocardado situado en el plano 3

De este modo se obtiene el diagrama relacional de la figura 4-3:

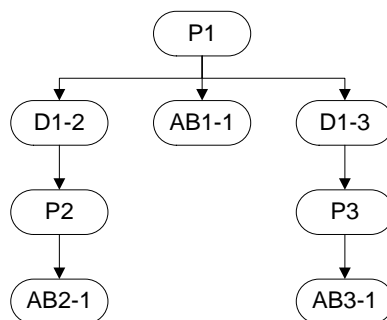


Figura 4-3: Diagrama relacional de la bisagra.

Paso 3. Asignación de operaciones a cada componente.

Se asigna a cada uno de los elementos del diagrama relacional las operaciones correspondientes para obtenerlo:

1. Los planos (P) se obtienen mediante una operación de corte (OC)
2. Los doblados (D) se realizan a través de una operación de doblado (OD)
3. Los abocardados (AB) se generan aplicando dos operaciones: primeramente se realiza un punzonado (OP) y seguidamente la deformación que genera el abocardado (OE).

El diagrama relacional inicial se transforma y completa incluyendo las operaciones o transformaciones necesarias, al que se puede denominar relacional/operacional (figura 4-4).

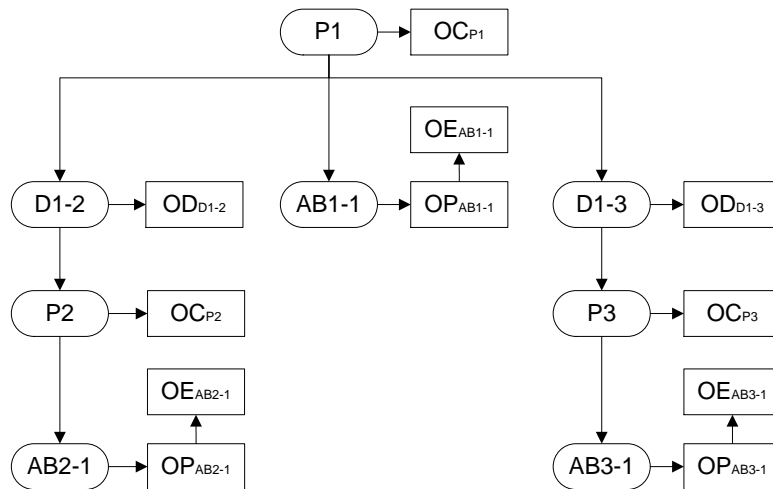


Figura 4-4: Diagrama operacional/relacional.

Paso 4. Número de etapas. Secuencia de operaciones.

A partir del diagrama de la figura 4-4 se define la secuencia de operaciones y el número de etapas mínimo que ha de tener el troquel. Para una mejor interpretación se redistribuye el diagrama situando cada operación en la etapa asignada. En este caso la única modificación consiste en situar el abocardado AB1-1 y las operaciones vinculadas en la primera etapa dado que se trata de un elemento situado en el final de un ramal, por lo que según la metodología desarrollada indica que se ha de realizar en las etapas iniciales del troquel. El diagrama final queda planteado en la figura 4-5.

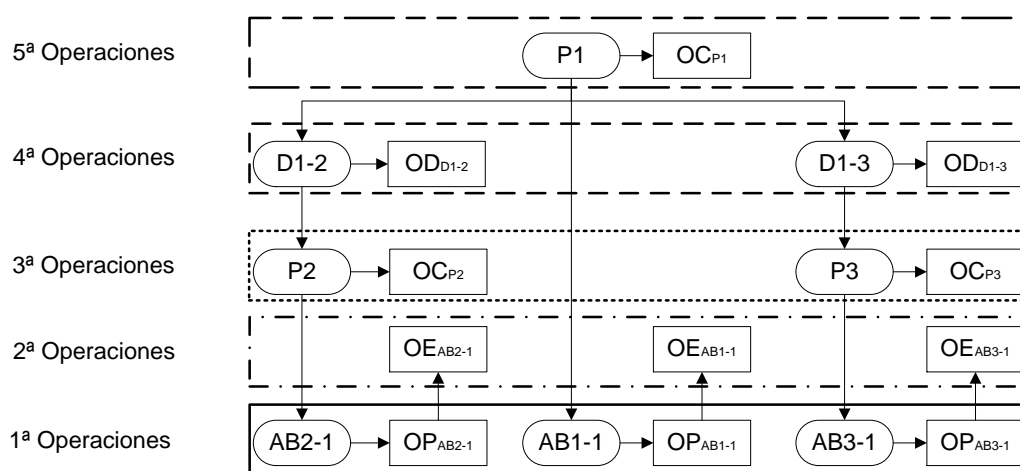


Figura 4-5: Secuencia de operaciones.

La secuencia de operaciones que se extrae es la siguiente:

- 1ª etapa. Operaciones OP_{AB2-1} , OP_{AB1-1} y OP_{AB3-1} . Es decir, se realizan los punzonados iniciales que darán lugar a los abocardados.
- 2ª etapa. Operaciones OE_{AB2-1} , OE_{AB1-1} y OE_{AB3-1} . Estas operaciones dan lugar a los abocardados.
- 3ª etapa. Operaciones OCP_2 y OCP_3 . Se produce el corte que genera los planos o pestañas laterales con la geometría que les define.
- 4ª etapa. Operaciones OD_{D1-2} y OD_{D1-3} . En la 4ª etapa se doblan las pestañas laterales.

- 5ª etapa. Operación OC_{P2} . Es la operación final en la que se obtiene el elemento plano P1, definido inicialmente como base, separándose la pieza final de la banda.

El número de etapas necesarias para elaborar esta bisagra, según la metodología aplicada, es de al menos cinco.

Paso 5. Obtención del diseño de banda.

El diseño de la banda que se corresponde con la secuencia de operaciones de la figura 4-5 se muestra en la figura 4-6, en la que se ha introducido una etapa en blanco o vacía tras la 2ª con el objeto de visualizar las diferentes etapas que conforman el diseño de banda.

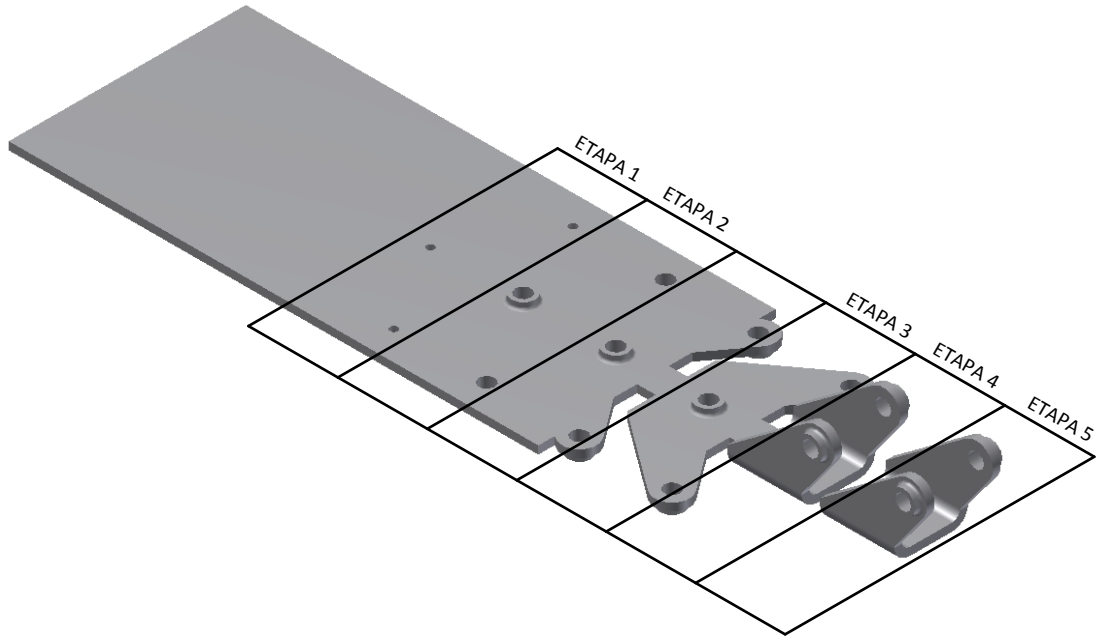


Figura 4-6: Diseño de banda (preliminar) según las etapas de la figura 4-5.

Paso 6. Optimización del diseño de banda.

Habitualmente el diseño de banda preliminar es necesario modificarlo para que sea tecnológicamente realizable. Estas modificaciones están influenciadas por múltiples aspectos que no afectan al orden de la secuencia de operaciones obtenido. Es decir, el orden se conserva pero el número de etapas varía.

Los principales factores que inducen a modificar el diseño son los siguientes:

- Inclusión de agujeros que sirven de guía a los buscadores. Esta es una operación que se realiza para poder situar y fijar la banda.
- Inclusión de etapas libres que se introducen principalmente:
 1. Para liberar o dejar espacio libre en las placas del troquel y así asegurar que no haya interferencias entre las herramientas que operan en esa zona.
 2. Para equilibrar los momentos que se generan en el troquel y evitar desviaciones durante el proceso de fabricación.

La figura 4-7 muestra el diseño de banda final tras aplicar los criterios anteriores.

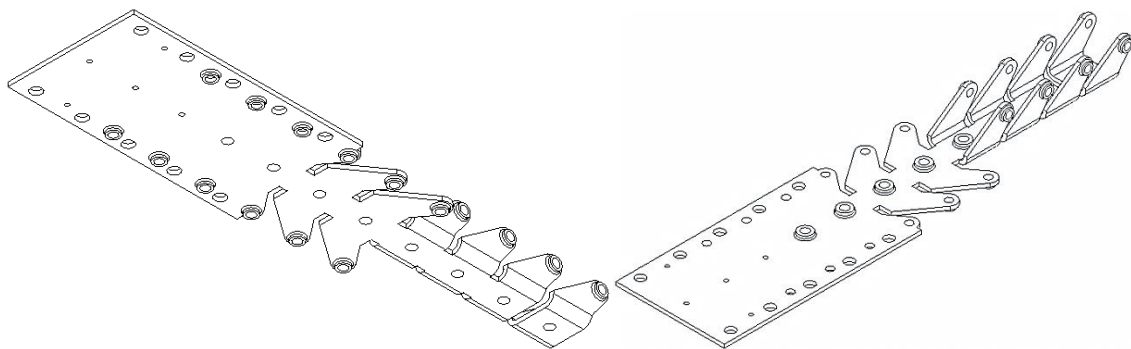


Figura 4-7: Optimización del diseño de banda.

Al aplicar estas condiciones se ha pasado de las 5 etapas iniciales a 10 con lo que el diseño del troquel resulta viable. Las modificaciones introducidas son:

1. Punzonado de los agujeros de los buscadores. Esta operación es previa al resto de las operaciones. En este caso se ha introducido en la etapa inicial junto con los agujeros previos a los abocardados, dado que la precisión necesaria en estos últimos no es muy estricta.
2. Separación de los abocardados. En la segunda etapa se realizan los abocardados laterales mientras que el abocardado central se ejecuta en la cuarta etapa.
3. Etapa tercera libre entre las dos operaciones de abocardado, ya que tienen sentido contrario y es preciso evitar el solape de las herramientas.
4. Etapa cuarta. Abocardado central.
5. Etapa quinta libre para evitar el solapamiento de herramientas.
6. Etapa sexta. Se realiza el troquelado de las pestañas u orejetas laterales.
7. Etapa séptima. Etapa libre, en este caso debido al espacio que hay que dejar en el troquel para poder situar las herramientas de doblado.
8. Etapa octava. Doblado de las pestañas laterales.
9. Etapa novena. Calibrado de las pestañas laterales. De esta manera se consigue evitar el retroceso elástico que se produce en las pestañas una vez dobladas.
10. Etapa décima. Es la etapa final, en la que se separa la pieza terminada de la banda.

Se observa que, aunque el número de etapas finales es considerablemente mayor que el inicial, el orden en el que las operaciones se realizan es el mismo que el obtenido mediante la metodología desarrollada, con la única de la separación en dos etapas de las operaciones de abocardado.

Paso 7. Diseño de herramientas no normalizadas.

Realizado el diseño de banda se procede a diseñar el troquel, es decir las placas herramientas y demás útiles. Para ello el primer paso es desarrollar las herramientas necesarias para ejecutar las operaciones que se han definido en los pasos anteriores, que son las siguientes:

1. Punzones para realizar los agujeros. Son herramientas estándar, por lo que se elegirán por catálogo o bases de datos disponibles.
2. Punzones para la operación de abocardado. Al igual que las anteriores están normalizadas, luego se procede de igual manera.
3. Herramienta de corte para dar forma a las pestañas laterales. En este caso el punzón de corte no está normalizado dado que ha de adaptarse a formas geométricas diversas, por lo que se ha de diseñar la herramienta que se adapte a dicha operación. Para su diseño se aplica la metodología desarrollada anteriormente.
4. Herramienta de doblado y calibrado de las pestañas. Ambas operaciones se realizan en etapas consecutivas por lo que se diseña una misma herramienta para las dos.
5. Herramienta de corte final de la pieza. Esta es la operación final en la que la pieza se separa de la banda. Dependiendo de sus dimensiones esta herramienta puede ser comercial o no. En el caso de que no lo sea se procederá igual que en las herramientas que dan forma a las pestañas.

Herramienta de corte de las pestañas laterales.

Para realizar el diseño de las herramientas de corte que dan forma a las pestañas laterales se sigue el procedimiento aquí desarrollado. Para ellos se emplea el diseño de banda inicial, sin modificar, dado que la banda final es idéntica a la anterior pero con una distribución más amplia de las operaciones de trabajo.

Las fases de este procedimiento que aquí se proponen son las siguientes:

- Fase 1. Se proyecta la pieza desarrollada sobre el diseño de banda tantas veces como etapas tiene el troquel (figura 4-8).

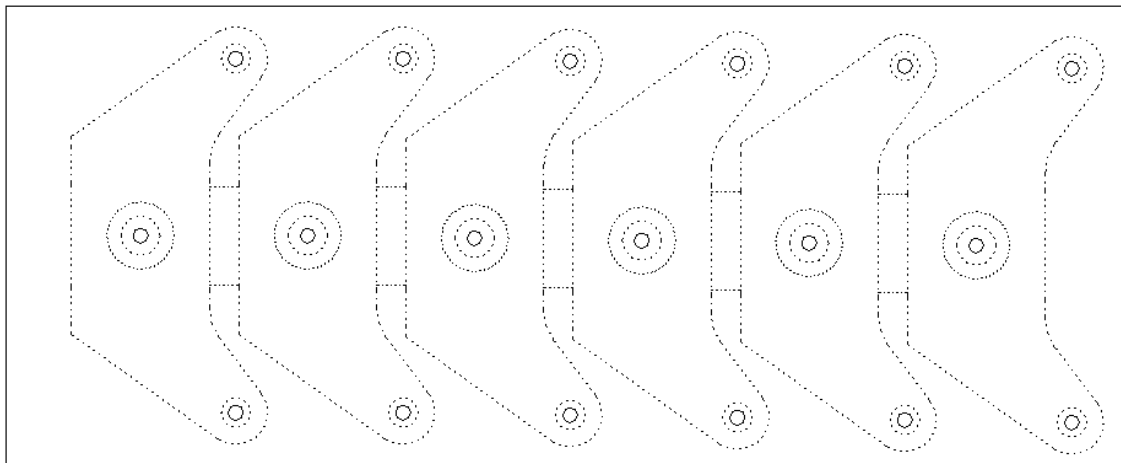


Figura 4-8: División de la banda.

- Fase 2. En la tercera etapa, donde se produce el corte que genera las pestañas, se delimita el área afectada por el corte para así obtener el perfil de la herramienta adecuada. En la figura 4-9 se observa el perfil que ha de tener dicha herramienta, así como la matriz de corte correspondiente.

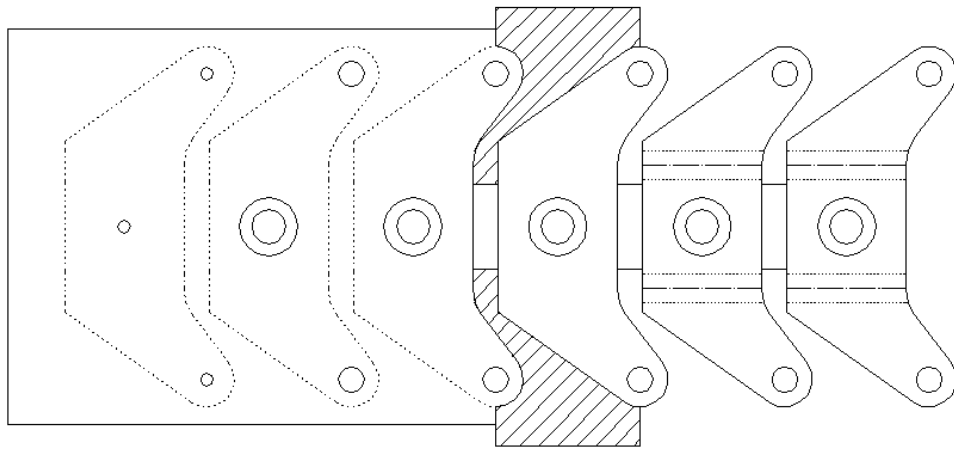


Figura 4-9: Obtención del perfil de la herramienta.

- Fase 3. Diseño de la herramienta (figuras 4-10, 4-11 y 4-12). A partir del perfil obtenido se diseña la herramienta y su matriz de modo que se ajuste al troquel. Las herramientas obtenidas son las siguientes.

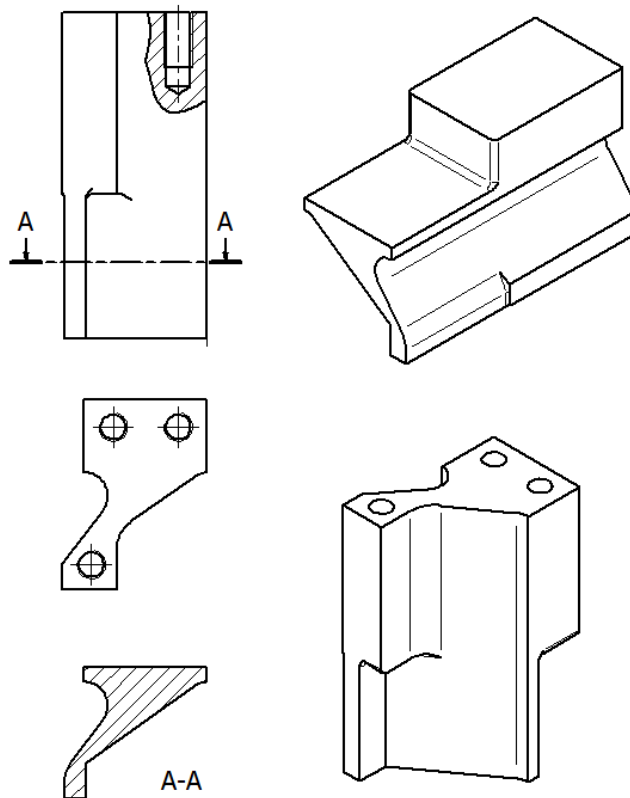


Figura 4-10: Herramienta de corte.

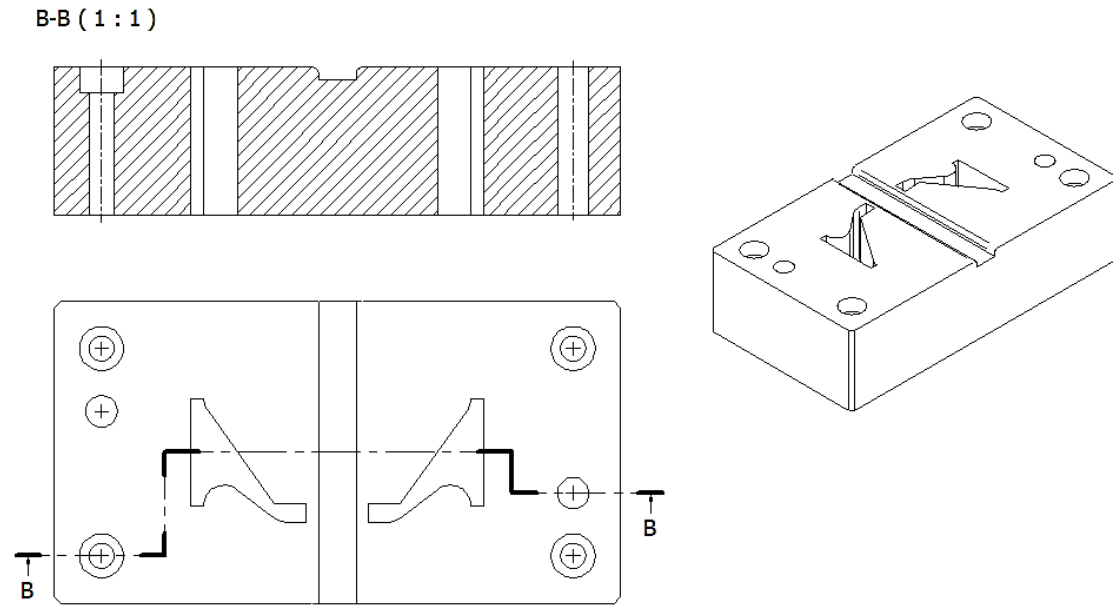


Figura 4-11: Matriz de la herramienta de corte.

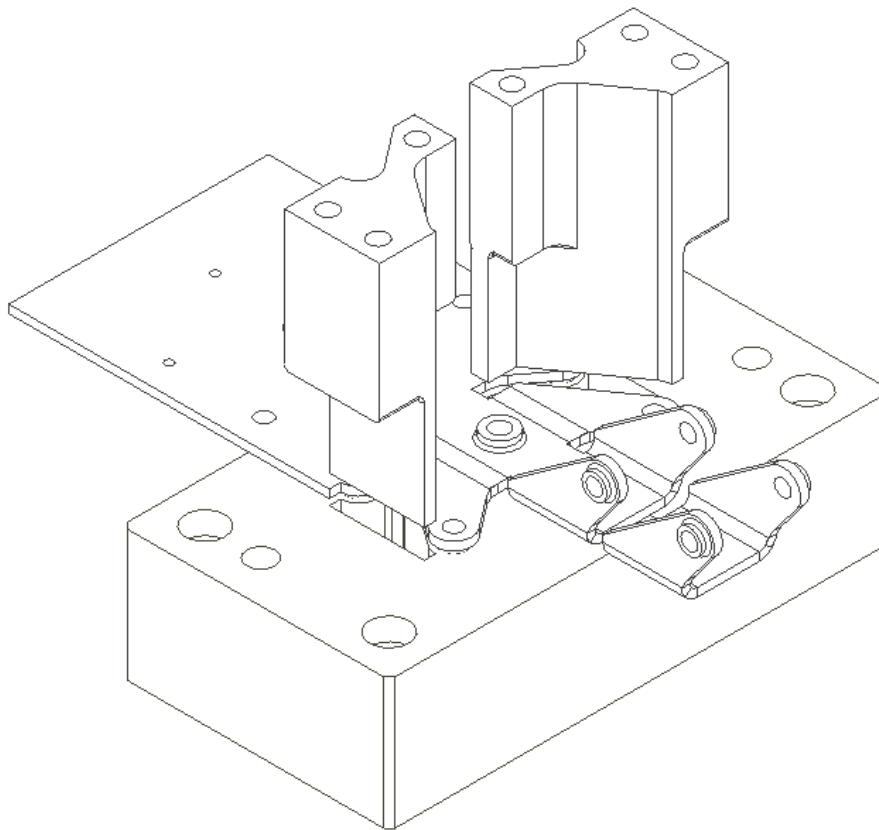


Figura 4-12: Conjunto herramienta de corte-banda.

Herramienta de doblado y calibrado.

Para obtener la bisagra es necesario diseñar otra herramienta específica que es la permite realizar las operaciones de doblado y calibrado de las pestañas. Dado que el calibrado se ha de realizar en la etapa posterior al doblado se diseña una sola herramienta que cumpla con ambas condiciones.

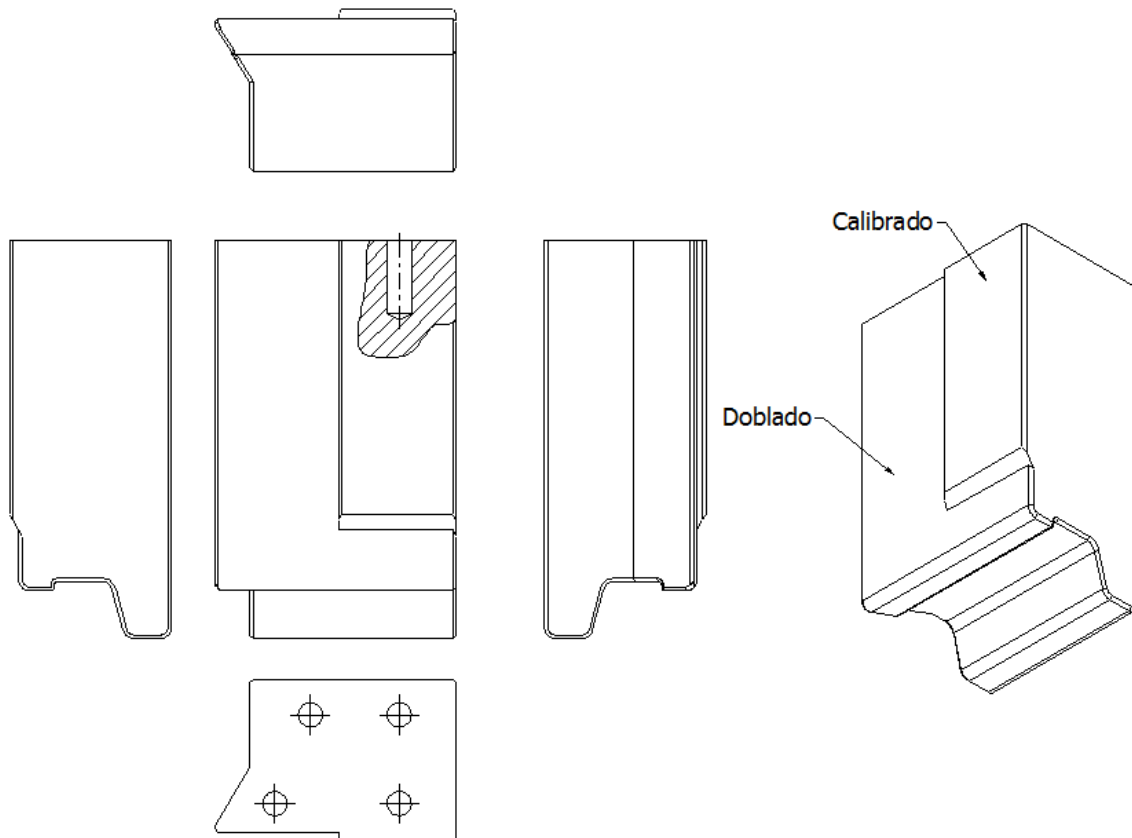


Figura 4-13: Herramienta de doblado y calibrado.

El diseño propuesto se muestra en la figura 4-13, en la que se observan ambas etapas. La función de calibrado se lleva a cabo mediante el sobredoblado de las pestañas laterales.

Asimismo se ha diseñado la matriz en la que la herramienta anterior se acopla para producir el doblado y calibrado requerido (figura 4-14).

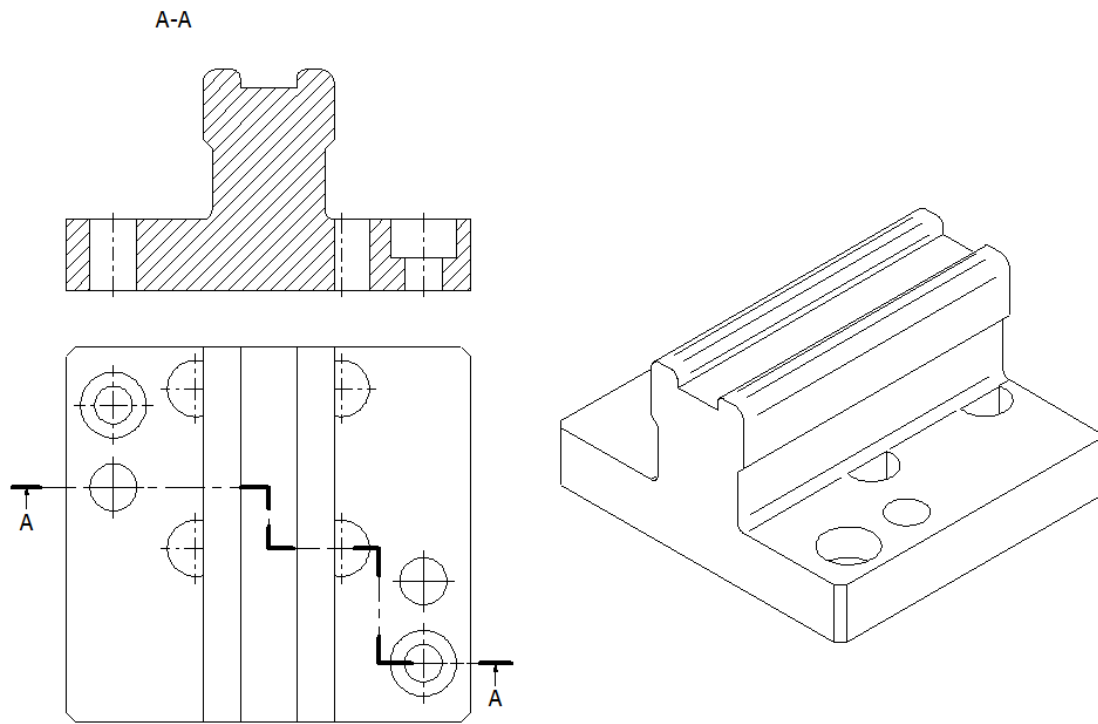


Figura 4-14: Matriz de la herramienta de doblado y calibrado.

Punzón de corte de la tira de unión.

El punzón de corte que elimina el material que une la pieza ya conformada con el fleje, puede estar catalogado según normas o comercialmente, o requerir que se haga a medida como es el caso

- Fase 1. El procedimiento para su diseño es similar al realizado según las figuras 4-8 y 4-15. El resultado de la fase inicial del proceso, la distribución del desarrollo de la pieza sobre la banda, es idéntico en ambos casos.
- Fase 2. Obtención del perfil de la herramienta de corte. Se sigue el procedimiento análogo ya descrito, pero según el perfil que se muestra en la figura 4-15.

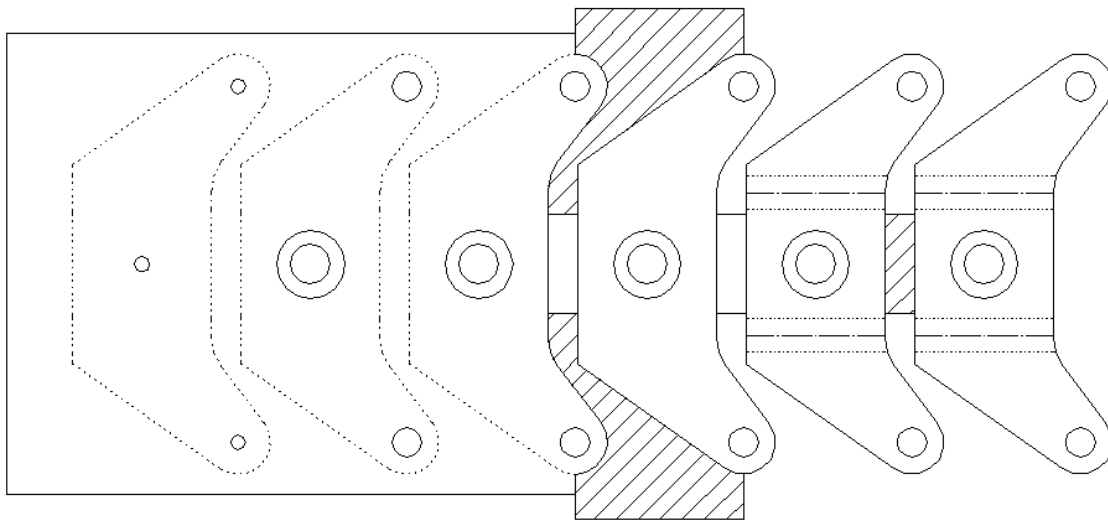


Figura 4-15: Perfil de la herramienta.

- Fase 3. Diseño de la herramienta de corte. La herramienta obtenida ha de tener el perfil de corte indicado en la fase 2, siendo su diseño final el de la figura 4-16.

Para diseñar la matriz correspondiente se ha tenido en cuenta que la pieza posee pestañas dobladas 90° hacia la base inferior del troquel por lo que se ha diseñado una pieza específica que sirve de guía y que además contiene la forma de la matriz de corte que se ajusta al punzón diseñado (figura 4-16).

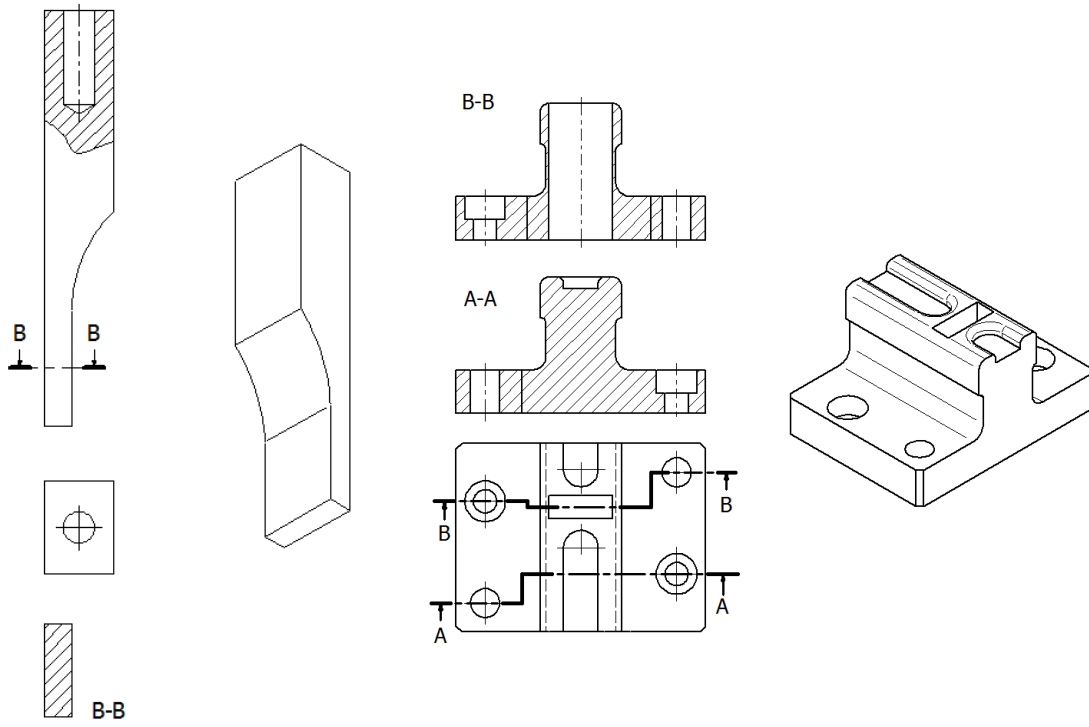


Figura 4-16: Punzón y matriz de corte.

Diseño de banda y las herramientas que lo configuran.

Definidas las herramientas, tanto normalizadas como no normalizadas, que dan forma a la banda, se representa el conjunto completo con las herramientas que lo configuran (figura 4-17).

Esta representación es de gran utilidad para conocer la viabilidad y ayudar a la construcción del troquel.

1. En primer lugar permite detectar interferencias entre las diferentes herramientas, y determinar cuántas y cuáles son las etapas libres que es preciso introducir.
2. Sirve de guía para el desarrollo y diseño de las placas del troquel.

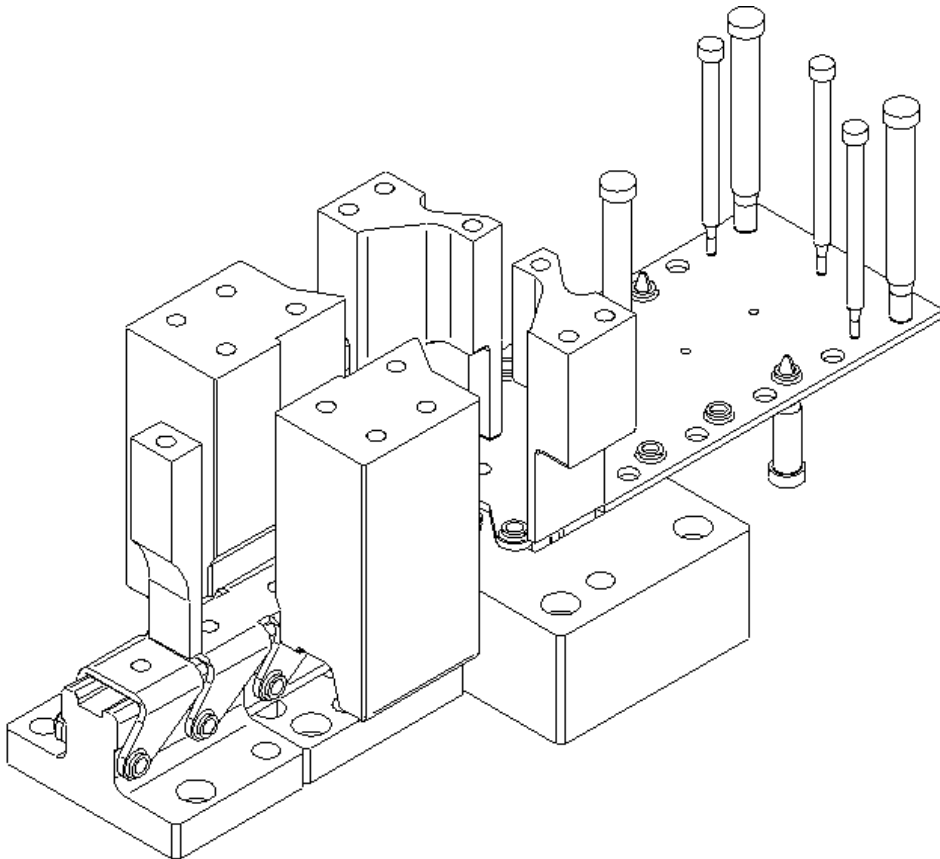


Figura 4-17: Diseño de banda y herramientas.

Paso 8. Diseño del troquel

Con el objeto de mostrar el diseño completo del troquel, una vez aplicadas las metodologías y procesos que se han desarrollado y estructurado, se lleva a cabo en el caso que se está exponiendo el diseño de los diferentes elementos constructivos del mismo con el objeto de apreciar la viabilidad de las propuestas realizadas en esta tesis.

La estructura de un troquel está compuesta por la parte inferior y la parte superior. En el caso en estudio se analizan las diferentes placas diseñadas o elegidas que componen las dos partes del troquel así como algunos de los elementos singulares presentes en el diseño.

Parte inferior.

La parte inferior está dividida en tres elementos principales:

1. Placa portamatrices.
2. Placa suplemento inferior.
3. Placa base inferior.

Placa portamatrices.

Esta placa sirve de anclaje a las matrices de las herramientas situadas en la parte superior, que son las que dan forma a la banda. El diseño realizado se muestra en la figura 4-18.

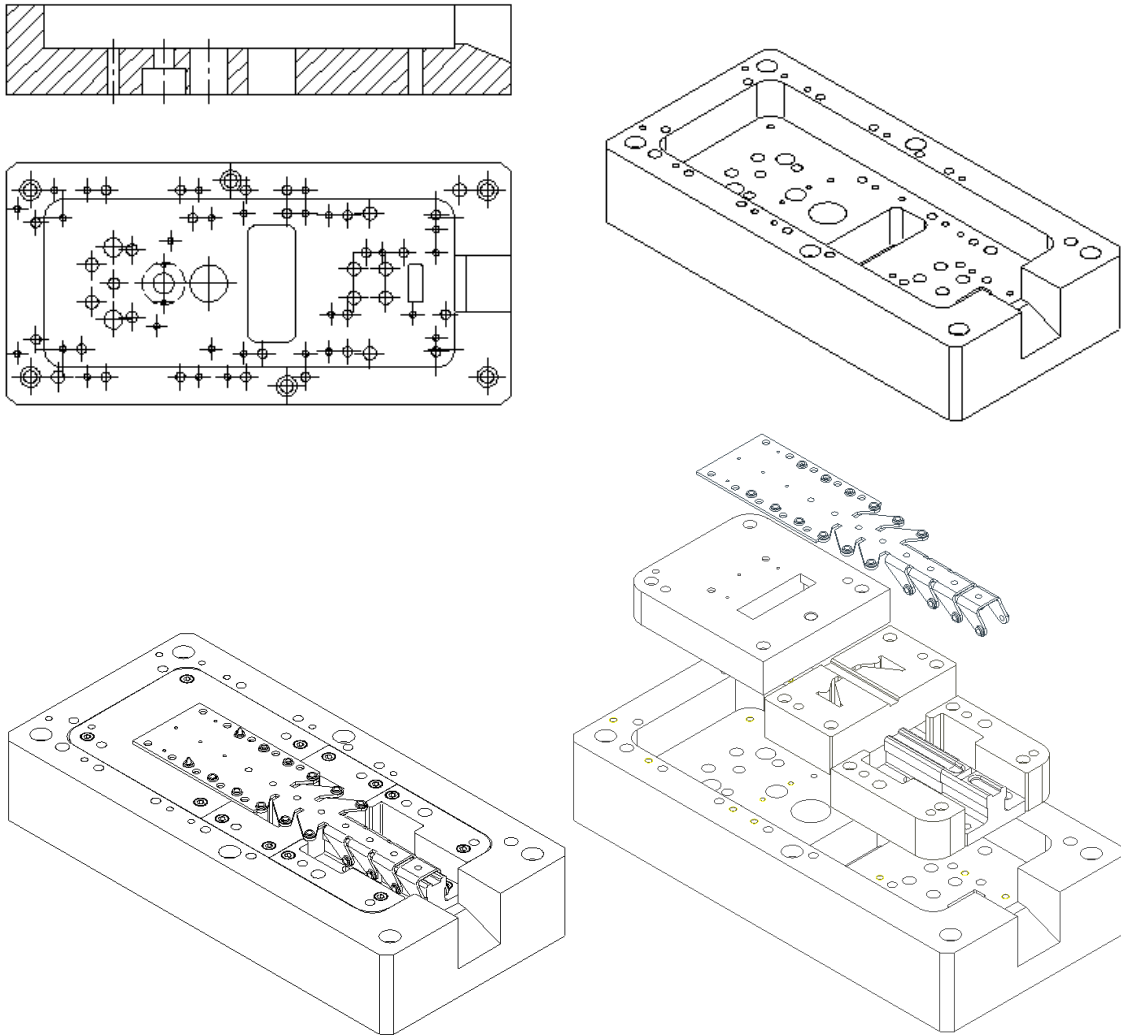


Figura 4-18: Placa portamatrices.

Placa suplemento

Esta placa (figura 4-19) se sitúa bajo la placa portamatrices y sirve de apoyo y transición con la placa base inferior, así como y de base a las columnas guía que dirigen el acoplamiento entre las dos partes del troquel. Su geometría depende principalmente de los elementos de unión, de los orificios de evacuación de la placa portamatrices y de la localización de las columnas guías.

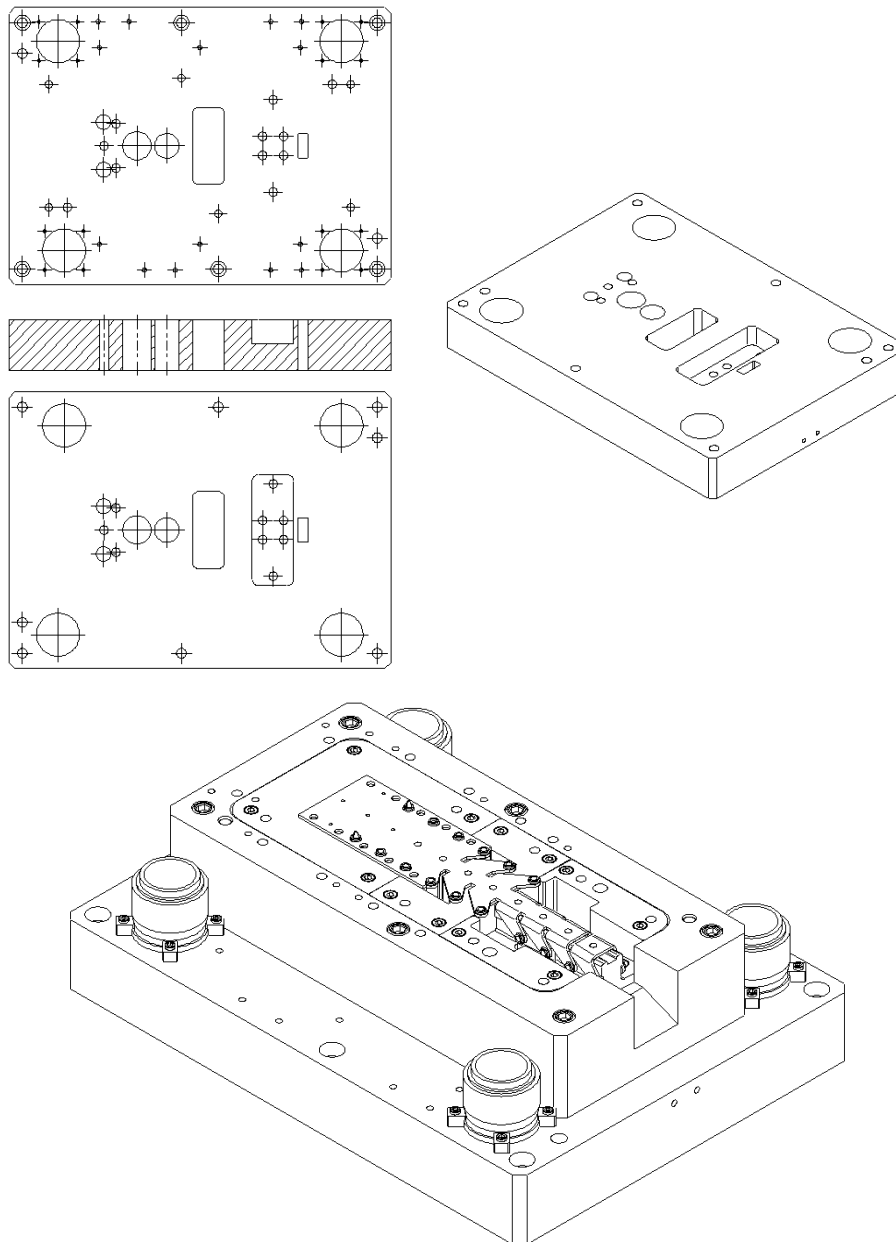


Figura 4-19: Placa suplemento.

Placa Base inferior.

Esta placa (figura 4-20) sirve de soporte a las anteriores y hace de enlace entre el troquel y la prensa, por lo que además de tener en cuenta en su diseño las características de las placas anteriores (salida de desechos, amarres...) ha de adaptarse a la prensa en la que se va a montar.

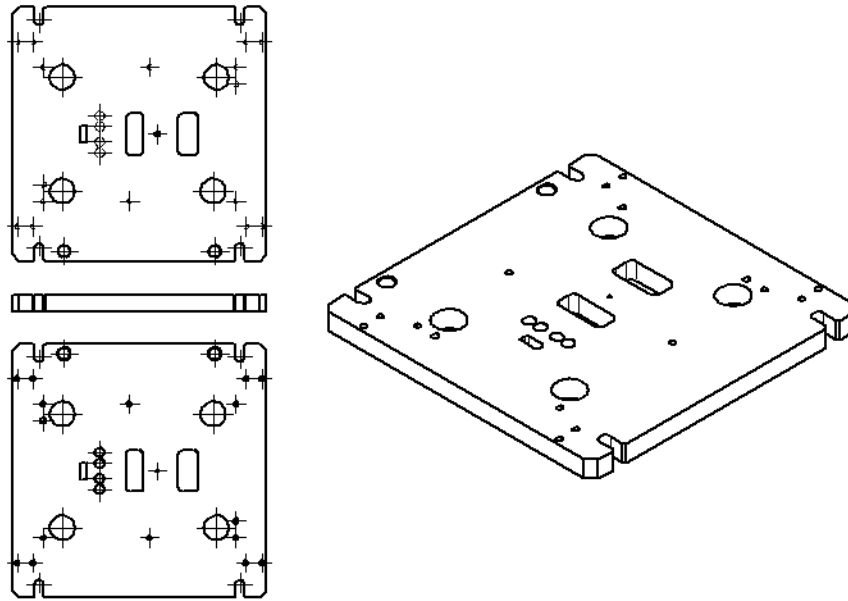


Figura 4-20: Placa base inferior.

El conjunto de los elementos así definidos configuran la parte inferior del troquel (figura 4-21).

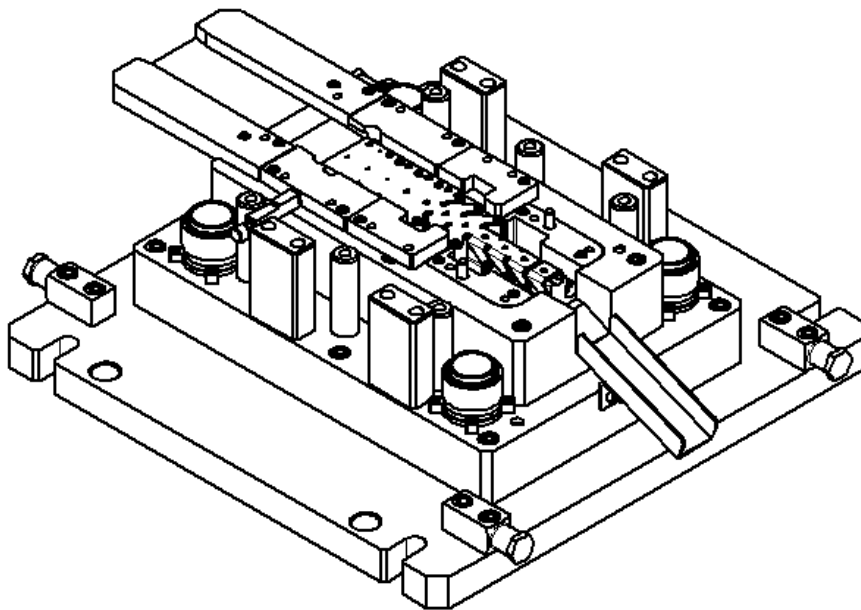


Figura 4-21: Parte inferior del troquel.

Parte Superior.

La parte superior está formada por:

1. Pisador.
2. Placa pisador.
3. Placa portamachos.
4. Sufridera.
5. Placa suplemento superior.
6. Base superior.

Pisador.

El pisador es el elemento primero entra en contacto con la banda (figura 4-22). Su función es fijarla para que las operaciones realicen con la precisión requerida, además sirve de guía para las herramientas.

En la figura 4-22 se ha representado el pisador completo. En la práctica se divide en diferentes partes para evitar la excesiva rigidez al pisar la banda y facilitar su construcción.

En cuanto a su geometría, lo más característico es que se ha de adaptar al diseño de banda realizado, para tener un pisado adecuado. Además, al servir de guía a las herramientas, hay que considerar en su diseño los orificios por las que se desplazan.

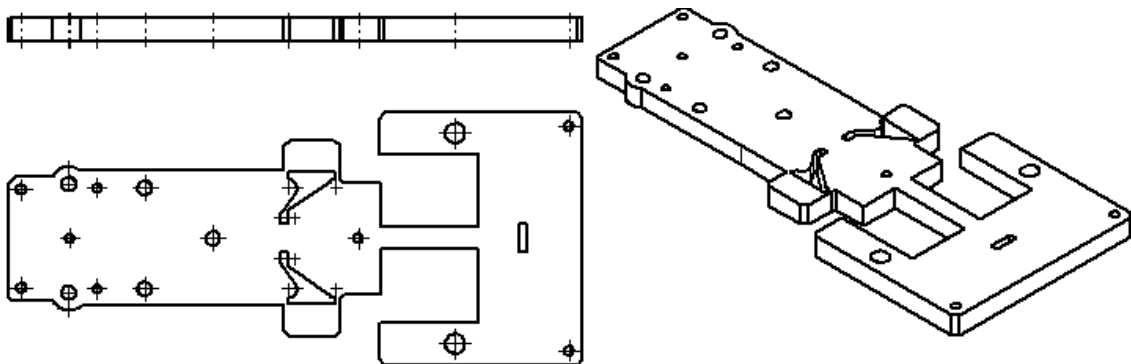


Figura 4-22: Pisador.

Placa pisador.

La placa pisador figura 4-23 sirve de soporte al pisador, en este caso pisadores ya que se ha dividido en 3 partes. En el diseño de esta placa intervienen los anclajes del pisador y las oquedades por las que pasan las herramientas. Esta placa se puede utilizar como soporte de las columnas guía como en este caso, dado su gran recorrido.

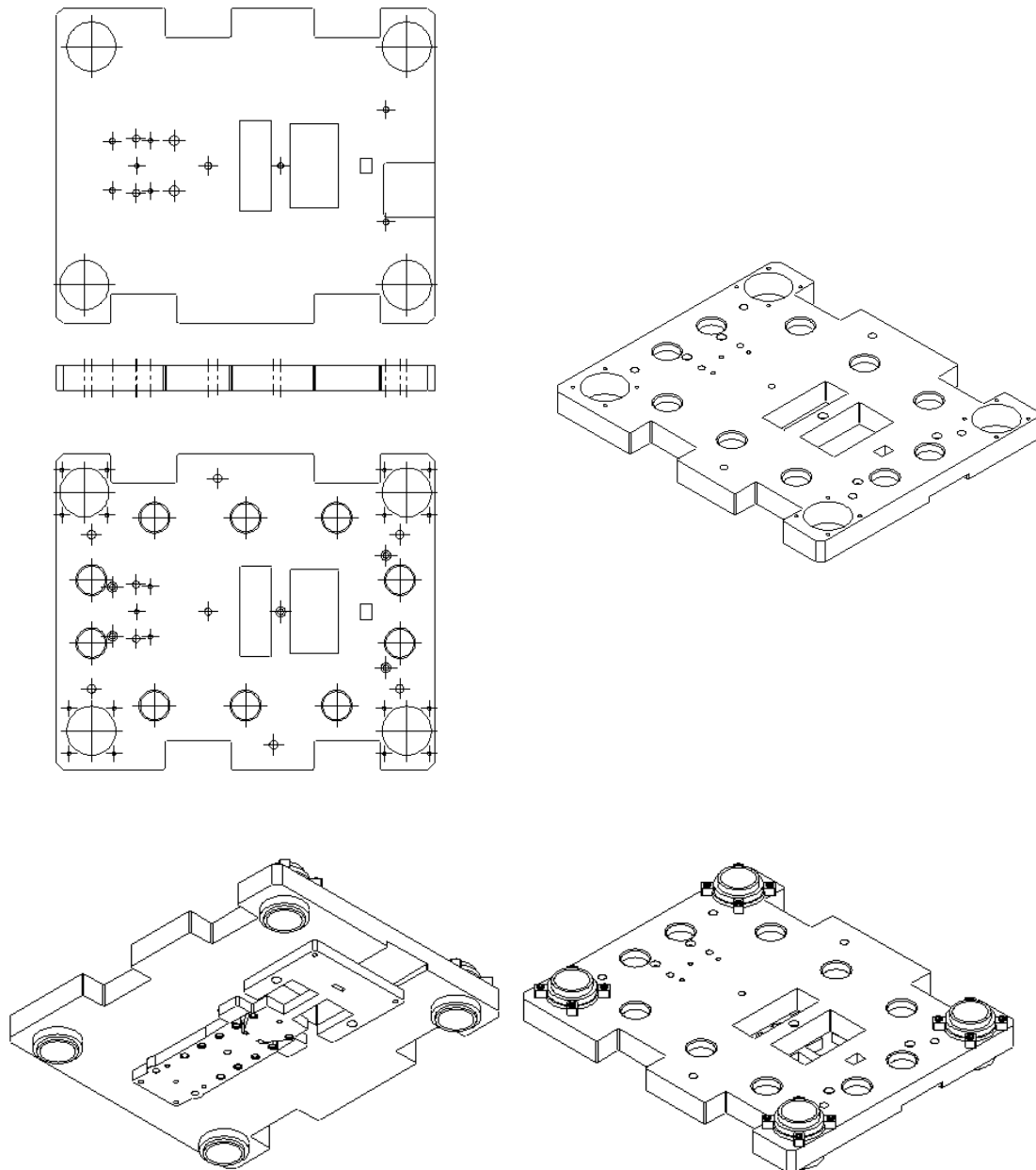


Figura 4-23: Placa pisador.

Placa portaherramientas.

La función de esta placa, es servir de anclaje a los elementos activos del troquel, esto es, las herramientas de corte, punzones, herramientas de doblado, etc. (figura 4-24).

En lo que a su geometría se refiere, ha de adaptarse a las herramientas a las que da soporte.

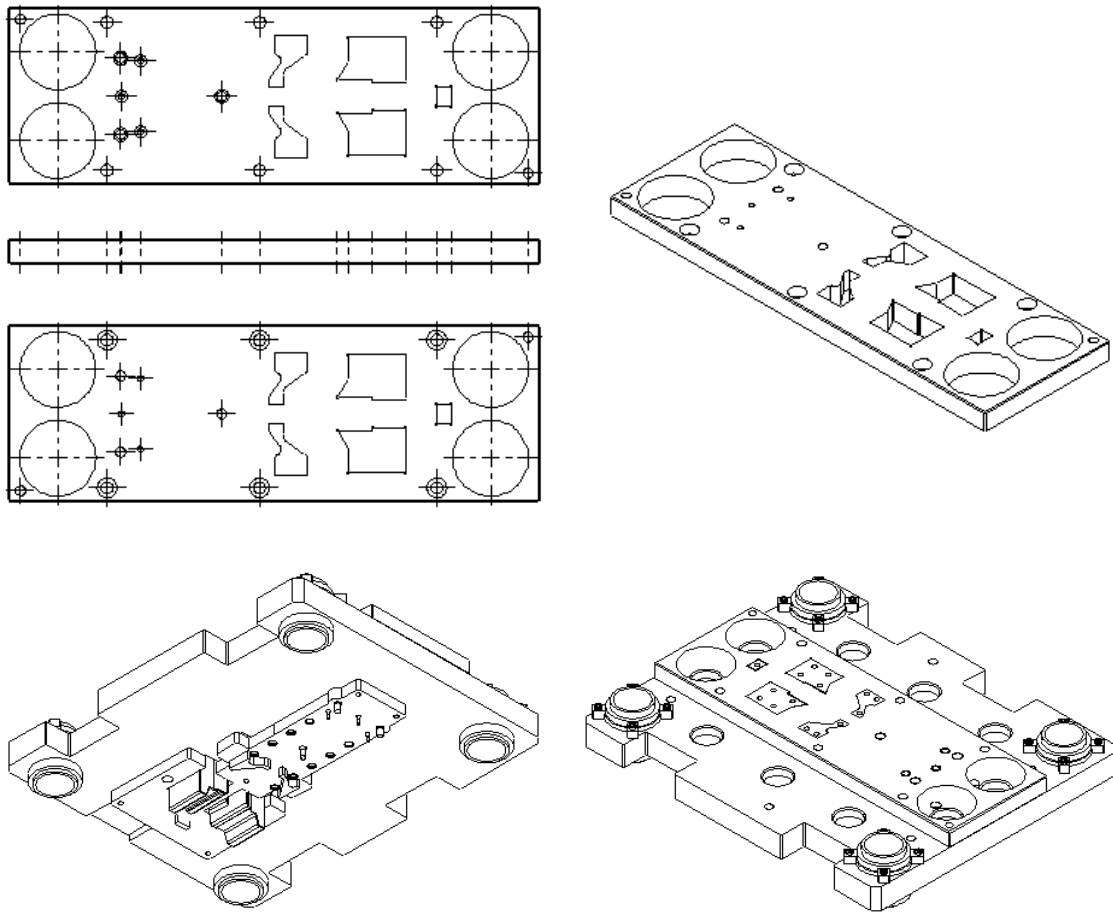


Figura 4-24: Placa herramientas.

Placa sufridera.

La placa sufridera (figura 4-25) se coloca sobre la placa portaherramientas y su función es absorber las reacciones provocadas por las herramientas de corte, punzones, abocardadores, doblado... que se producen cuando baja el troquel y actúa sobre la chapa. Dada su función esta placa es de pequeño espesor y su geometría es prácticamente similar a la placa portaherramientas.

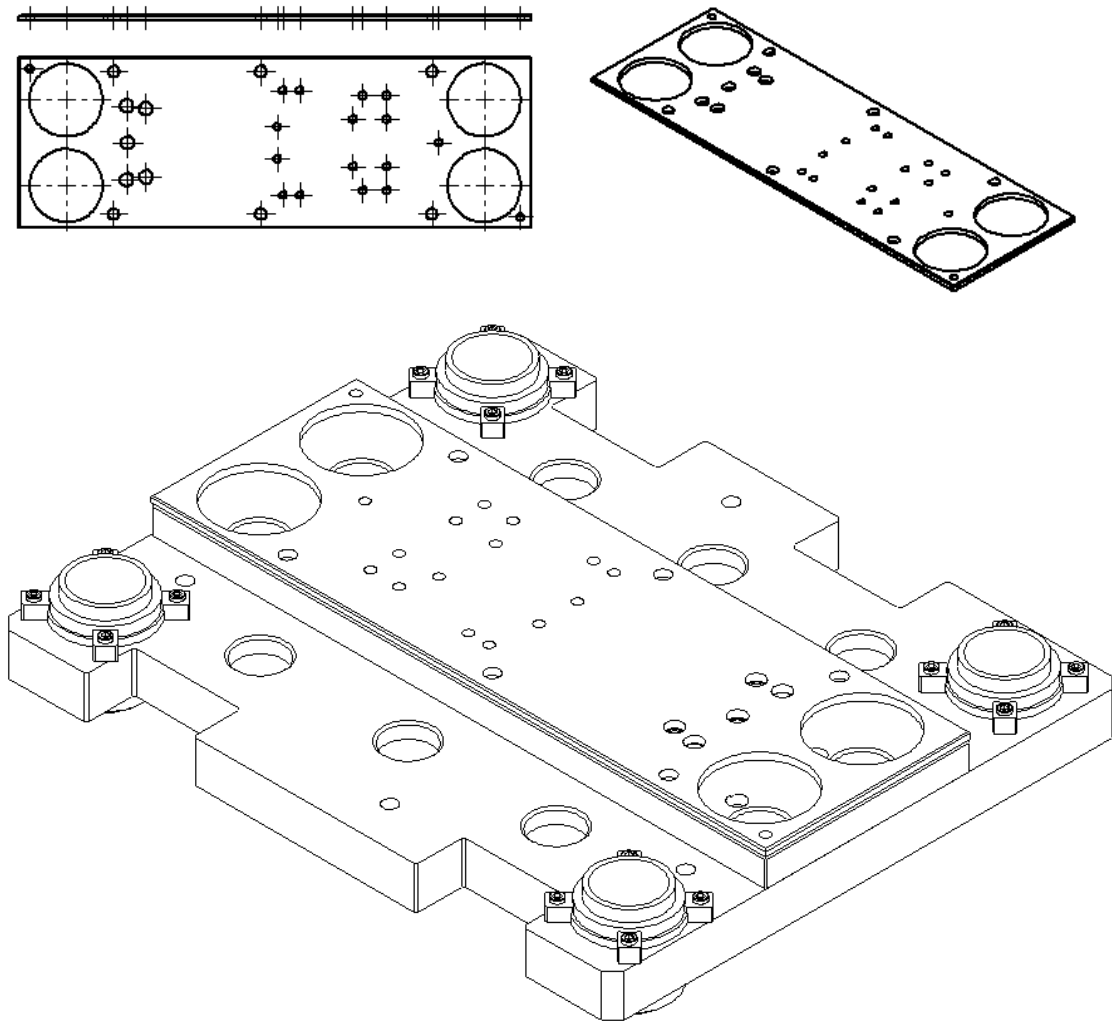


Figura 4-25: Placa sufridera.

Placa suplemento.

Análogamente a la placa suplemento inferior, sirve de transición entre la placa portaherramientas y la base superior. En este caso no se utiliza como guía de las columnas, ya que esa función ha sido relegada a la placa pisador. Está representada en la figura 4-26.

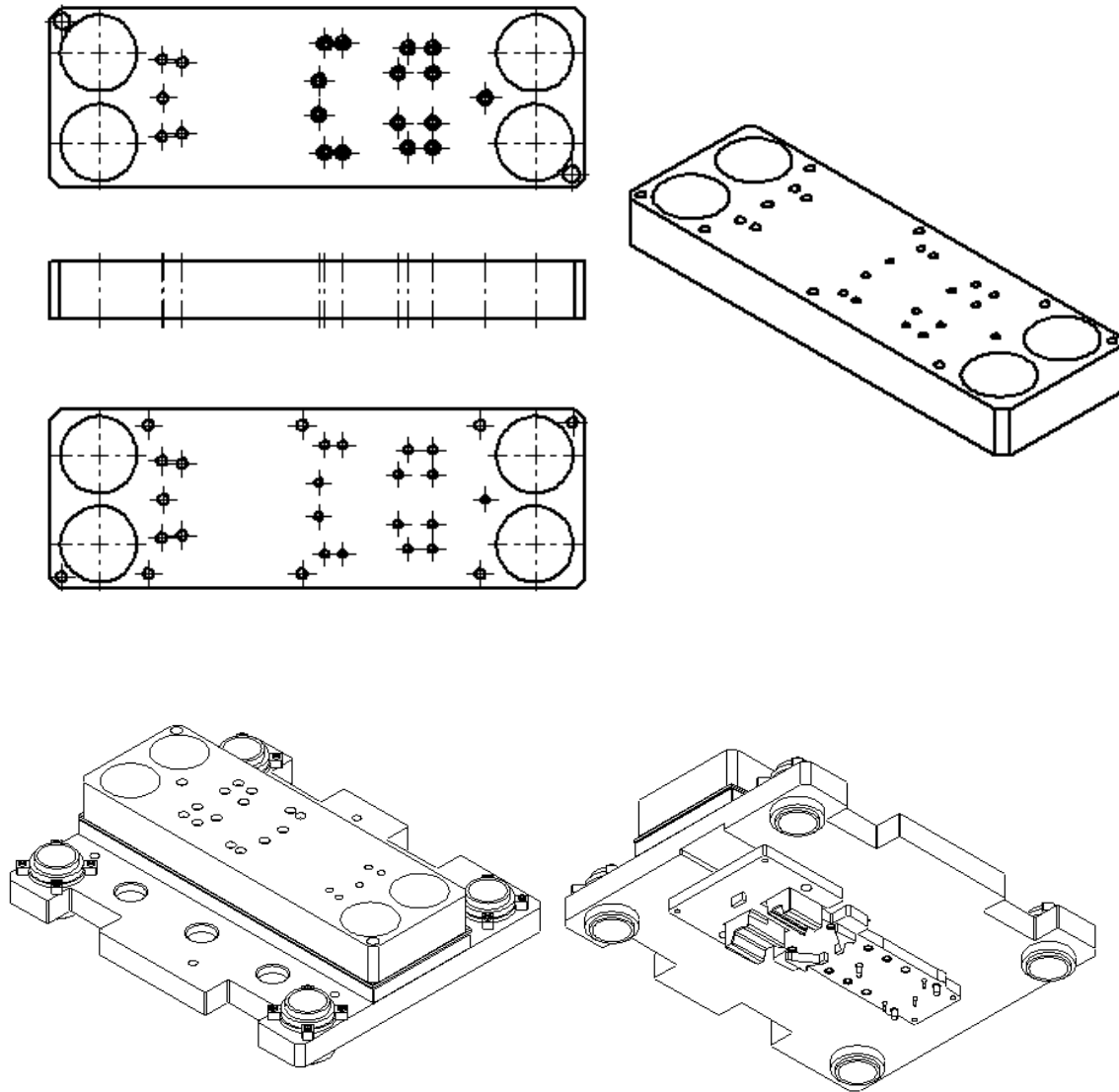


Figura 4-26: Placa suplemento.

Placa base superior.

La función de esta placa (figura 4-27) es similar a la placa base inferior: hace de enlace con la prensa y sujeta la parte superior del troquel. En su geometría intervienen los agarres con la prensa y con la placa suplemente, la colocación de los soportes de las columnas guías, etc.

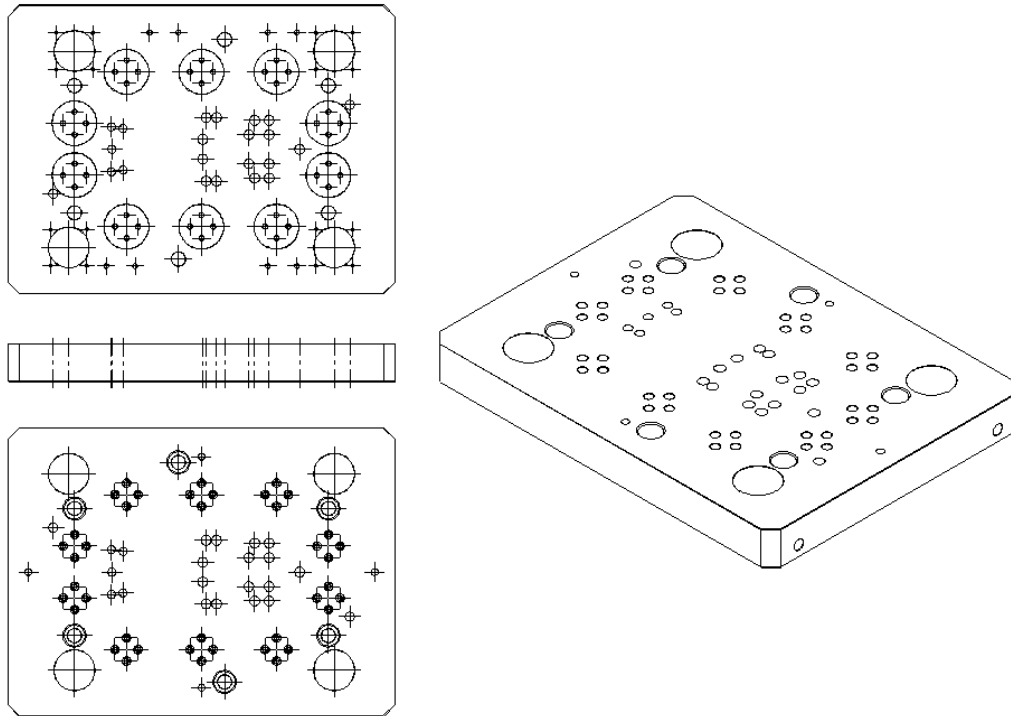


Figura 4-27: Placa base superior.

El conjunto de los elementos que se han diseñado y que constituyen la parte superior del troquel se muestran ensamblados en la figura 4-28.

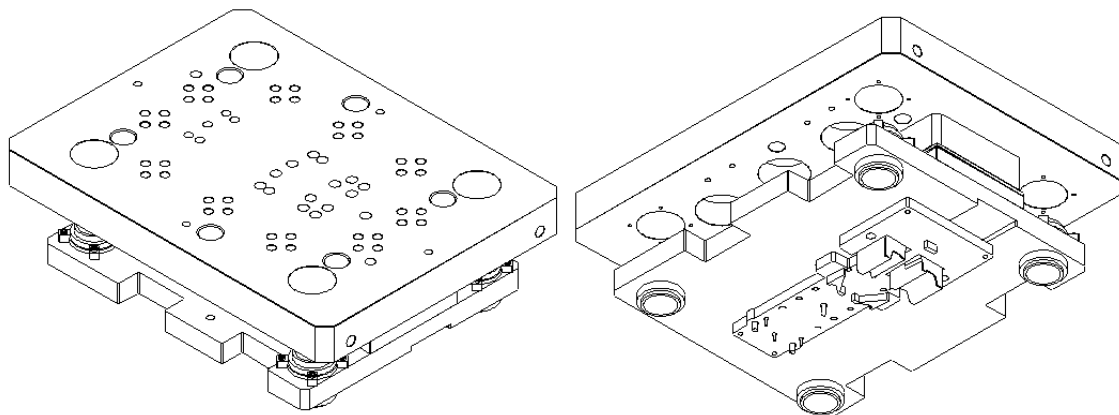


Figura 4-28: Parte superior del troquel.

Troquel para la fabricación de la bisagra.

Se presenta en las figuras 4-29 y 4-30 el diseño completo del troquel correspondiente a la bisagra (figura 4-1) tras analizar los elementos más característicos del mismo. Se han incluido todos los elementos que forman parte del troquel, no solamente los analizados anteriormente, tales como cáncamos, columnas guía, rampa de salida, resortes...

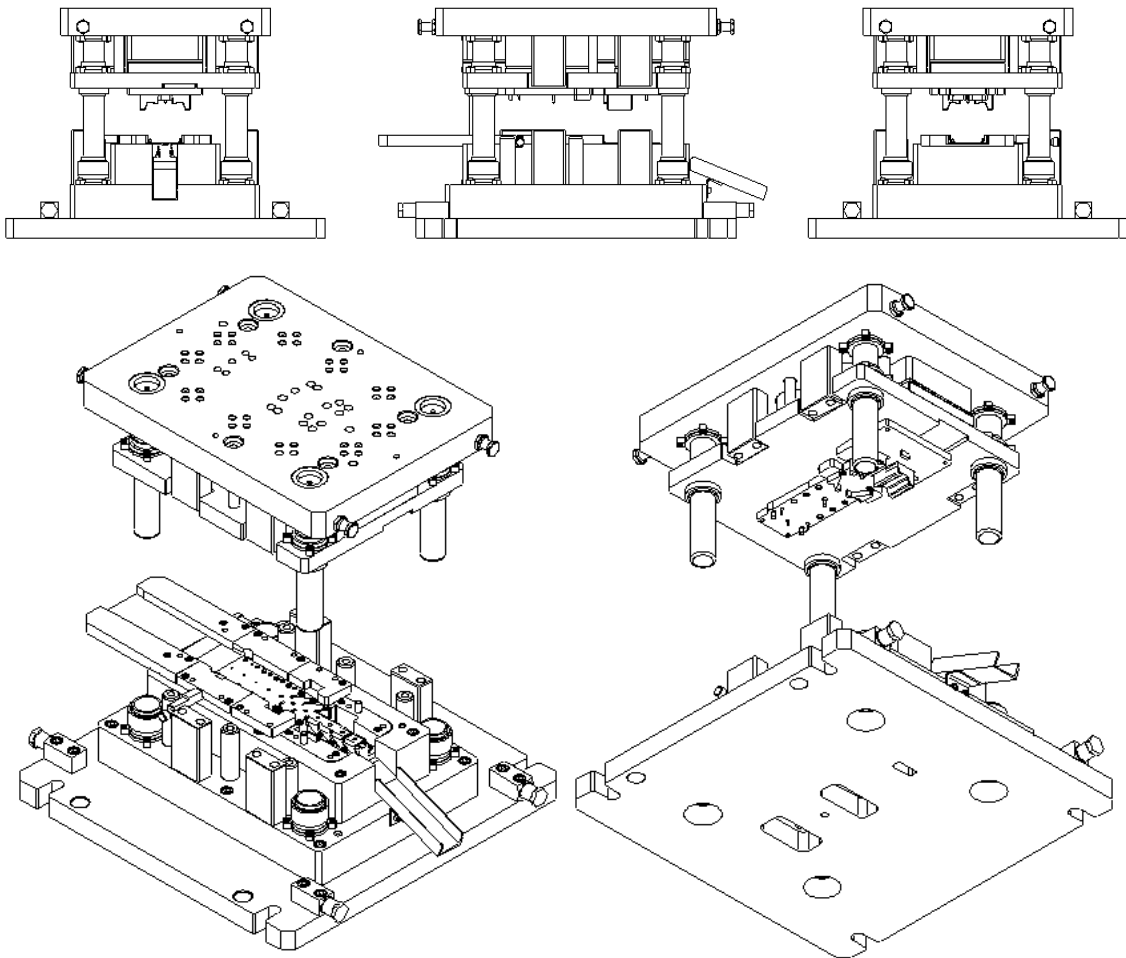


Figura 4-29: Diferentes vistas del troquel.

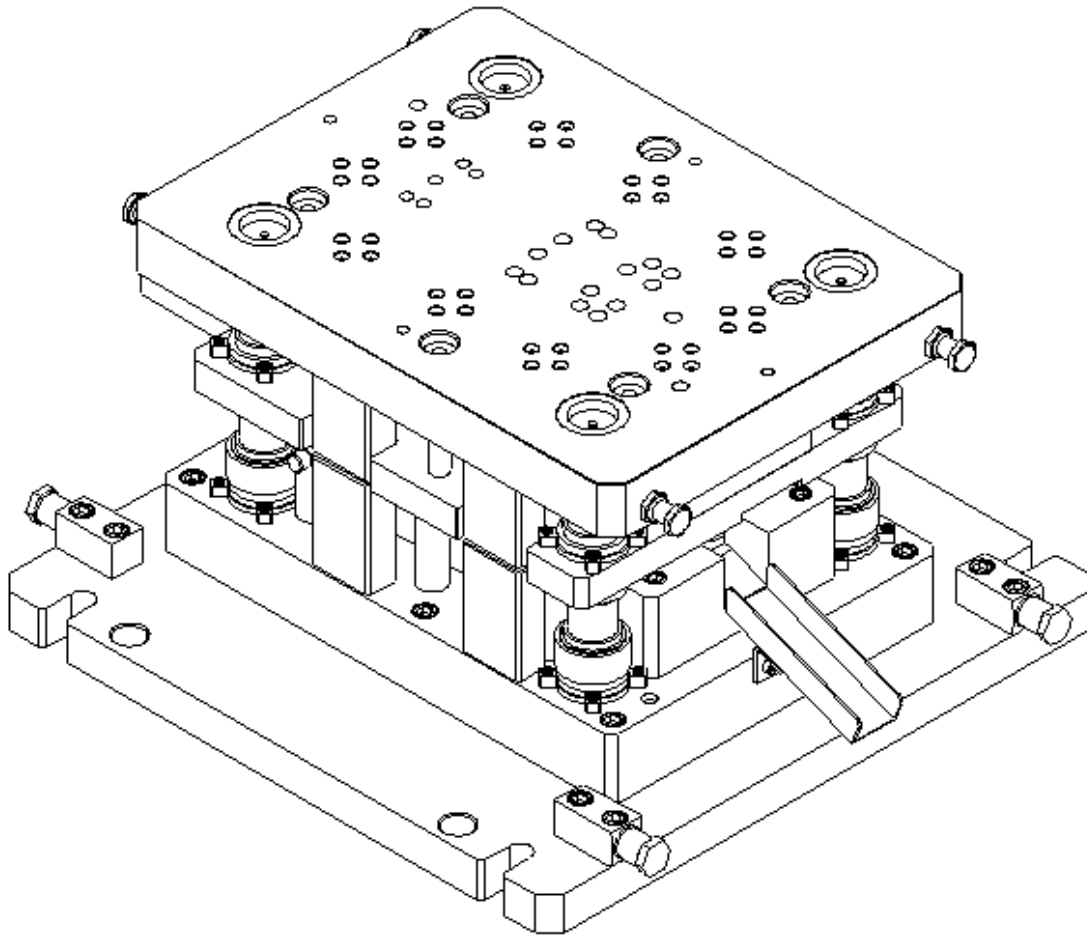


Figura 4-30: Perspectiva del troquel.

4.3. SOPORTE MUELLE TENSOR.

El soporte de un muelle tensor (figura 4-31) se utiliza en la sujeción de un tensor bastidor con muelle situado en el chasis de un ascensor.

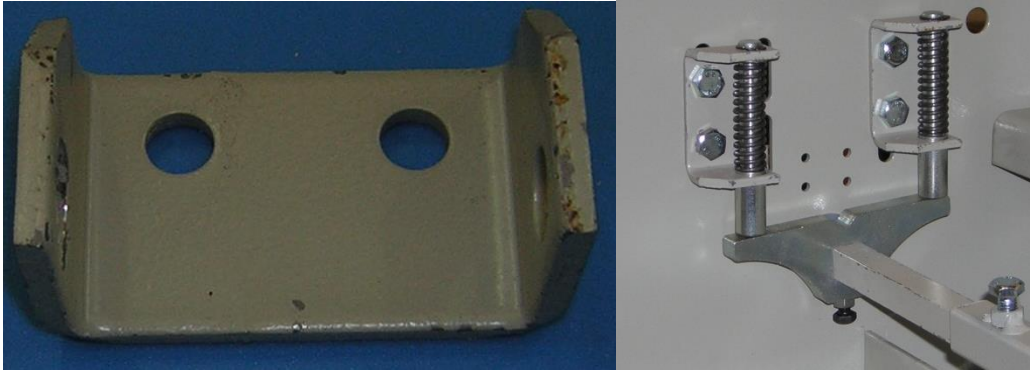


Figura 4-31: Soporte de muelle tensor.

Paso 1. Identificación de componentes.

Los componentes geométricos que definen la pieza dato (figura 4-31), son los que se indican en la figura 4-32 y en la tabla 4-3:

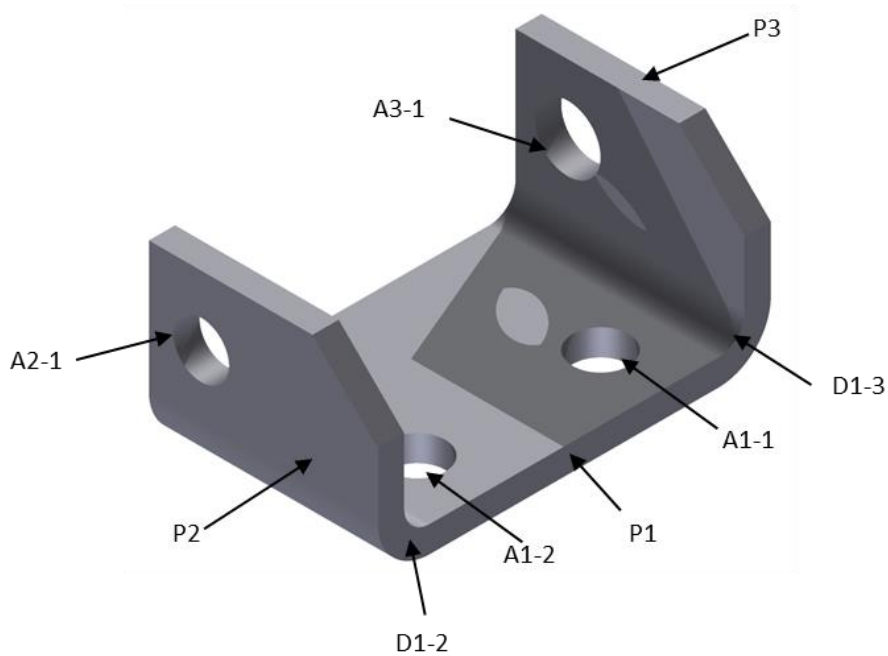


Figura 4-32: Componentes del soporte.

Tabla 4-3: Componentes del soporte.

Elementos planos	P1	Plano intermedio
	P2	Plano lateral
	P3	Plano lateral
Doblez	D1-2	Doblez que enlaza el plano 1 con el 2
	D1-3	Doblez que enlaza el plano 1 con el 3
Punzonados	A1-1	Punzonado situado en el plano 1
	A1-2	Punzonado situado en el plano 1
	A2-1	Punzonado situado en el plano 2
	A3-1	Punzonado situado en el plano 3

Paso 2. Diagrama relacional.

Se procede a obtener el diagrama relacional (figura 4-33). Como elemento base en este paso se asigna el plano P1, debido a la simetría de la pieza objeto de estudio.

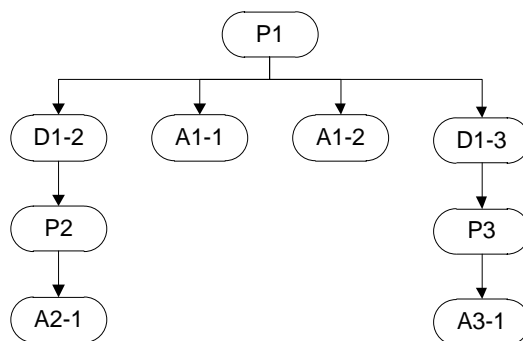


Figura 4-33: Diagrama relacional del soporte.

Paso 3. Asignación de operaciones a cada componente.

Se asigna a cada uno de los elementos del diagrama relacional las operaciones correspondientes para obtenerlo: a los planos (P) una operación de corte (OC), a los doblados (D) una operación de doblado (OD) y a los punzonados (A) una operación de punzonado (OP).

El diagrama relacional queda definido en la figura 4-34.

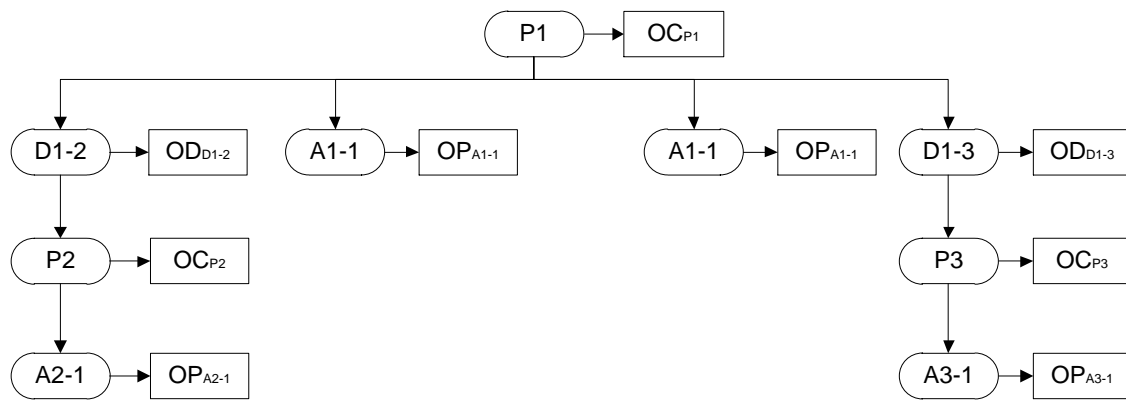


Figura 4-34: Diagrama relacional y de operaciones.

Paso 4. Número de etapas. Secuencia de operaciones.

Se redistribuye el diagrama situando las operaciones en su nivel correspondiente según su posición en cada una de las ramas (figura 4-35).

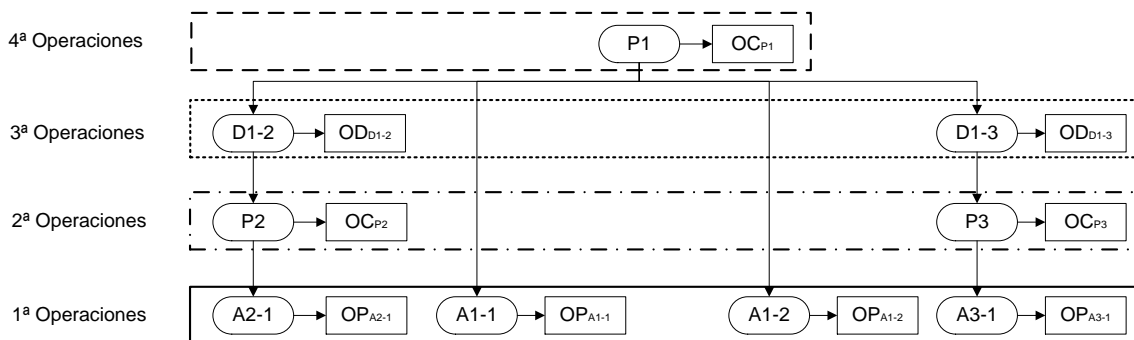


Figura 4-35: Definición de las etapas.

Según se observa el número mínimo de operaciones es cuatro según se indica a continuación:

1ª Etapa: Realización de los 4 punzonados. Operaciones OP_{A1-1} , OP_{A1-2} , OP_{A2-1} , OP_{A3-1} .

2ª Etapa: Corte de las pestañas laterales. Operaciones OC_{P2} , OC_{P3} .

3ª Etapa: Doblado de las pestañas. Operaciones OD_{D1-2} , OD_{D1-3} .

4ª Etapa: Corte del plano base, o lo que es lo mismo, separación de la pieza de la banda. Operación OD_{P1} .

El diseño de banda resultante se muestra en la figura 4-36.

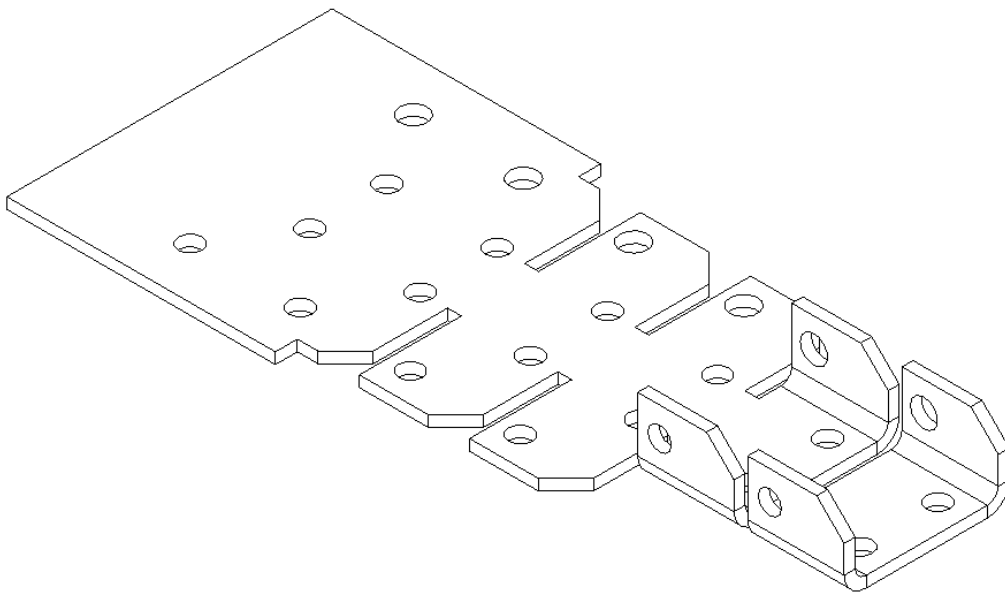


Figura 4-36: Diseño de banda inicial.

Paso 5. Diseño de herramientas no normalizadas.

Las herramientas que se necesita diseñar son las siguientes (figura 4-37):

1. Herramientas de corte de las pestañas laterales.
2. Herramientas de doblado de las pestañas laterales.
3. Herramienta de separación de la pieza de la banda.

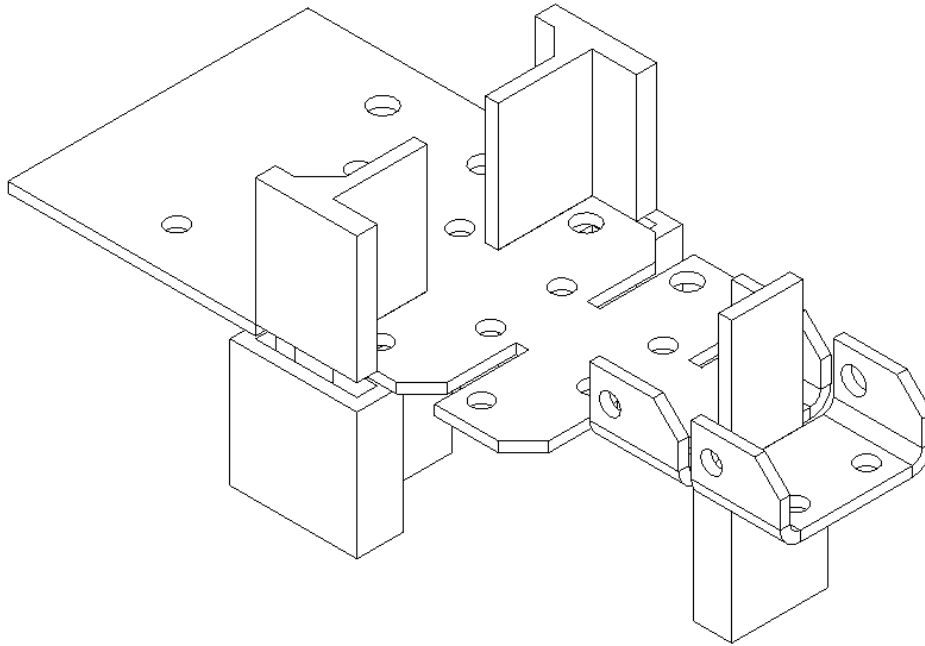


Figura 4-37: Herramientas de corte no normalizadas.

Paso 6. Modificación de la secuencia de operaciones.

En los pasos anteriores se ha mostrado el diseño de banda obtenido siguiendo la metodología expuesta, sin incluir modificaciones. En este caso, atendiendo a las necesidades de la pieza, se exige en las especificaciones de los agujeros de las pestañas laterales una precisión mayor a la que se obtiene según el proceso expuesto. Esto determina que dichos agujeros se han de realizar cuando las pestañas estén dobladas, obteniendo así mejores tolerancias de fabricación.

Por lo tanto, se modifica el diagrama para cumplir con las especificaciones. La modificación consiste en situar las operaciones que generan dichos agujeros en un nivel superior a las operaciones que generan el doblado. En consecuencia se ha añadido una nueva etapa a las obtenidas anteriormente.

La nueva secuencia de operaciones (figura 4-38) es:

- 1ª Etapa: Realización de los punzonados situados en el plano P_1 . Operaciones OP_{A1-1} , OP_{A1-2} .

2ª Etapa: Corte de las pestañas laterales. Operaciones OC_{P2} , OC_{P3} .

3ª Etapa: Doblado de las pestañas. Operaciones OD_{D1-2} , OD_{D1-3} .

4ª Etapa: Punzonado de los agujeros laterales. Operaciones OP_{A2-1} , OP_{A3-1} .

5ª Etapa: Corte del plano base, o lo que es lo mismo, separación de la pieza de la banda. Operación OD_{P1} .

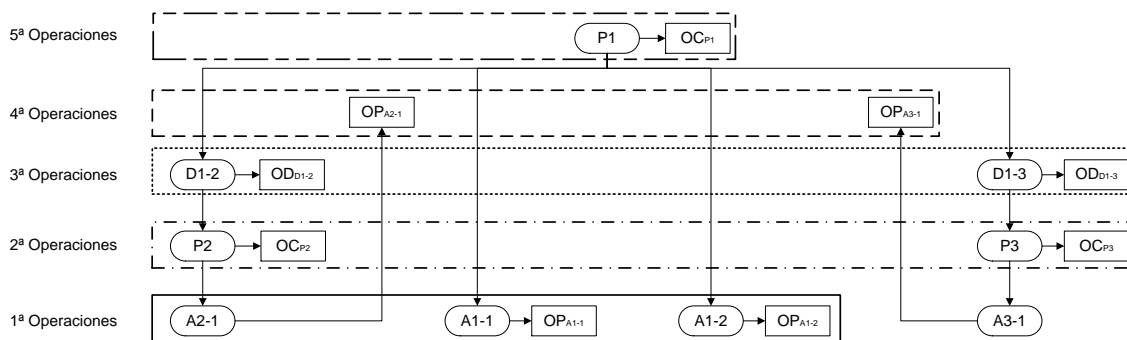


Figura 4-38: Diagrama modificado.

Si bien el diseño de banda ha variado (figura 4-39), las herramientas diseñadas no se modifican ya que las operaciones son las mismas (figura 4-40).

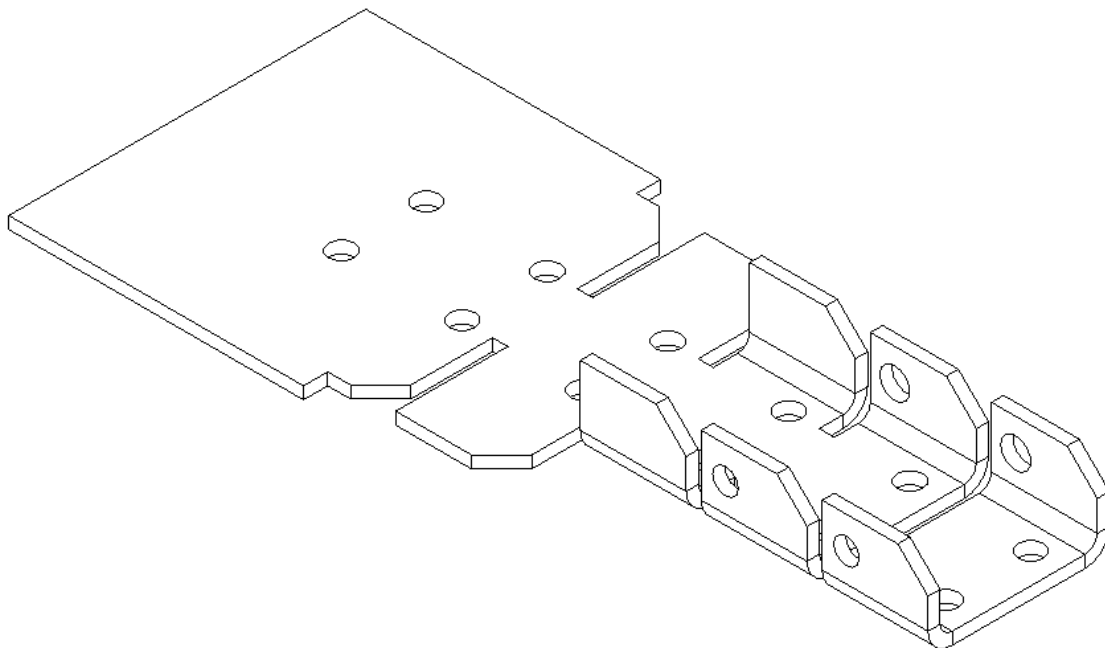


Figura 4-39: Diseño de banda modificado.

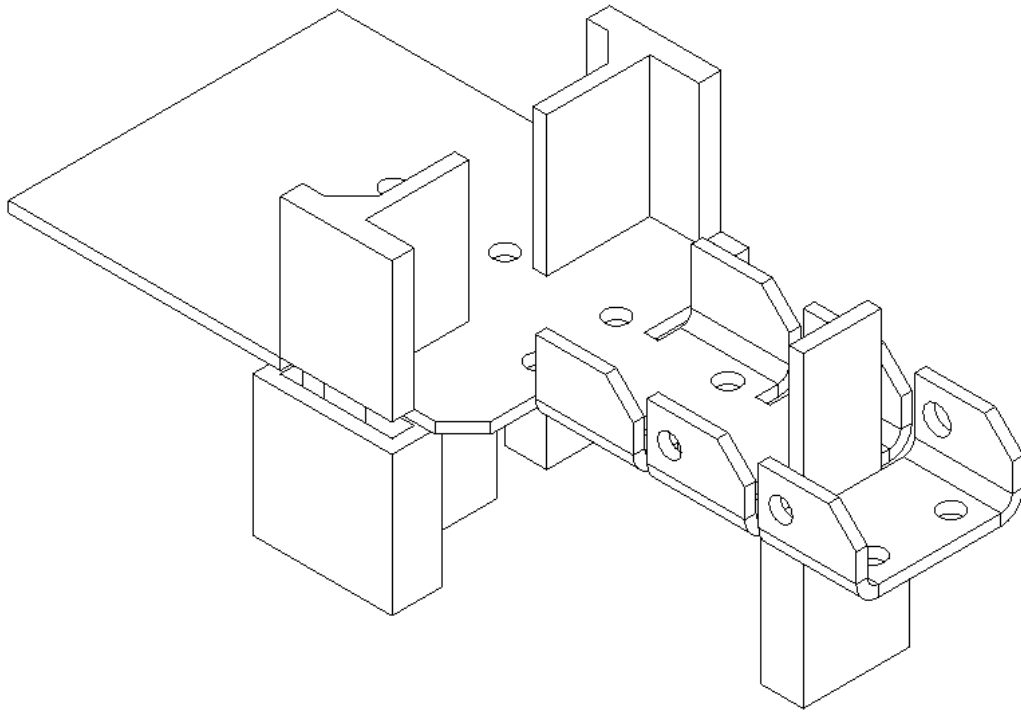


Figura 4-40: Herramientas no normalizadas en el nuevo diseño de banda.

4.4. PIEZA 3

La siguiente pieza objeto de estudio se expone en la figura 4-41. Aunque geoméricamente se trata de una pieza sencilla, desde el punto de vista del conformado está compuesta por numerosos elementos. Su principal peculiaridad respecto a las anteriores es la inclusión de un elemento nuevo: la embutición (E_{1-1}).

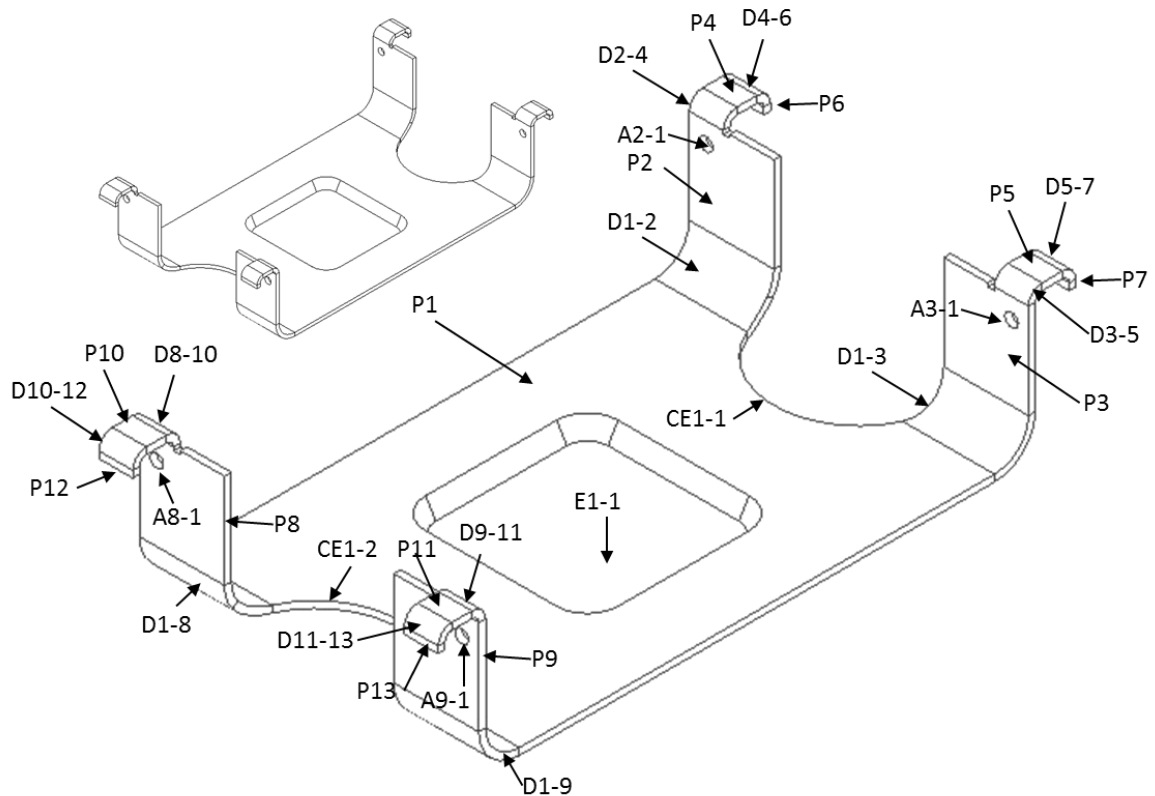


Figura 4-41: Pieza n° 3

Paso 1. Identificación de componentes y diagrama relacional.

Los componentes que configuran la pieza se exponen en la figura 4-41. De acuerdo con ello se obtiene el diagrama relacional expuesto en la figura 4-42, para lo cual se ha tomado como elemento de partida el plano P_1 , dado que genera el diagrama con las ramas de menor longitud lo que equivale a un menor número de etapas, así como la condición de simetría de la pieza con respecto un plano perpendicular a esté también aconseja su elección como elemento base.

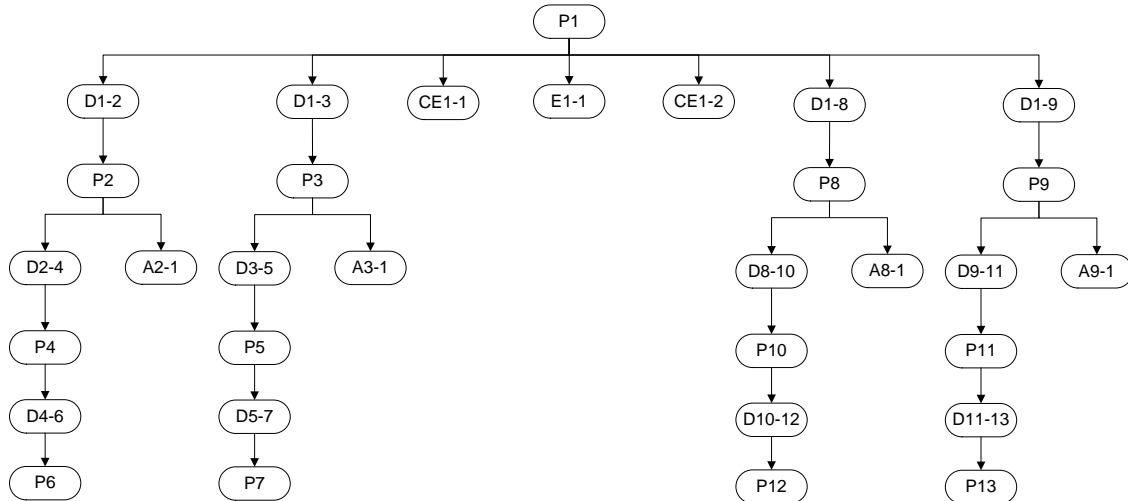


Figura 4-42: Diagrama relacional de la pieza 3.

Paso 2. Asignación de operaciones y cálculo previo del número de etapas del troquel.

Realizado el diagrama relacional se asigna las operaciones que generan cada uno de los elementos de la pieza, según se muestra en la figura 4-43.

La ordenación del diagrama, situando los elementos en función de su posición en cada una de las ramas (figura 4-44), proporciona el cálculo previo del número de etapas y las operaciones que se realizan en cada uno de ellos. Las etapas son las siguientes:

1ª Etapa: Punzonado de los agujeros (OP_{A2-1} , OP_{A3-1} , OP_{A8-1} , OP_{A9-1}), corte de las pestañas de los extremos (OC_{P6} , OC_{P7} , OC_{P12} , OC_{P13}), cortes exteriores en el plano P1 (OP_{CE1-1} , OP_{CE1-2}) y operación de embutición (OE_{E1-1}).

2ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D4-6} , OD_{D5-7} , OD_{D10-12} , OD_{D11-13} .

3ª Etapa: Cortes pestañas: OC_{P4} , OC_{P5} , OC_{P10} , OC_{P11} .

4ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D2-4} , OD_{D3-5} , OD_{D8-10} , OD_{D9-11} .

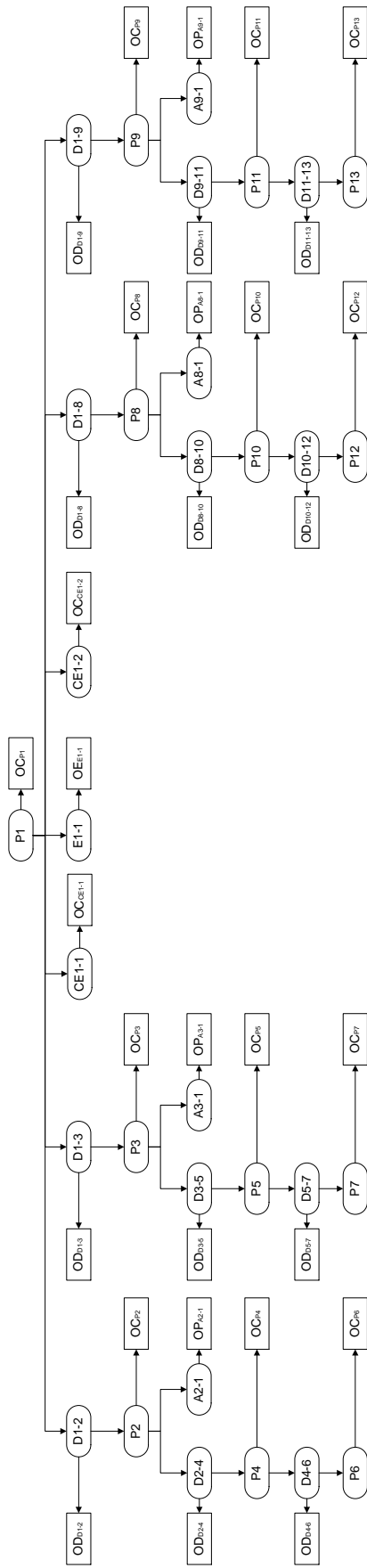


Figura 4-43: Diagrama de operaciones.

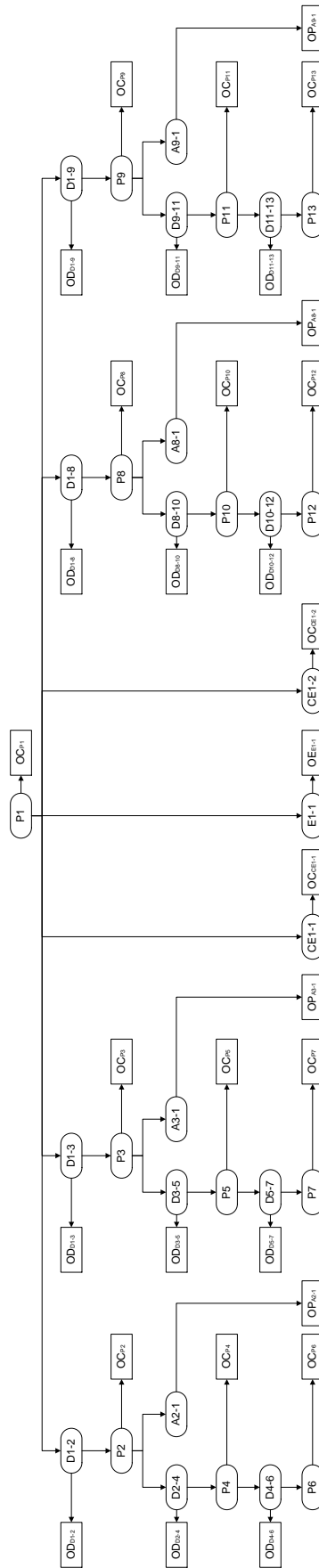


Figura 4-44: Diagrama de operaciones ordenado.

5ª Etapa: Cortes pestañas: OC_{P2} , OC_{P3} , OC_{P8} , OC_{P9} .

6ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D1-2} , OD_{D1-3} , OD_{D1-8} , OD_{D1-9} .

7ª Etapa: Corte del plano base y de separación de la banda: OC_{P1} .

Paso 3. Modificación y reorganización de diagrama.

A la vista del resultado obtenido se observa que en la 1ª etapa hay un gran número de operaciones por lo que es necesario distribuirlas en más etapas para evitar interferencias entre herramientas y obtener un mejor resultado.

Dadas las características de dichos elementos es conveniente hacer varias puntualizaciones a la hora de modificar el diagrama:

- Las operaciones del punzonado de los agujeros se realizan en una sola etapa, que será la inicial, dado que al ser de pequeño diámetro no resultan afectadas por la operación de embutición.
- La operación de embutición se realiza en la segunda etapa, antes de los cortes, para que de esta manera su geometría no resulte afectada por la deformación plástica generada en la embutición.
- Dada la geometría de la pieza, se ha decidido realizar con una sola herramienta y por lo tanto en una sola etapa, los cortes que generan las pestañas de los extremos (OC_{P6} , OC_{P7} , OC_{P12} , OC_{P13} ; OC_{P4} , OC_{P5} , OC_{P10} , OC_{P11}) y los cortes exteriores correspondientes al plano 1 (OP_{CE1-1} , OP_{CE1-2}).

Las etapas quedan definidas de la siguiente forma (figura 4-46):

1ª Etapa: Punzonado de los agujeros (OP_{A2-1} , OP_{A3-1} , OP_{A8-1} , OP_{A9-1}), corte de las pestañas de los extremos (OC_{P6} , OC_{P7} , OC_{P12} , OC_{P13}), cortes exteriores en el plano P1 (OP_{CE1-1} , OP_{CE1-2}) y operación de embutición (OE_{E1-1}).

2ª Etapa: Operación de embutición: OE_{E1-1} .

3ª Etapa: Corte de las pestañas de los extremos ($OCP_6, OCP_7, OCP_{12}, OCP_{13}$), cortes exteriores en el plano P1 (OP_{CE1-1}, OP_{CE1-2}) y cortes de las pestañas ($OC_{P4}, OC_{P5}, OC_{P10}, OC_{P11}$).

4ª Etapa: Operaciones de doblado: $OD_{D4-6}, OD_{D5-7}, OD_{D10-12}, OD_{D11-13}$.

5ª Etapa: Operaciones de doblado: $OD_{D2-4}, OD_{D3-5}, OD_{D8-10}, OD_{D9-11}$.

6ª Etapa: Cortes pestañas: $OC_{P2}, OC_{P3}, OC_{P8}, OC_{P9}$.

7ª Etapa: Operaciones de doblado: $OD_{D1-2}, OD_{D1-3}, OD_{D1-8}, OD_{D1-9}$.

8ª Etapa: Corte del plano base y separación de la banda: OC_{P1} .

La modificación del diagrama, añadiendo una etapa más al diseño previo, permite realizar las operaciones de la 2ª etapa con una sola herramienta, simplificando el diseño del troquel y mejorando la distribución de las operaciones. En la figura 4-45 se presenta el diseño de banda correspondiente a dicha secuencia de operaciones.

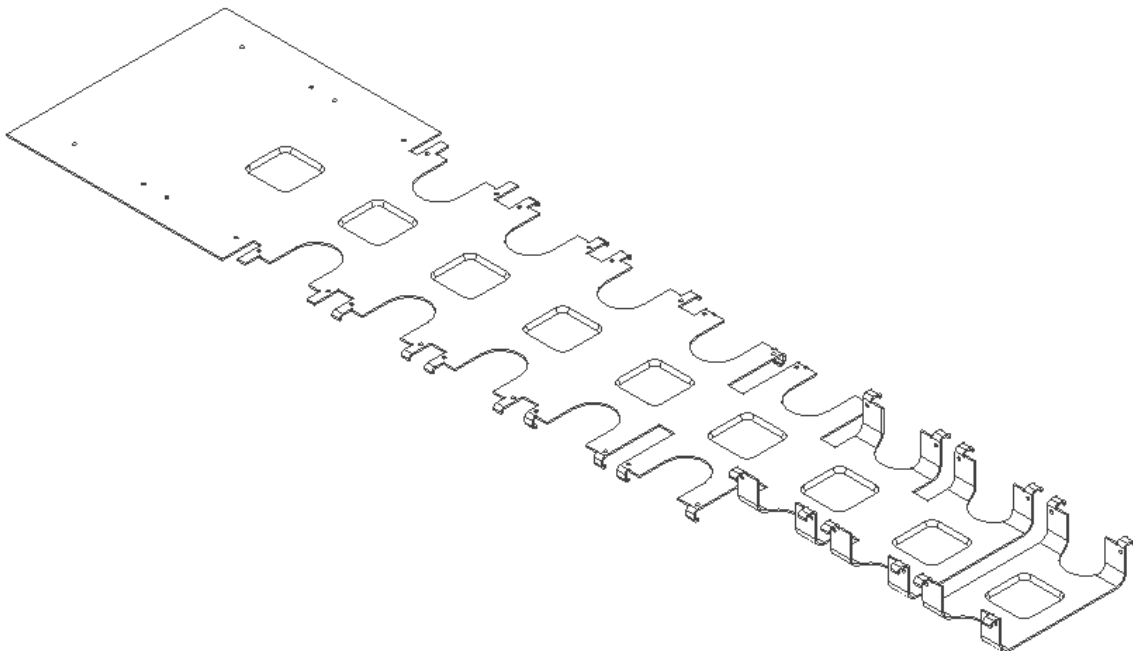


Figura 4-45: Diseño de banda final.

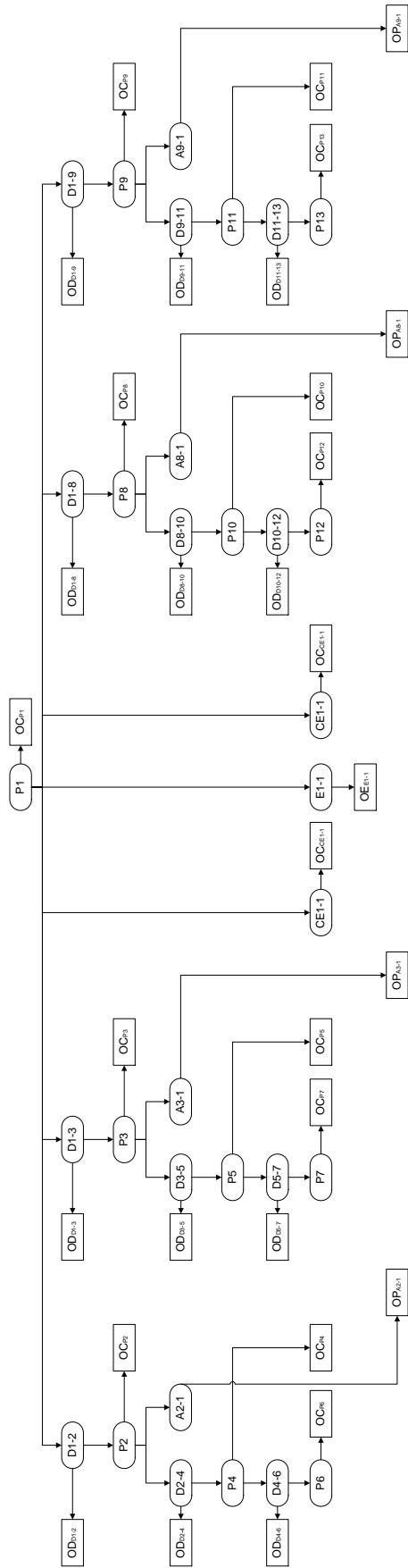


Figura 4-46: Diagrama modificado.

Paso 4. Diseño de herramientas no normalizadas.

Una vez definido el diseño de banda se determinan las herramientas de corte no normalizadas que se han de diseñar. El primer paso consiste en determinar los perfiles que han de tener dichas herramientas. En la figura 4-47 se observan los perfiles de las herramientas que se han de diseñar (figura 4-48). Como elemento más representativo, ya comentado en el apartado anterior, está la herramienta que realiza el corte en la 3ª etapa.

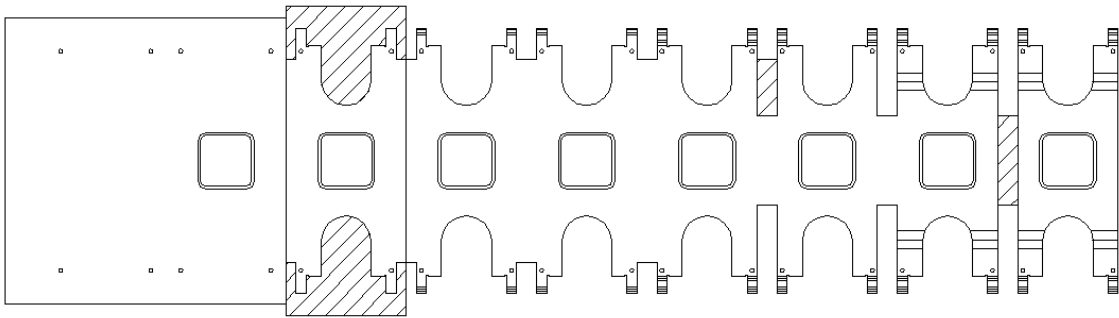


Figura 4-47: Perfiles de las herramientas de corte.

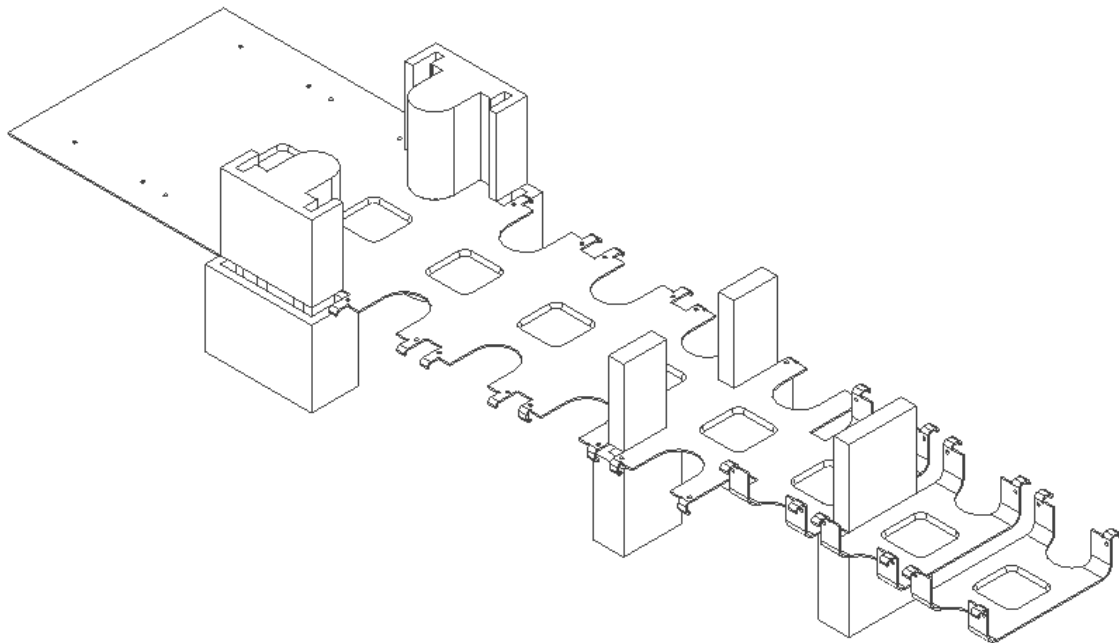


Figura 4-48: Herramientas diseñadas.

4.5. PIEZA 4

La pieza analizada se expone en la figura 4-49. Se trata de una pieza simétrica cuya diferencia principal con las anteriores radica en la existencia de un elemento de corte interno (CI₅₋₁) que afecta a varios elementos, tanto planos como doblados, y no a solamente a uno.

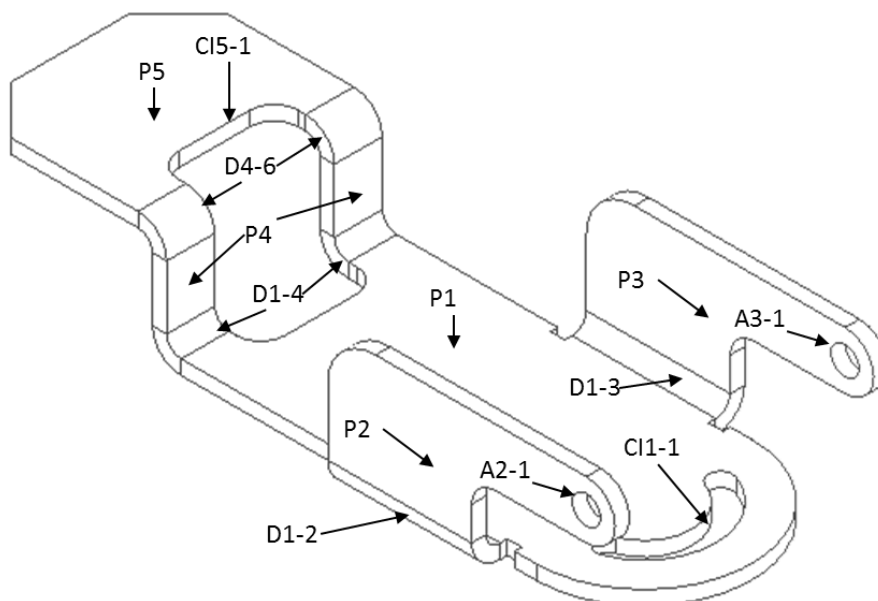


Figura 4-49: Pieza 4.

Paso 1. Identificación de componentes y diagrama relacional.

Los elementos que configuran la pieza se exponen la figura 4-49. Como elemento base se ha elegido el plano P1 dada la condición de simetría de la pieza y principalmente a que genera el diagrama que mayor número de ramas, que equivale a un menor número de operaciones. El diagrama obtenido se muestra en la figura 4-50.

El elemento de corte interior CI₅₋₁ (elemento secundario) está relacionado con los siguientes elementos básicos: P1, P4 y P5 (elementos primarios) y D1-4 y D4-5 (elementos de unión). Para determinar el diagrama relacional, al ser un elemento secundario o subordinado de otro, solo puede depender de un único elemento primario. Por tanto, a efectos de obtención del diagrama, este tipo de elementos secundarios que están vinculados a varios elementos básicos se consideran dependientes solamente de

uno de ellos, siendo conveniente que sea el más alejado del elemento base en el diagrama. En este caso depende del plano P5.

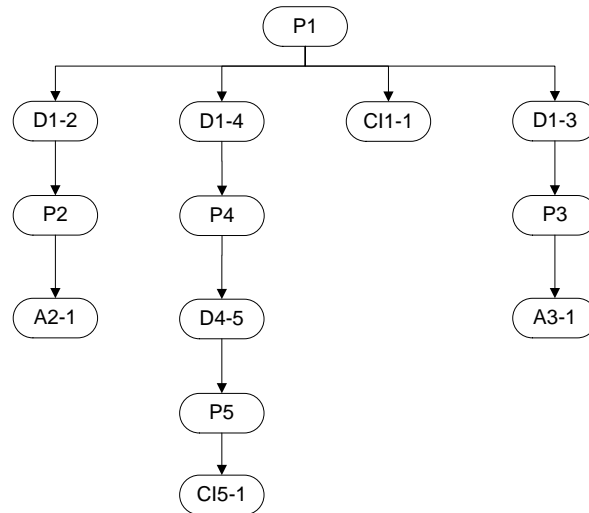


Figura 4-50: Diagrama relacional de la pieza 4.

Paso 2. Asignación de operaciones y cálculo previo del número de etapas del troquel.

La asignación de operaciones al diagrama relacional genera el diagrama de operaciones (figura 4-51). La ordenación del diagrama (figura 4-52) proporciona el cálculo previo del número de etapas y las operaciones que se realizan en cada una de ellas.

Las etapas son las siguientes:

1ª Etapa: Punzonado de los agujeros OP_{A2-1} y OP_{A3-1} , y realización de los cortes interiores OP_{CI1-1} , OP_{CI5-1} .

2ª Etapa: Cortes pestañas: OC_{P2} , OC_{P3} , OC_{P5} .

3ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D1-2} , OD_{D1-3} , OD_{D4-5} .

4ª Etapa: Cortes pestaña: OC_{P4} .

5ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D1-4} .

6° Etapa: Corte del plano base y de separación de la banda: OC_{P1} .

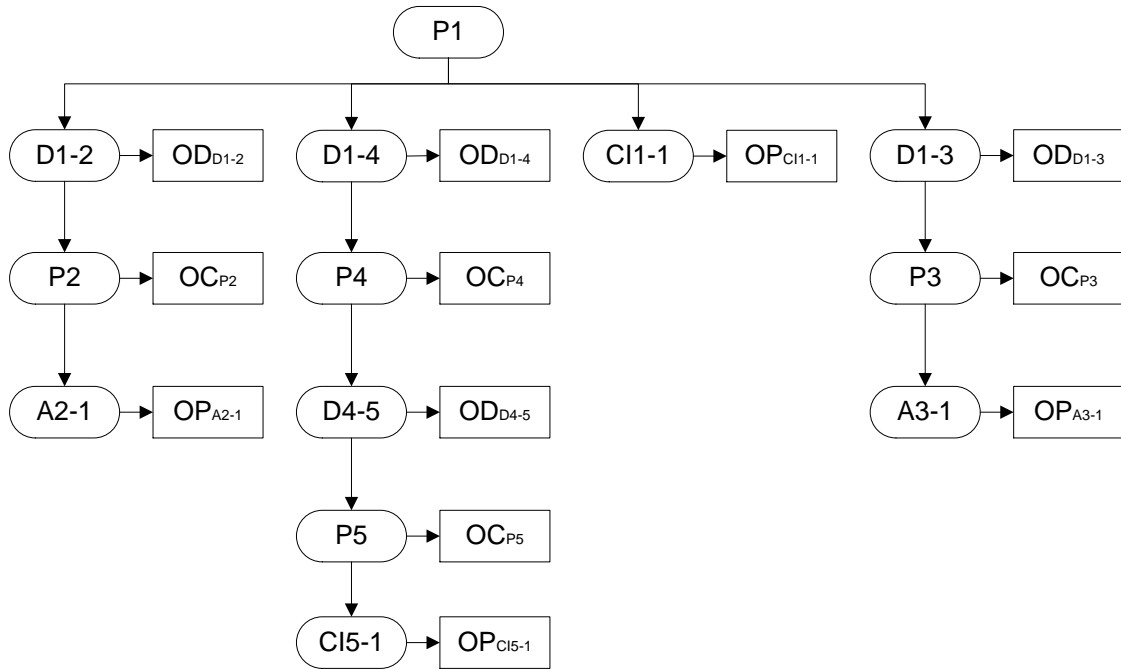


Figura 4-51: Diagrama de operaciones de la pieza 4.

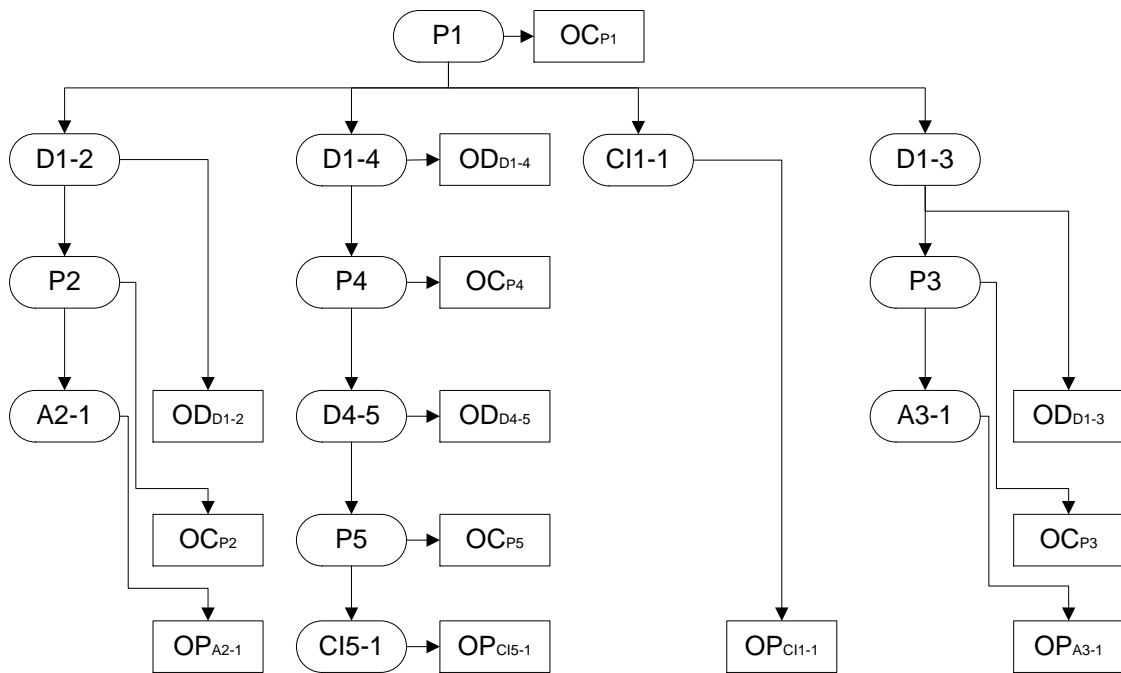


Figura 4-52: Diagrama de operaciones ordenado de la pieza 4.

Paso 3. Modificación y reorganización de diagrama.

Se realizan las siguientes modificaciones del diagrama:

- Separación de las operaciones de la 1º etapa en dos. Los punzonados se realizan en primer lugar mientras que los cortes interiores se realizan cada uno en una etapa independiente.
- Se agrupan las operaciones de corte OC_{P2} , OC_{P3} , OC_{P5} (etapa 2) y OC_{P4} (etapa 4) en la misma etapa, para lo que se ha diseñado una herramienta específica.
- Separación de las operaciones de doblado OD_{D1-2} , OD_{D1-3} y OD_{D4-5} . OD_{D4-5} se realiza en una etapa distinta a OD_{D1-2} y OD_{D1-3} .

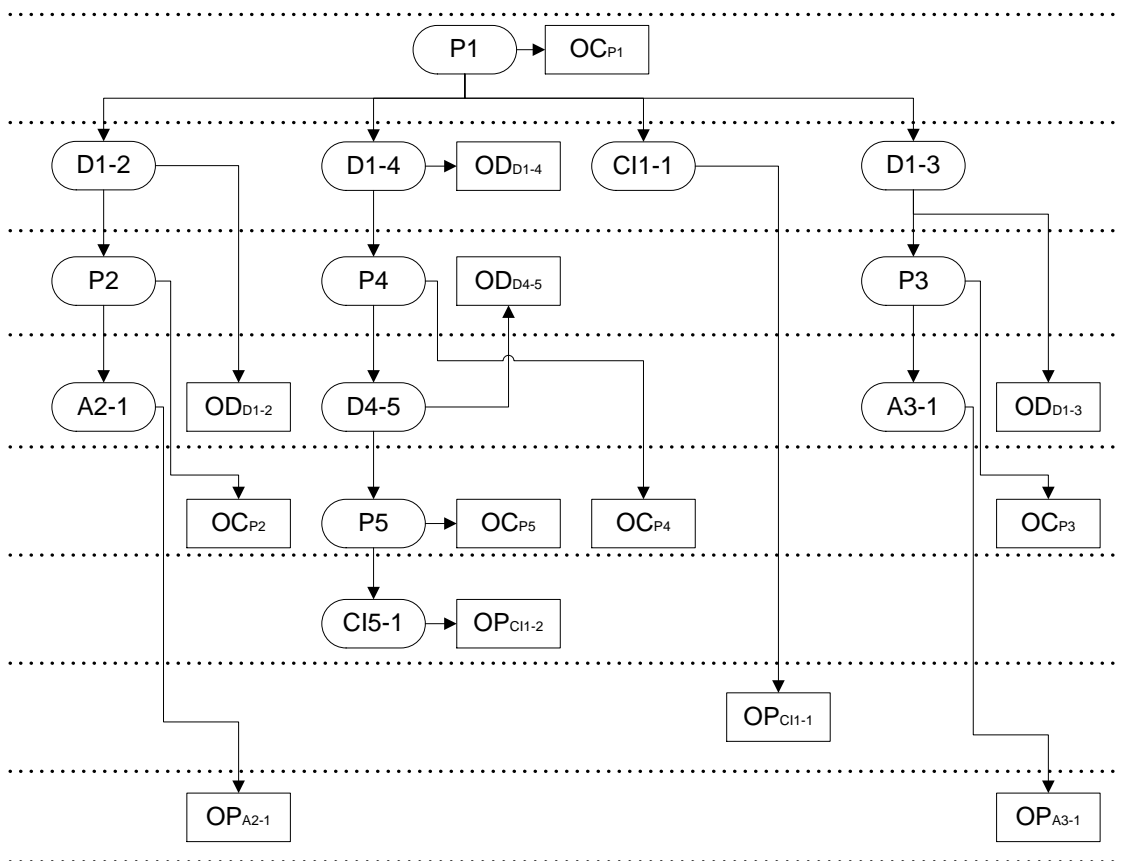


Figura 4-53: Diagrama de operaciones de la pieza 4 modificado.

La secuencia final queda en 8 etapas:

1ª Etapa: Punzonado de los agujeros OP_{A2-1} y OP_{A3-1} .

2ª Etapa: Punzonado del corte interior OP_{CI1-1} .

3ª Etapa: Punzonado del corte interior OP_{CI5-1} .

4ª Etapa: Cortes pestañas: OC_{P2} , OC_{P3} , OC_{P5} y OC_{P4} .

5ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D1-2} , OD_{D1-3} .

6ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D4-5} .

7ª Etapa: Operaciones de doblado: OD_{D1-4} .

8ª Etapa: Corte del plano base y de separación de la banda: OC_{P1} .

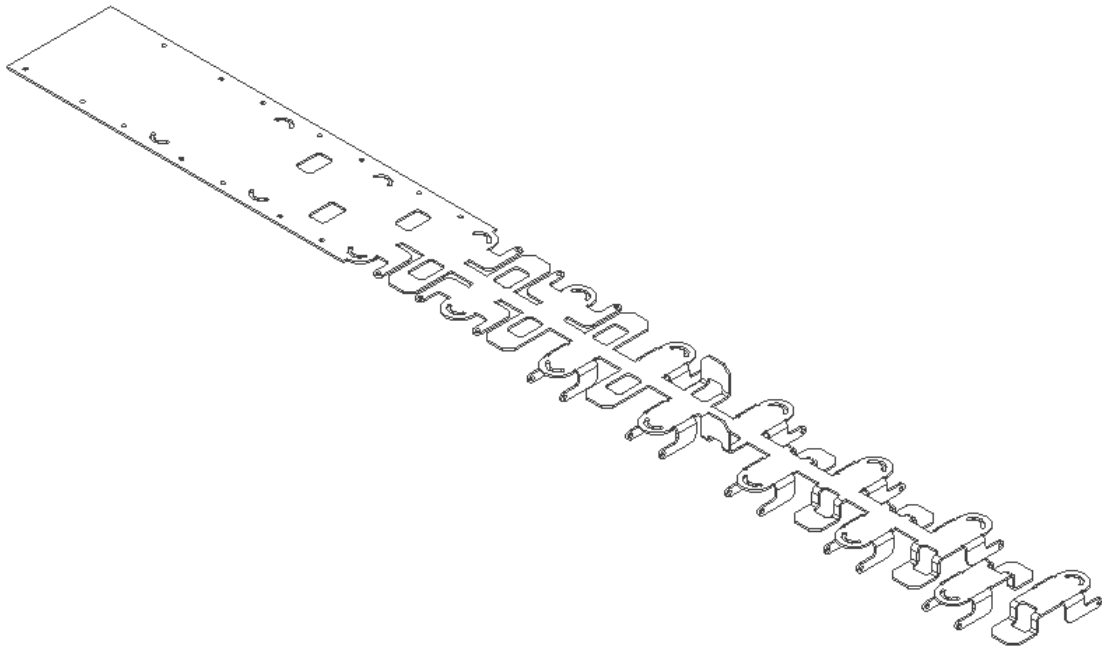


Figura 4-54: Diseño de banda de la pieza 4.

Paso 4. Disposición de la figura.

El análisis de la distribución de la pieza desplegada que proporcione la disposición con un mayor porcentaje de utilización del material da como resultado la distribución presente en la figura 4-55, con un porcentaje de utilización del material del 56 %.

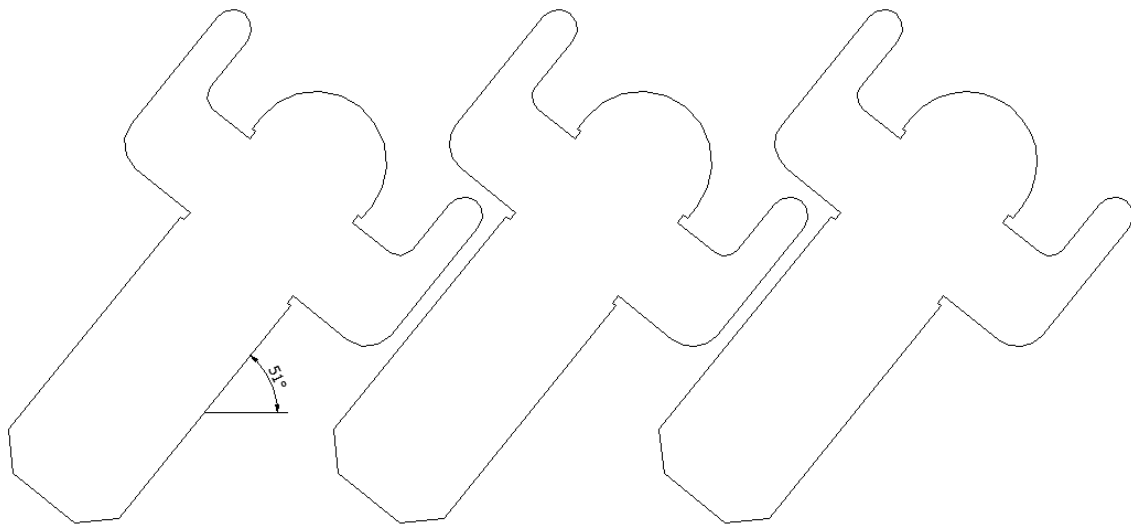


Figura 4-55. Distribución inicial.

Al ser alto el material de desecho se ha analizado otra de las distribuciones más comunes empleadas en piezas fabricadas mediante troquelado, como es la disposición de figuras inversas (figura 4-56), obteniendo en este caso un porcentaje de utilización del material del 70%, por lo que se obtiene una ganancia apreciable, siendo esta la distribución empleada, como se observa en la figura 4-54.

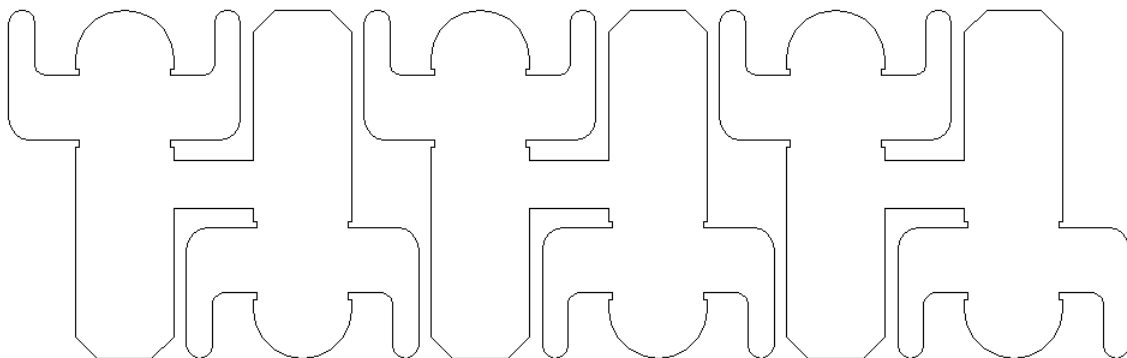


Figura 4-56: Distribución de figuras inversas.

Paso 5. Diseño de herramientas no normalizadas.

Una vez definido el diseño de banda con la pieza girada se determina que las herramientas de corte no normalizadas que se han de diseñar son cuatro, si bien, como son iguales dos a dos, se han de diseñar dos.

De entre ellas, la herramienta más característica es la que da forma a los elementos planos incluidos en la etapa nº 4 (figura 4-58). Al hacer uso de la disposición de figuras inversas se observa que al cortar la forma exterior que define las pestañas laterales P2 y P3, también queda definidas las pestañas P4 y P5, por esta razón se ha optado por incluir las cuatro operaciones de corte en la misma etapa, simplificando la fabricación del troquel.

El conjunto banda-herramientas se observa en la figura 4-59.

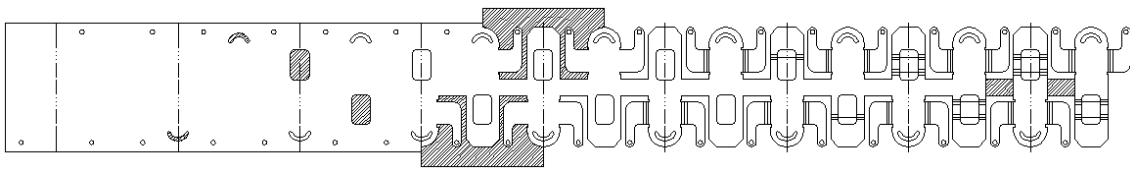


Figura 4-57: Perfiles de las herramientas de la pieza 4.

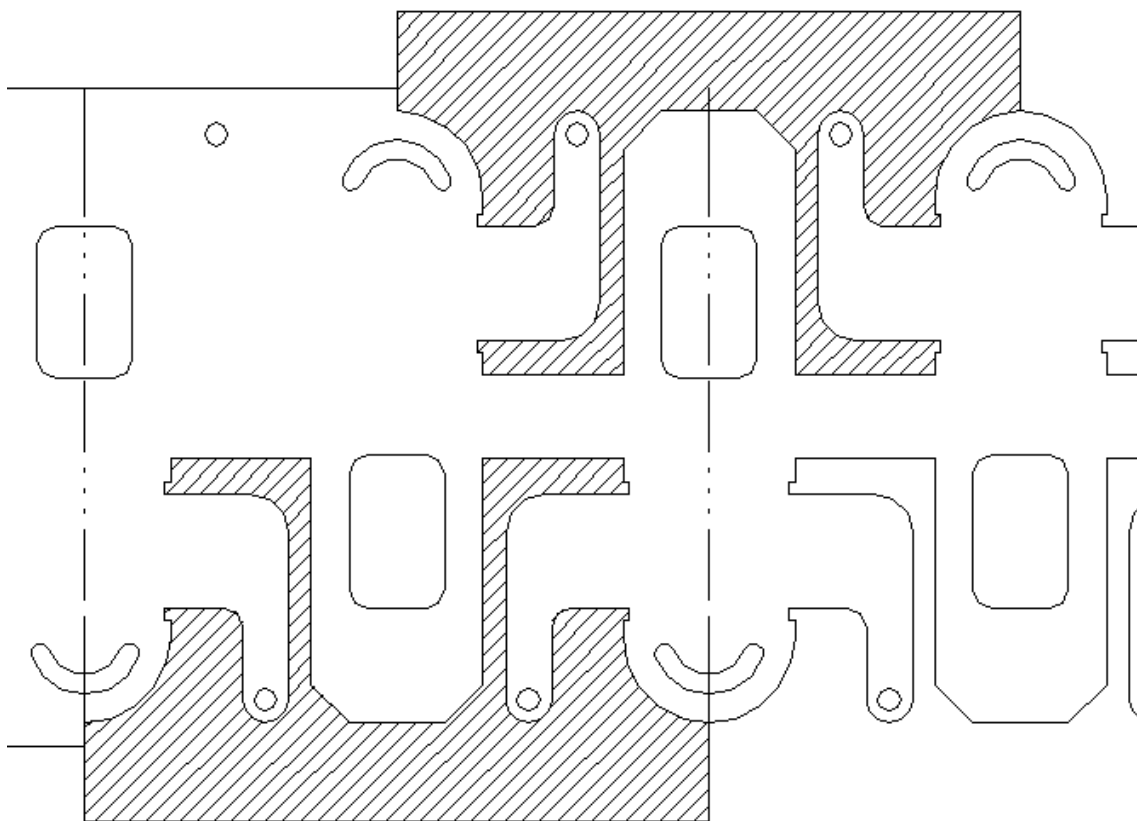


Figura 4-58: Perfil de corte de la etapa nº 4.

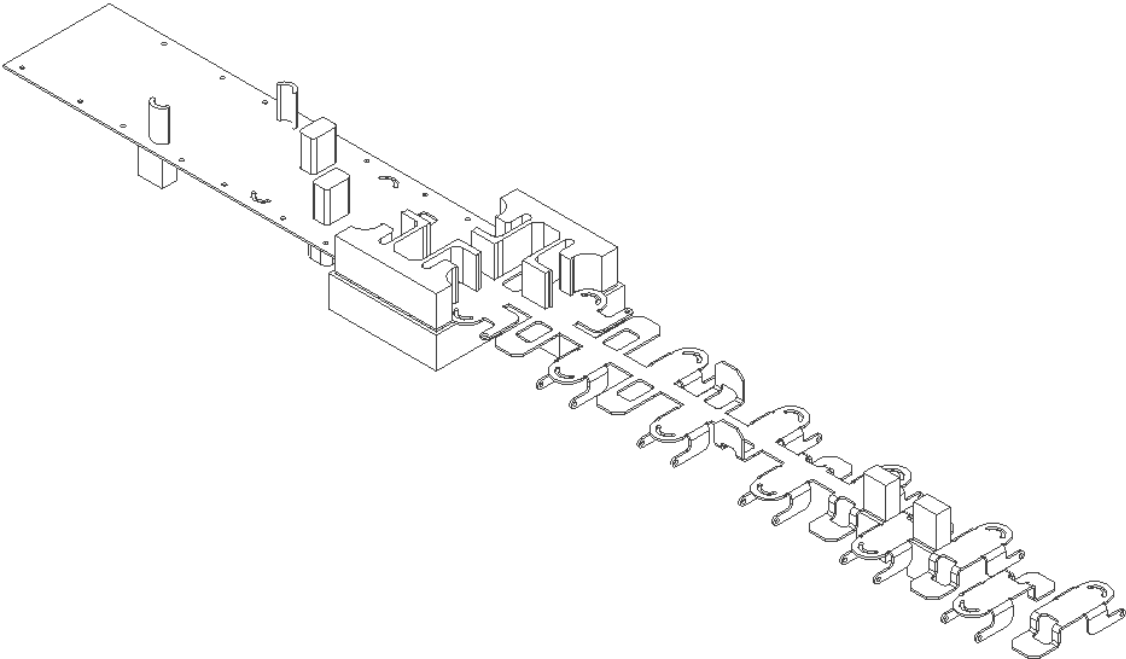


Figura 4-59: Herramientas diseñadas de la pieza 4.

4.6. PIEZA 5

La pieza 5 se expone en la figura 4-60. Se trata de una pieza no simétrica formada por operaciones de corte y doblado.

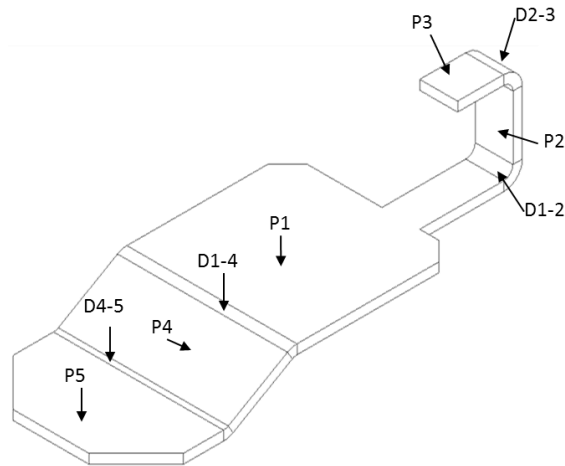


Figura 4-60: Pieza 5.

Paso 1. Identificación de componentes y diagrama relacional.

Los elementos que configuran la pieza se exponen la figura 4-60. Como elemento base se ha elegido el plano P1 que genera el diagrama con menor número de operaciones. El diagrama obtenido se muestra en la figura 4-61.

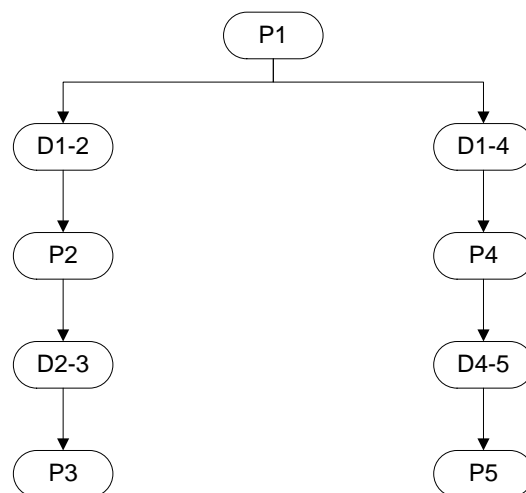


Figura 4-61: Diagrama relacional de la pieza 5.

Se observa que el diagrama obtenido es totalmente simétrico, aun cuando la pieza no es simétrica geoméricamente.

Paso 2. Asignación de operaciones y cálculo previo del número de etapas del troquel.

La asignación de operaciones al diagrama relacional genera el diagrama de operaciones de la figura 4-62.

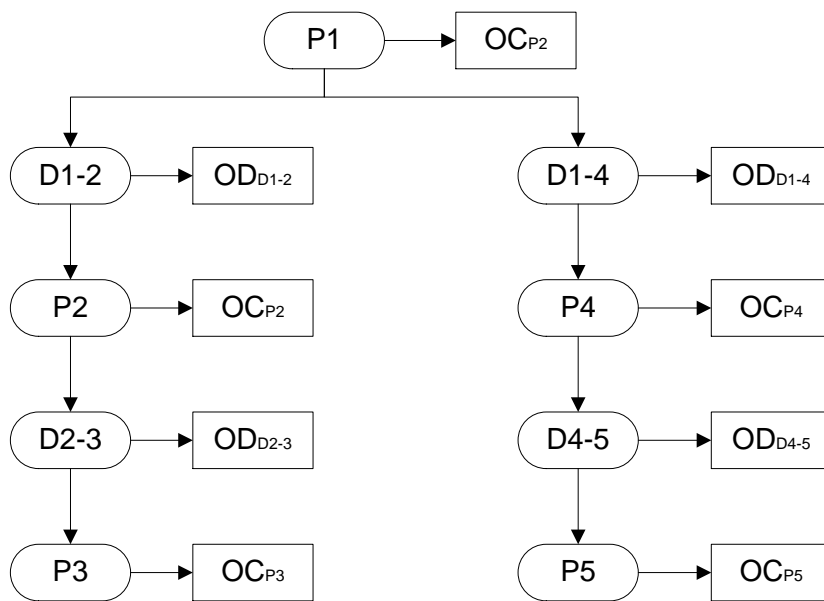


Figura 4-62: Diagrama de operaciones de la pieza 5.

El cálculo previo del número de etapas y las operaciones que se realizan en cada una de ellas es el siguiente:

- 1ª Etapa: Cortes de los planos OC_{P3} y OC_{P5} .
- 2ª Etapa: Operaciones de doblado OD_{D2-3} y OD_{D4-5} .
- 3ª Etapa: Cortes de los planos OC_{P2} y OC_{P4} .
- 4ª Etapa: Operaciones de doblado OD_{D1-2} y OD_{D1-4} .
- 5ª Etapa: Corte del plano base y de separación de la banda: OC_{P1} .

Paso 3. Disposición de la figura.

El análisis de la distribución de la pieza desplegada que proporcione la disposición con un mayor porcentaje de utilización del material da como resultado la que se muestra en la figura 4-63.

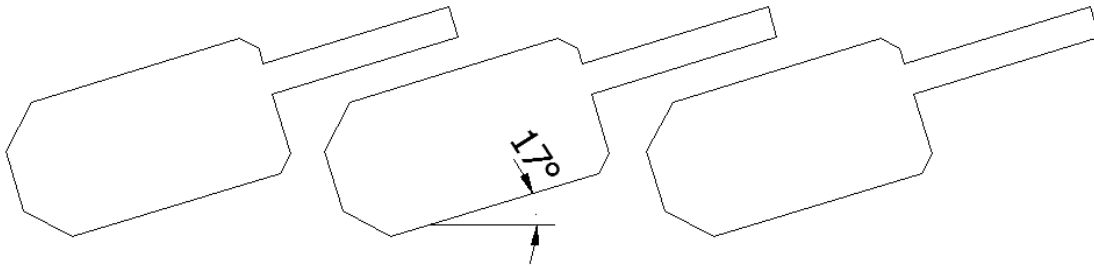


Figura 4-63: Disposición de la pieza 5.

Paso 4. Modificación y reorganización de diagrama.

Como consecuencia de la disposición óptima de la figura se ha de modificar el diagrama y la secuencia de operaciones para que sea viable su fabricación. Las modificaciones propuestas son las siguientes:

- Realización de las operaciones de doblado OD_{D1-2} y OD_{D2-3} en orden consecutivo.
- De igual manera se procede con las operaciones OD_{D1-4} y OD_{D4-5} .
- Las operaciones de corte OC_{P2} y OC_{P3} se realizan de manera conjunta en dos etapas y con dos herramientas distintas para simplificar su diseño. Estas dos operaciones se llevan a cabo antes de las operaciones de doblado OD_{D1-4} y OD_{D4-5} .
- Las operaciones de corte OC_{P4} y OC_{P5} también se realizan de manera conjunta, en este caso con una sola herramienta en la misma etapa.

Se observa en el diagrama resultante de la modificación (figura 4-64) que ejecutan primero las operaciones correspondientes a una de las ramas y posteriormente las de la otra.

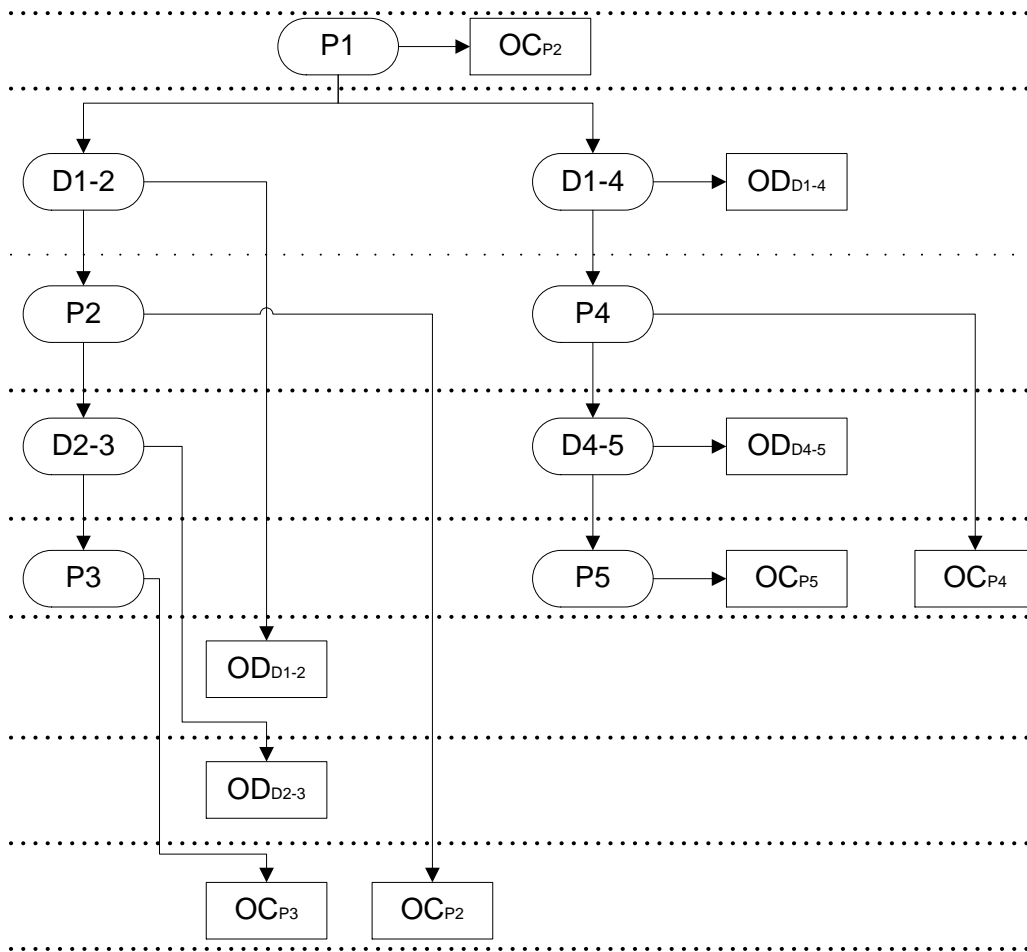


Figura 4-64: Diagrama de operaciones de la pieza 5 modificado.

La secuencia de operaciones resultante es la siguiente:

- 1ª Etapa: Corte de los planos OC_{P2} y OC_{P3} .
- 2ª Etapa: Corte de los planos OC_{P2} y OC_{P3} .
- 3ª Etapa: Operación de doblado OD_{D1-2} .
- 4ª Etapa: Operación de doblado OD_{D2-3} .
- 5ª Etapa: Corte de los planos OC_{P4} y OC_{P5} .
- 6ª Etapa: Operación de doblado OD_{D4-5} .
- 7ª Etapa: Operación de doblado OD_{D1-4} .
- 8ª Etapa: Corte del plano base y de separación de la banda: OC_{P1} .

Aunque el número de etapas es mayor(se pasa de 5 a 8 etapas), esta distribución es más coherente la fabricación de la pieza, siendo el diseño de banda correspondiente el que se muestra en la figura 4-65.

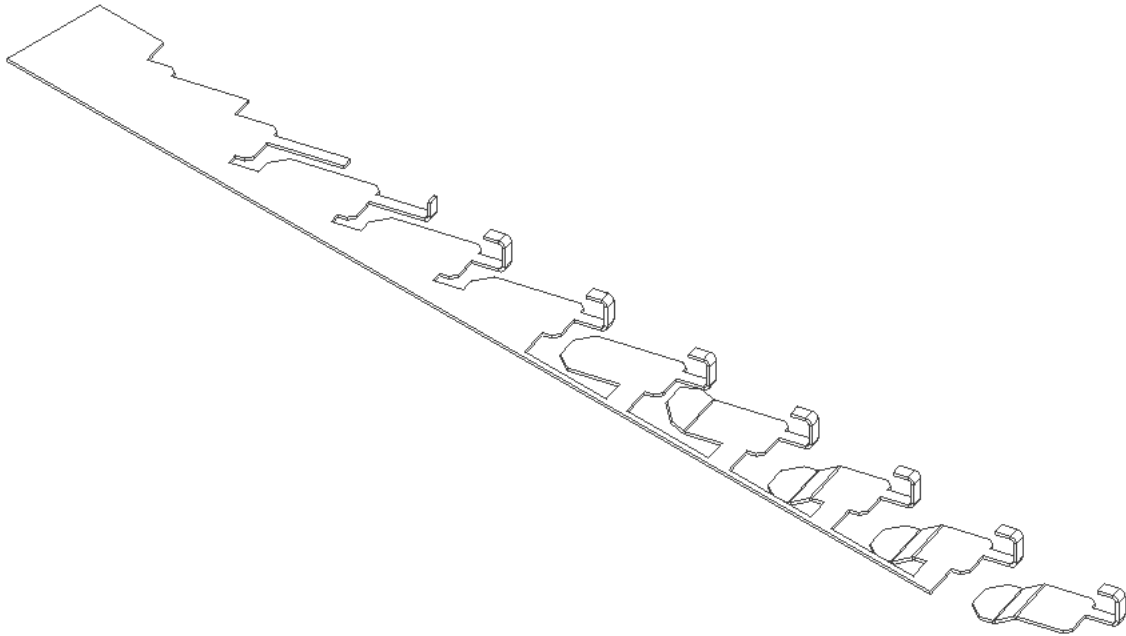


Figura 4-65: Diseño de banda de la figura 5.

Paso 5. Diseño de herramientas no normalizadas.

Definido el diseño de banda se determinan las herramientas de corte no normalizadas que se han de diseñar. Las herramientas de corte a diseñar son cuatro. En las figuras 4-66, 4-67 y 4-68 se muestra la posición y los perfiles de las herramientas de corte.

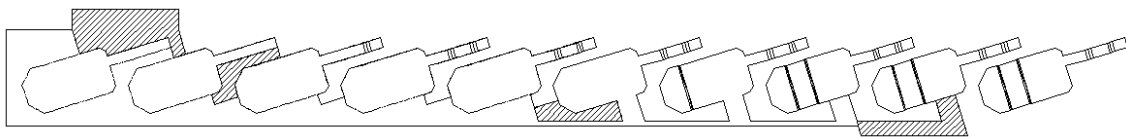


Figura 4-66: Posición de los perfiles de las herramientas.

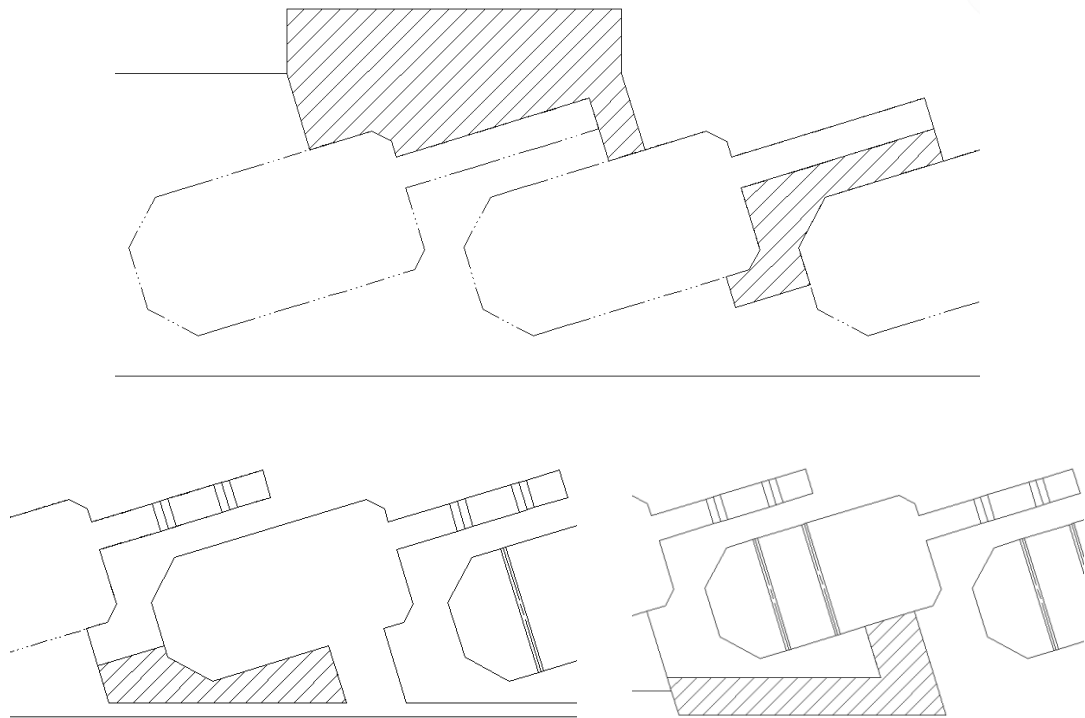


Figura 4-67: Perfiles de las herramientas.

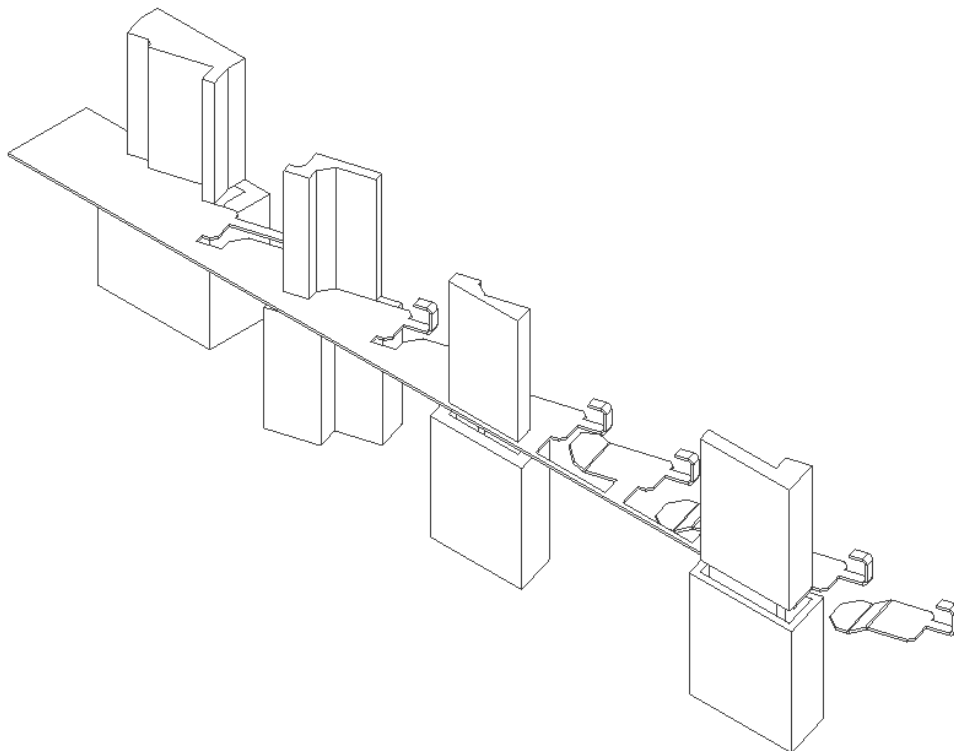


Figura 4-68: Conjunto banda-Herramientas de corte.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

5.1. CONCLUSIONES.

En la presente tesis se ha realizado un estudio sobre el diseño de matrices o troqueles progresivos en el que se han analizado las fases más características de su proceso de diseño. Éste se caracteriza por ser un proceso poco automatizado, siendo la experiencia una herramienta fundamental en la resolución de los problemas que se plantean y en el diseño del troquel en su conjunto. Las herramientas de ayuda de que se dispone, se basan generalmente, en el uso de bases de datos de los diferentes componentes que configuran el troquel.

El diseño del troquel se ha estructurado en dos etapas amplias: el diseño de banda, y el diseño de la secuencia de operaciones, de las herramientas y del troquel.

En lo referente al diseño de banda, se percibe que no se ha investigado muy detalladamente, por lo que la experiencia alcanza mayor influencia. En esta tesis se estudian con detalle, entre otros: el anidamiento y disposición de la figura, y la obtención de la secuencia de operaciones.

Así, se ha realizado una comparativa entre los diferentes algoritmos empleados en el anidamiento, en la que se observan las diferencias entre ellos, sus debilidades y fortalezas, y se ha desarrollado una aplicación que favorece la elección del más adecuado según la tipología de la pieza.

Se presenta, asimismo, una nueva metodología para obtener la secuencia de operaciones mediante diagramas relacionales, con interesantes avances y mejoras con respecto a los procedimientos precedentes.

Otras innovaciones desarrolladas son el diseño de herramientas específicas,...

La aplicación del proceso de diseño en diferentes objetos, desarrollado en el epígrafe “resultados”, siguiendo las premisas en las que se ha basado el desarrollo de esta tesis, permite validarla de forma generalizada. En el primero de los objetos, se expone el proceso completo y se detallan las etapas que se han seguido, desde el desarrollo plano, el diseño de banda y la secuencia de operaciones, hasta el troquel con el que sería viable su fabricación. Los sucesivos casos, incorporan diferentes elementos constructivos, tales

como la estampación, asimetrías, diseño de banda en pares opuestos, inclinación respecto a la dirección de banda y otros, en los que se observa la consistencia de las premisas planteadas, y en los que se manifiestan los buenos resultados que se obtienen.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones acerca de las innovaciones que se aportan:

- Además de obtener el orden de las operaciones ofrece un cálculo previo del número de etapas del troquel.
- Es fácilmente modificable, lo que da flexibilidad al diseñador para incorporar su experiencia al diseño.
- Es muy versátil, siendo válida para una amplia tipología de piezas.
- Dicha versatilidad se basa en las relaciones entre los elementos que configuran la pieza, siendo independientemente del tipo de elemento. Esta flexibilidad permite incorporar nuevos tipos de elementos según las características de la pieza, lo que es posible por ser una metodología abierta.
- Es fácilmente trasladable a sistemas CAD, informáticos...

Otros aspectos que merecen reseñarse son:

- A diferencia de los procedimientos basados en la experiencia, no se depende tanto de ésta, aunque siempre se puede incorporar en base a la adaptabilidad que permiten los diagramas relacionales.
- La aplicación de la lógica difusa tiene la limitación de que el orden de las operaciones depende del tipo de operación a realizar, mientras que en los diagramas relacionales no hay tal limitación.
- Otra de las ventajas radica en que la lógica difusa proporciona el orden las operaciones, pero no el número de etapas ni la forma en que éstas se distribuyen, no así en la metodología propuesta.

5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los diferentes procedimientos presentados en esta tesis, y la interpretación de los resultados obtenidos, pueden dar lugar a una serie de futuras líneas de investigación y desarrollos futuros, tales como su aplicación o integración en ámbitos diferentes al aquí tratado. Algunas de las líneas que se destacan son las siguientes:

- Integración en sistemas CAD junto con otros diseños constructivos de máquina-herramienta.
- Extrapolación a otros procesos de fabricación.
- Integración en sistemas de gestión integral de la información documental y gráfica (PDM) y en sistemas de gestión del ciclo de vida del producto (PLM).

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografia

BIBLIOGRAFÍA

- Adachi, M., Inoue, K. and Funayama, T. (1983) *Integrated cad system for progressive dies*, Fujitsu Scientific & Technical Journal, 19(2), 133-148.
- Adamowicz, M. and Albano, A. (1976) *Nesting two-dimensional shapes in rectangular modules*, Computer-Aided Design, 8(1), 27-33.
- Aldabaldetrecu, P. (2000) *Máquinas y hombres: Guia Histórica*, Elgoibar (Guipuzcoa): Fundación Museo de Máquina Herramienta.
- Appleby, C. J. (1897) *Illustrated handbook of machinery*, New York: Spon & Chamberlain.
- Arenas Reina, J. M., Sebastián Pérez, M. A., *Procedimiento para el diseño asistido por ordenador de matrices en la fabricación de piezas estampadas en caliente*, E. T. S. I. Industriales, UNED.
- ASM International. Handbook Committee (1988), *ASM handbook Vol. 14, Forming and forging*, 9th ed , Metals Park, Ohio: ASM International.
- Baker, T. C. E. (1852) *Elements of Mechanism: elucidating the scientific principles of the practical construction of machines ... Illustrated*, John Weale: London.
- Bergstrom, K. (1988) *Computer aided design of progressive die*, Modelling of metal forming processes: Kluwer, New York, 155-162.
- Bishop, J. L., Freedley, E. T. and Young, E. (1868) *A history of American manufactures from 1608 to 1860 ... comprising annals of the industry of the United States in machinery, manufactures and useful arts*, 3d ed., Philadelphia, London: E. Young & co.; S. Low, son & co.
- Boyle, J. M. (1989) *Interactive engineering systems design: A study for artificial intelligence applications*, Artificial Intelligence in Engineering, 4(2), 58-69.
- Bradley, I. (1972) *A history of machine tools*, Orbis connoisseur's library, Hemel Hempstead: Model and Allied Publications.
- Colvin, F. H. (1916) *Practical die-making; a collection from the latest information on dies and die-making*, Machine shop library, 1st ed., New York etc.: McGraw-Hill Book Company, inc.
- Compton, A. G. (1890) *First lessons in metal-working*, New York: Wiley.

Bibliografía

- Compton, A. G. and De Groot, J. H. (1898) *Advanced metal-work*, 1st ed., New York: J. Wiley & sons.
- Cyclopedia of Engineering*, (1902) Chicago: American Technical Society.
- Chen BJ, L. H., Fang MC, Jia ZX (2009) *Study and development on the modeling methods of punches and dies for motor core progressive die*, Die & Mould Industry, 35(7), 4.
- Cheok, B. T., Foong, K. Y. and Nee, A. Y. C. (1996) *An intelligent planning aid for the design of progressive dies*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 210(1), 25-35.
- Cheok, B. T., Foong, K. Y., Nee, A. Y. C. and Teng, C. H. (1994) *Some aspects of a knowledge-based approach for automating progressive metal stamping die design*, Computers in Industry, 24(1), 81-96.
- Cheok, B. T. and Nee, A. Y. C. (1998a) *Configuration of progressive dies*, Ai Edam-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 12(5), 405-418.
- Cheok, B. T. and Nee, A. Y. C. (1998b) *Trends and developments in the automation of design and manufacture of tools for metal stampings*, Journal of Materials Processing Technology, 75(1-3), 240-252.
- Cheok, B. T., Zhang, Y. F. and Leow, L. F. (1997) *A skeleton-retrieving approach for the recognition of punch shapes*, Computers in Industry, 32(3), 249-259.
- Choi, J. C., Kim, B. M., Cho, H. Y. and Kim, C. (1998a) *A compact and practical CAD system for blanking or piercing of irregular-shaped sheet metal products and stator and rotor parts*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38(8), 931-963.
- Choi, J. C., Kim, B. M., Cho, H. Y., Kim, C. and Kim, J. H. (1998b) *An integrated CAD system for the blanking of irregular-shaped sheet metal products*, Journal of Materials Processing Technology, 83(1-3), 84-97.
- Choi, J. C., Kim, B. M. and Kim, C. (1999) *An automated progressive process planning and die design and working system for blanking or piercing and bending of a sheet metal product*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15(7), 485-497.
- Choi, J. C. and Kim, C. (2001) *A compact and practical CAD/CAM system for the blanking or piercing of irregular shaped-sheet metal products for progressive working*, Journal of Materials Processing Technology, 110(1), 36-46.
- Choi, J. C., Kim, C., Choi, Y., Kim, J. H. and Park, J. H. (2000a) *An integrated design and CAPP system for deep drawing or blanking products*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16(11), 803-813.

Bibliografía

- Choi, J. C., Kim, C. and Kim, J. H. (2001) *An integrated CAD/CAM system for manufacturing lead frame for semiconductors*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17(11), 840-849.
- Choi, J. C., Kim, C. and Kim, J. H. (2002a) *A study of the progressive working of an electric product using a 3D shape recognition method*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19(7).
- Choi, J. C., Kim, C., Kim, J. H. and Kim, Y. M. (2002b) *Development of a system for progressive working of an electric product by using fuzzy set theory*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20(10).
- Choi, J. C., Kim, C. and Yoon, J. H. (2000b) *An automated CAD system for progressive working of irregular shaped metal products and lead frame for semiconductors*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16(9), 624-634.
- Chryssolouris G., W. K. (1986) *Knowledge-based systems in manufacturing*, Annals of CIRP, 35(2), 437-4439.
- Chu, C. Y. (2012) *A Graph and Matrix based Approach for Stamping Operation Sequencing for Progressive Die Design*, Proceedings of in 2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes, 564-569.
- Chu, C. Y., Tor, S. B. and Britton, G. A. (2004a) *A graph theoretic approach for stamping operations sequencing*, the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 218(4), 467-471.
- Chu, C. Y., Tor, S. B. and Britton, G. A. (2004b) *A graph theoretic operations sequencing approach for progressive die design*, Proceedings of the 34th International Matador Conference, 69-74.
- Chuy, C. Y., Tor, S. B. and Britton, G. A. (2008) *Graph theoretic algorithm for automatic operation sequencing for progressive die design*, International Journal of Production Research, 46(11), 2965-2988.
- Dallas, D. B. (1962) *Progressive dies, design and manufacture*, New York: McGraw-Hill.
- Dallas, D. B., (1994) *Progressive dies : principles and practices of design and construction*, 2nd ed., Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers in cooperation with the Forming Technologies Association of SME.
- Derr, L. (1903) *Cyclopedia of engineering*, Chicago: American technical society.
- Derry, T. K. and Williams, T. I. (1993) *A short history of technology: from the earliest times to A.D. 1900*, New York: Dover Publications, Inc.

Bibliografía

- Diderot, D., Alembert, D. and Briasson, A.-C. (1751) *Encyclopédie, ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Paris: chez Briason.
- Dori, D. and Benbassat, M. (1984) *Efficient nesting of congruent convex figures*, *Communications of the Acm*, 27(3), 228-235.
- Duffey, M. R. and Sun, Q. (1991) *Knowledge-based design of progressive stamping dies*, *Journal of Materials Processing Technology*, 28(1-2), 221-227.
- Dufloy, J. R., Van Oudheusden, D., Kruth, J. P. and Cattrysse, D. (1999) *Methods for the sequencing of sheet metal bending operations*, *International Journal of Production Research*, 37(14), 3185-3202.
- Dufloy, J. R., Vancza, J. and Aerens, R. (2005) *Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art*, *Computers in Industry*, 56(7), 747-771.
- EIAal, R. (1996) *A new technique for nesting irregular shapes based on rectangular modules*, *Current Advances in Mechanical Design and Production Vi*, 533-540.
- Emerson, C. F. (1908) *Blanking dies, Machinery's reference series...* New York: The Industrial press.
- Emerson, C. F. (1910) *Blanking dies*, New York: Machinery.
- Farsi, M. A. (2012) *A New Computerized System for Piercing and Bending Progressive Die Design* in Fan, W., ed. *Mechanical and Aerospace Engineering*, 1-7.
- Farsi, M. A. and Arezoo, B. (2009) *Development of a new method to determine bending sequence in progressive dies*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1-2), 52-60.
- Freeman, H. and Shapira, R. (1975) *Determining minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve*, *Communications of the Acm*, 18(7), 409-413.
- Fukuoka, K. and Horiuchi, K. (1986) *Integrated mold and die design and manufacturing system*, *Fujitsu Scientific & Technical Journal*, 22(5), 438-450.
- Ghatrehnaby, M. and Arezoo, B. (2009) *A fully automated nesting and piloting system for progressive dies*, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1), 525-535.
- Ghatrehnaby, M. and Arezoo, B. (2012) *Automatic strip layout design in progressive dies*, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(3), 661-677.
- Groover, M. P., (1997) *Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas*, México [etc.]: Prentice-Hall Hispanoamericana.

Bibliografía

- Hambli, R. (2003) *BLANKSOFT: a code for sheet metal blanking processes optimization*, Journal of Materials Processing Technology, 141(2), 234-242.
- Hodgson, R. B. (1903) *Machines and tools employed in the working of sheet metals*, Manchester, New York: The Technical publishing co. D. Van Nostrand co..
- Holtzapffel, C. (1852) *Turning and mechanical manipulation. Vol I-II-III-IV-V-VI*, London: Holtzapffel &co.
- Hu, D. C. and Wang, L. (2010) *Development and Application of the Optimization Design of Progressive Die Based on Transfer Unit*, Advanced Mechanical Engineering, Vol. 26-28, 671-675.
- Hu, D. C. and Wang, L. (2011) *Cold forging process analysis and precision progressive die for cam of low-carbon steel*, Frontiers of Manufacturing and Design Science, Vol.44-47, 2733-2736.
- Huang, K., Ismail, H. S. and Hon, K. K. B. (1996) *Automated design of progressive dies*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 210(4), 367-376.
- Ismail, H. S., Chen, S. T. and Hon, K. K. B. (1996) *Feature-based design of progressive press tools*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 36(3), 367-378.
- Ismail, H. S. and Hon, K. K. B. (1992) *New approaches for the nesting of 2-dimensional shapes for press tool design*, International Journal of Production Research, 30(4), 825-837.
- Ismail, H. S. and Hon, K. K. B. (1995) *The nesting of 2-dimensional shapes using genetic algorithms*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 209(2), 115-124.
- Jagirdar, R., Jain, V. K. and Batra, J. L. (2001) *Characterization and identification of forming features for 3-D sheet metal components*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41(9), 1295-1322.
- Jagirdar, R., Jain, V. K., Batra, J. L. and Dhande, S. G. (1995) *Feature recognition methodology for shearing operations for sheet-metal components*, Computer Integrated Manufacturing Systems, 8(1), 51-62.
- Jagirdar, R., Jain, V. K., Batra, J. L. and Dhande, S. G. (1996) *Characterization of shearing features for sheet metal components in 2-D layout*, International Journal of Production Research, 34(1), 157-190.
- Jia, Z.-X., Li, H.-L., Zhang, X.-C., Li, J.-Q. and Chen, B.-J. (2011) *Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 54(9-12), 837-852.

Bibliografía

- Jia, Z. X., Li, H. L., Wu, H. B. and Li, J. J. (2010a) *The design method of punches and dies for progressive die of motor core based on association design technology*, Manufacturing Science and Engineering, Vol. 97-101, 214-218.
- Jia, Z. X., Li, H. L., Zhang, X. C., Li, J. Q. and Chen, B. J. (2011) *Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 54(9-12), 837-852.
- Jia, Z. X., Li, H. L., Zhang, X. C., Wu, H. B. and Fang, M. C. (2010b) *Study on the correlated design method of plate holes for progressive dies based on functional feature*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 49(1-4), 1-12.
- Jia ZX, L. W., Wang YL (2008) *Study on methods of standard parts library construction for progressive dies based on SolidWorks*, Die & Mould Industry, 34(11), 4.
- Jia, Z. X., Wang, M., Yin, G. F., Li, H. L. and Jiang, L. C. (1999) *Study on the relationship model in progressive die CAD system*, Proceedings of the 6th International Conference on Computer Aided Design & Computer Graphics, 72-75.
- Jiang, R. D., Lauw, B. T. and Nee, A. Y. C. (2006) *Insert design automation for progressive dies*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28(3-4), 279-285.
- Joshi, S. and Sudit, M. (1994) *Procedures for solving single-pass strip layout problems*, IIE Transactions, 26(1), 27-37.
- Kalpakjian, S. (1997) *Manufacturing processes for engineering materials*, 3 ed ed., Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Kannan, T. R. and Shunmugam, M. S. (2008) *Planner for sheet metal components to obtain optimal bend sequence using a genetic algorithm*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 21(7), 790-802.
- Kannan, T. R. and Shunmugam, M. S. (2009a) *Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part I: feature recognition system*, International Journal of Production Research, 47(4), 941-964.
- Kannan, T. R. and Shunmugam, M. S. (2009b) *Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part II: feature reasoning system*, International Journal of Production Research, 47(5), 1287-1308.
- Kim, C., Kim, B. M. and Choi, J. C. (2001) *Development of an integrated computer-aided process planning system for press working products*, Journal of Materials Processing Technology, 111(1-3), 188-192.

Bibliografía

- Kim, C., Park, Y. S., Kim, J. H. and Choi, J. C. (2002) *A study on the development of computer-aided process planning system for electric product with bending and piercing operations*, Journal of Materials Processing Technology, 130.
- Kim, J. H., Kim, C. and Chang, Y. J. (2006) *Development of a process sequence determination technique by fuzzy set theory for an electric product with piercing and bending operation*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31(5-6), 450-464.
- Kumar, S. and Singh, R. (2004) *A low cost knowledge base system framework for progressive die design*, Journal of Materials Processing Technology, 153, 958-964.
- Kumar, S. and Singh, R. (2005a) *An intelligent system for selection of die-set of metal stamping press tool*, Journal of Materials Processing Technology, 164, 1395-1401.
- Kumar, S. and Singh, R. (2005b) *Trends and developments in intelligent computer aided design of progressive dies*, 11th International Conference on Sheet Metal 2005, 241-248.
- Kumar, S. and Singh, R. (2007) *An intelligent system for automatic modeling of progressive die*, Journal of Materials Processing Technology, 194, 176-183.
- Kumar, S. and Singh, R. (2008) *Automation of strip-layout design for sheet metal work on progressive die*, Journal of Materials Processing Technology, 195(1-3), 94-100.
- Lazaro, A., Engquist, D. T. and Edwards, D. B. (1993) *An Intelligent Design for Manufacturability System for Sheet-metal Parts*, Concurrent Engineering, 1(2), 117-123.
- Lee, I. B. H., Lim, B. S. and Nee, A. Y. C. (1993) *Knowledge-based process planning system for the manufacture of progressive dies*, International Journal of Production Research, 31(2), 251-278.
- Lee, W. C., Ma, H. and Cheng, B. W. (2008) *A heuristic for nesting problems of irregular shapes*, Computer-Aided Design, 40(5), 625-633.
- Li, C. Y., Li, J. J., Wen, J. Y. and Xiao, X. Z. (2001) *HPRODIE: using feature modelling and feature mapping to speed up progressive die design*, International Journal of Production Research, 39(18), 4133-4151.
- Li, J. Y., Nee, A. Y. C. and Cheok, B. T. (2002) *Integrated feature-based modelling and process planning of bending operations in progressive die design*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20(12), 883-895.
- Li Z, J. L., Z. Li, G. Wang and J. Xiao (1992) *CAD/CAM of progressive dies for household electronic appliances*, Proceedings of International Conference on Advanced Technology and Machinery in Metal Forming, Wuhan, China, 71-77.

Bibliografía

- Li Z., X. X., J. Li, Z. Li, J. Ma, J. Xiao (1993) *An intelligent approach to the strip layout of progressive die design*, Proceedings of Fourth International Conference on the Technology of Plasticity, 1817–1821.
- Li Z., Z. C., Y. Hong, X. Xiao, J. Xiao (1990) *Computer aided design of progressive die construction*, Proceedings of International Conference on Die and Mould Technology, Shanghai, China: 357–363.
- Lin, A. C. and Sheu, D. K. (2012) *Sequence planning for bending operations in progressive dies*, International Journal of Production Research, 50(24).
- Lin, B. T., Chan, C. K. and Wang, J. C. (2008) *A knowledge-based parametric design system for drawing dies*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 36(7-8), 671-680.
- Lin, B. T., Chang, M. R., Huang, H. L. and Liu, C. Y. (2009) *Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 42(11-12), 1140-1152.
- Lin, B. T. and Hsu, S. H. (2008) *Automated design system for drawing dies*, Expert Systems with Applications, 34(3), 1586-1598.
- Lin, J. P., Peng, Y. H., Ruan, X. Y. and Wang, H. X. (1999) *Research of integrated techniques on progressive Die concurrent CAD*, Proceedings of the 6th International Conference on Computer Aided Design & Computer Graphics, 50-53.
- Lin, Z. C. and Chang, H. (1994) *An investigation of expert-systems for die design*, Journal of Intelligent Manufacturing, 5(3), 177-192.
- Lin, Z. C. and Deng, C. H. (2001) *Analysis of a torque equilibrium model and the optimal strip working sequence for a shearing-cut and bending progressive die*, Journal of Materials Processing Technology, 115(3), 302-312.
- Lin, Z. C. and Hsu, C. Y. (1996) *An investigation of an expert system for shearing cut progressive die design*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 11(1), 1-11.
- Lucas, J. L. (1897) *Dies and die making*, 1st. ed., Providence, R.I.: Journal of commerce co.
- Ma, H. and Liu, C. C. (2007) *Fast nesting of 2-D sheet parts with arbitrary shapes using a greedy method and semi-discrete representations*, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 4(2), 273-282.
- Martin, R. R. and Stephenson, P. C. (1988) *Putting objects into boxes*, Computer-Aided Design, 20(9), 506-514.

Bibliografía

- Milenkovic, V. J. (1999) *Rotational polygon containment and minimum enclosure using only robust 2D constructions*, Computational Geometry: Theory and Applications, 13(1), 3-19.
- Monrad, A. L. (1914) *Modern blanking and piercing dies*, New York: The Industrial Press.
- Monrad, A. L. and Hamilton, D. T. (1914) *Modern blanking and piercing dies, Machinery's reference series ...* New York city: The Industrial press.
- Mulero, R. and Layton, B. (2007) *Two-dimensional Minkowski sum optimization of ganged stamping blank layouts for use on pre-cut sheet metal for convex and concave parts*, Journal of Manufacturing Systems, 26(1), 44-52.
- Murakami, H., Shirai, K., Yamada, O. and Isoda, K. (1980) *A CAD system for progressive dies*, 21st Machine Tool Design and Research Conference, Tokyo, Japan: Macmillan, 687-592.
- Nakahara, S. (1978) *Computer aided progressive die design*, 19th machine tool design research conference Manchester, UK: MacMillan, London, 171-176
- Nee, A. Y. C. (1984) *Computer-aided layout of metal stamping blanks*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 198(10), 187-194.
- Nee, A. Y. C. (1989) *PC-Based computer aids in sheet-metal working*, Journal of Mechanical Working Technology, 19(1), 11-21.
- Nee, A. Y. C. and Foong, K. Y. (1992) *Some considerations in the design and automatic staging of progressive dies*, Journal of Materials Processing Technology, 29(1-3), 147-158.
- Nye, T. J. (2000) *Stamping strip layout for optimal raw material utilization*, Journal of Manufacturing Systems, 19(4), 239-247.
- Nye, T. J. (2001a) *Optimal nesting of irregular convex blanks in strips via an exact algorithm*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41(7), 991-1002.
- Nye, T. J. (2001b) *Stamping blank optimal layout and coil slitting widths for single and multiple blanks*, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 123(4), 482-488.
- Oehler-Kaiser, G. (1977) *Herramientas de troquelar, estampar y embutir*, 6a. ed., Barcelona: Gustavo Gili.
- Okada M (1980) *Computer aided manufacturing system for sheetmetal parts*, 21st Machine Tool Design Research Conference, Manchester,UK: McMillan, London, 603-609.

Bibliografía

- Ong, S. K., DeVin, L. J., Nee, A. Y. C. and Kals, H. J. J. (1997) *Fuzzy set theory applied to bend sequencing for sheet metal bending*, Journal of Materials Processing Technology, 69(1-3).
- Pearson, J. C. (1904) *An introduction to metal-working*, London: J. Murray.
- Pollack, H. W. (1988) *Tool design*, 2nd ed., Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
- Prasad, Y. K. D. V. and Somasundaram, S. (1992) *CADDs: an automated die design system for sheet-metal blanking*, Computing and Control Engineering Journal, 3(4), 185-191.
- Raymond, H. M. (1908) *Cyclopedia of Mechanical Engineering*, Chicago: American Scholl of Correspondence.
- Rico, J. C., Gonzalez, J. M., Mateos, S., Cuesta, E. and Valino, G. (2003) *Automatic determination of bending sequences for sheet metal parts with parallel bends*, International Journal of Production Research, 41(14), 3273-3299.
- Roe, J. W. (1916) *English and American tool builders*, New Haven: Yale university press; etc.
- Rossi, M. (1971) *Estampado en frío de la chapa : estampas, matrices, punzones, prensas y máquinas*, 9ª ed., Barcelona [etc.]: Edit. Científico-Médica.
- Salazar, F. F., Hoyos, J. E. C. and Asme (2006) *Automatic definition of the sequence of operations in progressive dies*, Proceedings of the 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Vol 4. ,735-742.
- Shirai, K. and Murakami, H. (1989) *A Compact and Practical Cad Cam System for Progressive Dies*, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 23(1), 25-30.
- Shirai, K., Murakami, H. and Iwata, K. (1985) *Development of a CAD/CAM System for Progressive Dies*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 34(1), 187-190.
- Shunmugam, M. S. and Kannan, T. R. (2002) *Automatic flat pattern development of sheet metal components from orthographic projections*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42(13), 1415-1425.
- Smith, O. (1896) *Press-working of metals*, 1st ed., New York: J. Wiley & sons; etc.
- Song, X. W., Ying, D. N. and Wang, E. J. (1996) *Feature representation product model for progressive die CAD/CAM system*, Fourth International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2644, 381-385.
- Stanley, F. A. (1919) *Punches and dies : layout, construction and use*, Library of machine shop practice, 1st ed., New York: McGraw-Hill.

Bibliografía

- Su, J. H., Ren, F. Z. and Wang, L. (2008) *Semi-enclosed cold forging process analysis and progressive die design of CPU fin*, Physical and Numerical Simulation of Materials Processing, Vol. 575-578, 174-179.
- Suchy, I. (2006) *Handbook of die design*, McGraw-Hill handbooks, 2nd ed., New York: McGraw-Hill.
- Suverkrop, E. A. (1919) *The American Machinist shop note book; a collection of articles*, 1st ed., New York: Pub. by American Machinist, McGraw-Hill.
- Tan, W. S., Zhou, J. Z., Guo, J., Huang, S., Wang, C. D., Gao, B. and Shang, J. (2011) *Design of Progressive Die Based on Component in UG Environment*, Functional Manufacturing Technologies and CEEUSRO II, Vol. 464, 146-150.
- Tomlinson, C. (1866) *Cyclopedia of Useful Arts, Mechanical and Chemical, Manufacturers, Mining and Engineering*, London: Virtue & Co.
- Tong, C. and Sriram, D. (1992) *Artificial Intelligence in Engineering Design, Volume 1: Design Representation and Models of Routine Design*, San Diego, CA: Academic Press.
- Tor, S. B., Britton, G. A. and Zhang, W. Y. (2003) *Indexing and Retrieval in Metal Stamping Die Design Using Case-based Reasoning*, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 3(4), 353-362.
- Tor, S. B., Britton, G. A. and Zhang, W. Y. (2005a) *Development of an object-oriented blackboard model for stamping process planning in progressive die design*, Journal of Intelligent Manufacturing, 16(4-5), 499-513.
- Tor, S. B., Britton, G. A. and Zhang, W. Y. (2005b) *A knowledge-based blackboard framework for stamping process planning in progressive die design*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26(7-8), 774-783.
- Tumkor, S. and Pochiraju, K. (2010) *Progressive Die Strip Layout Optimization for Minimum Unbalanced Moments*, Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, 132(2), 7.
- Urdangarín, C. and Aldabaldetrecu, P. (1982) *Historia técnica y económica de la máquina-herramienta*, Guipúzcoa, San Sebastián: Caja de Ahorros Provincial de Guipúzcoa.
- Vosniakos, G. C., Segredou, I. and Giannakakis, T. (2005) *Logic programming for process planning in the domain of sheet metal forming with progressive dies*, Journal of Intelligent Manufacturing, 16(4-5), 479-497.
- Wang B, R. F., Zhou C, Tang Y (2009) *Research of association technology in assembly design for precision progressive die*, Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 27(1), 5.

Bibliografía

- Wang, F. and Chang, L. (1995) *Determination of the bending sequence in progressive die design*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 209(1), 67-73.
- Wang, G. X., Zhang, W. Z. and Nee, A. Y. C. (2006) *An integration framework for digital progressive die design and manufacturing*, 1st International Symposium on Digital Manufacture, Vol. 1-3, 55-61.
- Wang, Y. L. and Long, H. C. (2010) *A Rapid Parametric CAD System for Fine-blanking Progressive Dies*, Digital Design and Manufacturing Technology, Vol. 102-104, 252-256.
- Wilson, F. W. (1981) *Principios fundamentales para el diseño de herramientas : respecto a la teoría, principios y técnica moderna de herramientas de corte, matrices cortadoras y formadoras, dispositivos de montaje y demás herramental relacionado*, Serie de ingeniería industrial de la A.S.T.M.E., 6a. ed., México: Compañía Editorial Continental.
- Wilson, H. S. (1898) *The practical tool-maker and designer: a treatise upon the designing of tools and fixtures for machine tools and metal working machinery*, Philadelphia, London: H. C. Baird & Co.; S. Low, Marston & Co., limited.
- Woodworth, J. V. (1903) *Dies, their construction and use for the modern Working of sheet metals*, New York: Norman W. Henley & Co.
- Woodworth, J. V. (1907) *Punches, dies and tools for manufacturing in presses*, New York: The N. W. Henley publishing Co.
- Yuan B.W. , L. W., W.D. Zhang, J. Zhu, (1990) *Graph processing and strip layout in a CAD system on micro-computer for the multistage progressive die with bending and forming*, International Conference on Die and Mould Technology Shanghai, China, 434-441.
- Zhang, W. Z., Jiang, R. D., Cheok, B. T. and Nee, A. Y. C. (2002) *An innovative and practical design automation system for progressive dies*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 216(12), 1611-1619.
- Zhao WC, L. J., Xiao XZ (2006) *Correlated design of standardized parts and components in CAD system for progressive die*, Die & Mould Industry 32(11), 4.

ANEXO I.

**APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN DE
ANIDAMIENTO.**

AI.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo tercero, en el apartado disposición de la figura y anidamiento, se exponen una serie de procedimientos empleados para obtener la distribución que permite conseguir una mayor utilización del material, o lo que es lo mismo, minimizar los gastos de material. Estos procedimientos se ilustran con una serie de ejemplos que mostraban los resultados obtenidos mediante la aplicación de uno u otro método.

Para la consecución de esos resultados se ha procedido a la realización de un programa informático en el que se han implementado los diferentes procedimientos comentados. Dicho programa se ha diseñado usando el entorno de programación VBA (Visual Basic para Aplicaciones) integrado en AutoCad, lo cual proporciona un acceso a las herramientas gráficas que dispone Autocad.

En este anexo se va a explicar el funcionamiento y manejo del programa desarrollado. El programa está estructurado en tres fases diferenciadas: introducción de datos generales, introducción de datos particulares a cada procedimiento y resultados.

AI.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES.

El primer formulario que aparece al arrancar el programa (figura AI-1) pedirá la información que es común a los tres procedimientos empleados:

- Espesor de la chapa: valores en mm.
- Incremento de anchura: incremento que se produce en el ancho de banda para evitar la pérdida de rigidez de la tira de chapa, que depende del tipo de material y del espesor de la chapa ($\Delta\text{Anchura} = C \cdot \text{Espesor}$). El dato que se pide es el factor C.
- Distancia entre figuras: separación mínima que ha de existir entre dos figuras adyacentes para evitar la pérdida de rigidez de la chapa. Al igual que el caso anterior va a depender del material y del espesor de la chapa ($\delta = X \cdot \text{Espesor}$). El dato que se pide es el factor X.

Figura AI-1: Formulario de petición de datos comunes.

En el caso que no se indique ningún valor para los datos anteriores se realizará la distribución de la figura de tal manera que no haya separación entre dos figuras contiguas.

AI.3. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO.

Después de fijar los datos comunes a los tres procedimientos empleados se ha de elegir cuál va a ser el procedimiento que se va a emplear y definir los datos propios de cada algoritmo. Para ello aparecerá el formulario representado en la figura AI-2.

Figura AI-2: Elección del procedimiento a emplear.

La elección del algoritmo que se va a emplear se efectuara señalando la pestaña correspondiente al método deseado, apareciendo diferentes opciones dependiendo del método elegido, aunque algunas de ellas son comunes, como el modo de introducción de datos y el número de vértices que posee el polígono dato.

Datos específicos para cada formulario:

a) Mínimo Rectángulo:

Este procedimiento no precisa ningún dato adicional.

Figura AI-3: Formulario del procedimiento de mínimo rectángulo.

b) Rotacional:

Figura AI-4: Formulario del procedimiento rotacional.

Es necesario indicar el valor del incremento de ángulo que se rotara el polígono.

c) Suma de Minkowski:

Figura AI-5: Formulario del procedimiento rotacional.

Es necesario indicar el número de vértices que tiene el polígono suma, además de introducir posteriormente sus datos.

AI.4. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DEL MATERIAL.

El porcentaje de utilización del material es el parámetro que indica la cantidad de material de la tira de chapa que se va a emplear en la fabricación de la pieza con respecto al total. Este parámetro va a ser el empleado en la comparación de los diferentes métodos utilizados indicando cual es el más favorable.

El porcentaje de utilización del material es:

$$\rho = \frac{A_{\text{útil}}}{A_{\text{Total}}}$$

Para su cálculo en primer lugar se determina el área total. Tomando una de las figuras que componen la distribución se halla el rectángulo que la contiene, siendo este el área total, sin tener en cuenta factores tecnológicos. Si se consideran estos factores esta sería mayor, ya que tanto el ancho de banda como la separación entre figuras aumenta. El área útil es aquella que ocupen las figuras dentro del área total.

El procedimiento empleado se basa en el concepto de Regiones de Autocad. Se crean diferentes regiones: una formada por el rectángulo que define el área total y cinco formadas con cada una de las figuras representadas en la distribución. A la región definida por el rectángulo, se le resta las cinco figuras, siendo el resultado el material que no se aprovecha de la tira de chapa, o material de desperdicio.

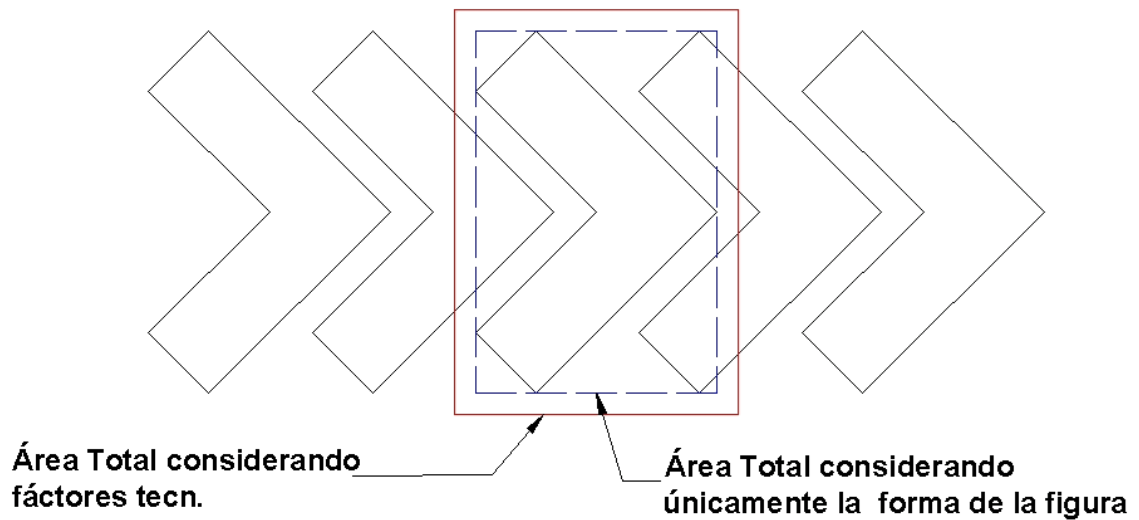


Figura AI-6: Área total.

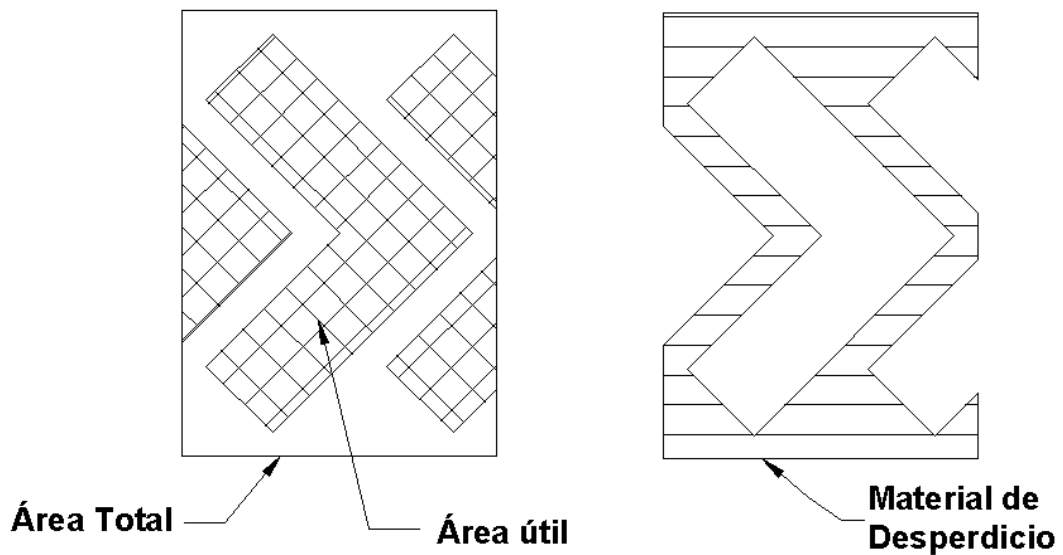


Figura AI-7: Área útil y material de desperdicio.

AI.5. CÁLCULO DEL PASO.

En este procedimiento se determina el paso, la distancia entre un punto de una figura y el mismo punto de la figura adyacente.

Su cálculo se basa en determinar la anchura máxima de la pieza, que en las figuras poligonales siempre está situada en uno sus vértices. A esta anchura máxima hay que sumar la separación mínima que ha de haber entre dos piezas contiguas, parámetro que depende del espesor del fleje.

El método de cálculo es el siguiente: se traza por cada vértice de la figura una línea y se determinan los diferentes puntos de intersección de dicha línea con la figura. La anchura es la diferencia entre punto intersección de menor X y el de mayor X, ya que se calcula la distribución a lo largo del eje X. Se obtiene así la anchura máxima que es el mayor valor de las magnitudes calculadas.

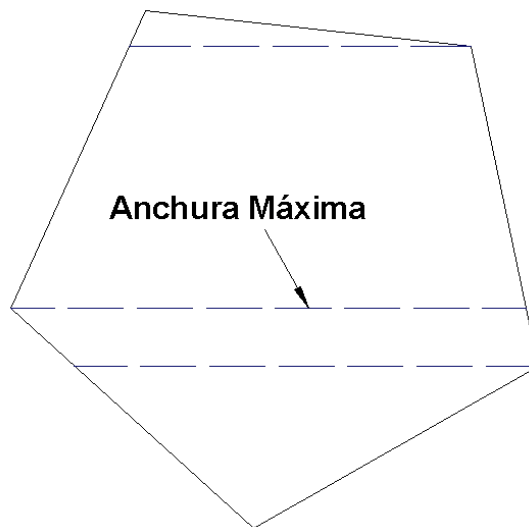


Figura AI-8: Anchura máxima.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Obtener las coordenadas de los vértices de la figura.
2. Trazar por cada vértice rectas horizontales
3. Hallar la intersección de dichas rectas con la figura.
4. Calcular la anchura de cada Recta y determinar la mayor de ellas.

5. Incrementar la anchura máxima el factor de separación entre dos figuras adyacentes, que depende del material y del espesor de la chapa. El valor final es el PASO.

AI.6. CÁLCULO DE LA ENVOLVENTE.

En algunos de los procedimientos empleados es necesario el cálculo de la envolvente convexa de la figura poligonal.

Un subconjunto A de puntos del plano se dice que es convexo si para cualesquiera dos puntos de A (P, Q), el segmento que los une está contenido en A, es decir:

$$\forall P, Q \in A \mid \overline{PQ} \subset A \rightarrow A \text{ Convexo}$$

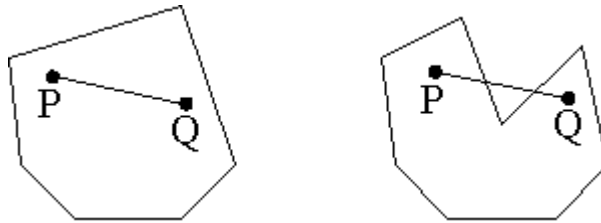


Figura AI-9: Figura convexa y cóncava.

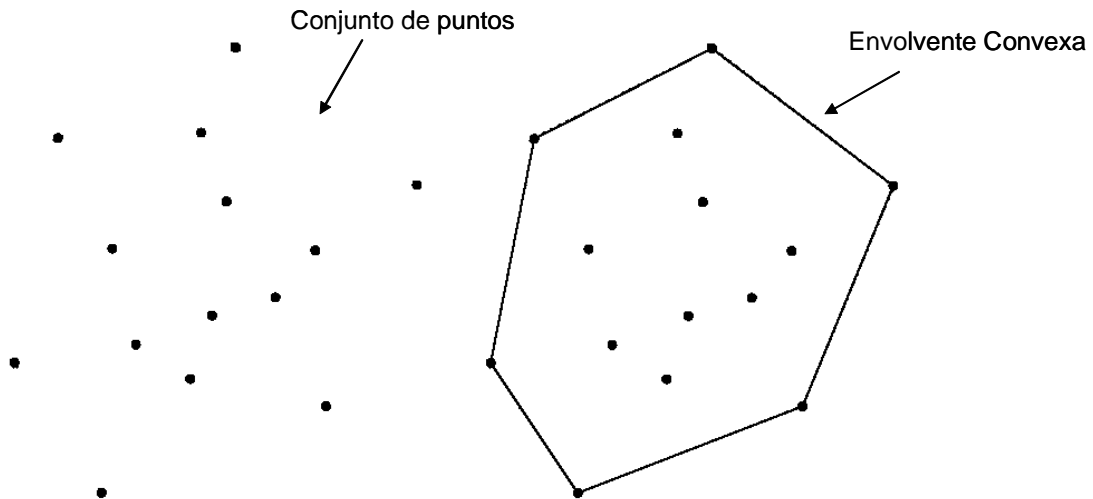


Figura AI-10: Envolverte convexa.

El cálculo de la envolvente convexa es determinar para un conjunto de puntos el menor polígono convexo que contiene a todos los puntos de dicho conjunto (figura AI-10).

De los diversos algoritmos existentes para el cálculo de la envolvente, el empleado es el denominado Gift Wrapping (envolvimiento de regalo). La idea intuitiva del algoritmo consiste en imaginar una recta que se desplaza desde menos infinito hacia arriba hasta tocar un punto del conjunto de puntos. Luego, dicha recta va rodeando la nube de puntos en sentido positivo, girando en cada vértice hasta tocar el siguiente, de modo que al final la envuelve por completo. En nuestro caso el conjunto de puntos son los vértices de la figura.

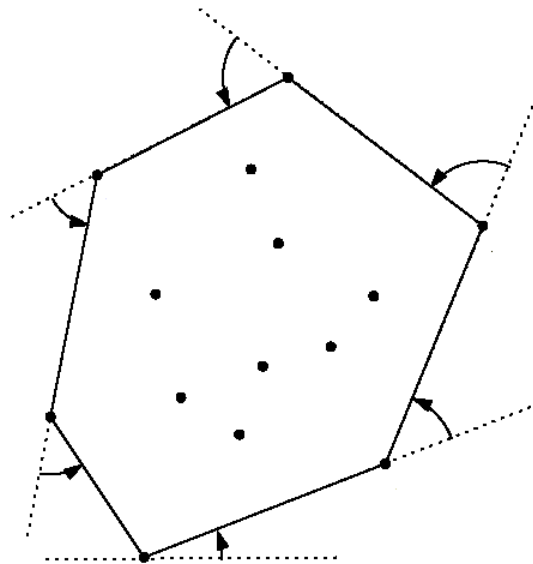


Figura AI-11: Procedimiento Gift Wrapping.

Los pasos a seguir son:

1. Dado los vértices de la figura, se toma el vértice P que tenga menor ordenada y mayor abscisa y se traza una recta r que pase por P y sea paralela al eje de abscisas.
2. Para cada vértice trazar líneas que los unan con P. El próximo vértice del cierre convexo será el punto Q que forme el mínimo ángulo respecto a la recta r anterior.

3. Si Q no es el punto de partida, repetir el paso 2 tomando $P = Q$ y r como la recta formada por P y Q.

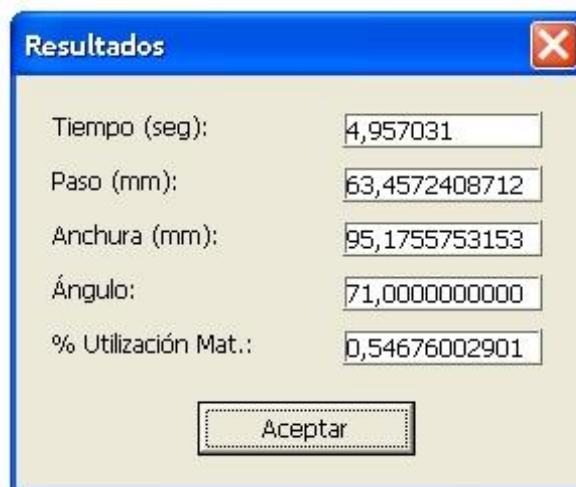
AI.7. RESULTADOS

Posteriormente a la introducción de los datos de partida el programa realiza los cálculos pertinentes mostrando a continuación los resultados obtenidos por el mismo.

Conjuntamente con la solución gráfica se proporciona una serie de datos que permiten, además de comparar los diferentes procedimientos entre sí, obtener datos importantes para el diseño de banda como son:

- Tiempo de ejecución del algoritmo (segundos).
- Paso (mm).
- Ancho de banda (mm).
- Ángulo de la posición obtenida respecto de la posición inicial.
- Porcentaje de utilización del material.

Estos resultados se presentan en el formulario de la figura AI-12, con el que se finaliza el cálculo.



The image shows a software window titled "Resultados" with a blue header and a red close button. The window contains five rows of data, each with a label and a text input field containing a numerical value. At the bottom center, there is a button labeled "Aceptar".

Label	Value
Tiempo (seg):	4,957031
Paso (mm):	63,4572408712
Anchura (mm):	95,1755753153
Ángulo:	71,0000000000
% Utilización Mat.:	0,54676002901

Figura AI-12: Resultados.

ANEXO II.

BIOGRAFIA DEL AUTOR.

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

El autor, José Enrique Cerón Hoyos, realiza sus estudios de Ingeniería Técnica Industrial (Especialidad Mecánica) en la Universidad de Cantabria entre 1991-95. Posteriormente, en 1995 mediante un curso de adaptación accede al segundo ciclo de Ingeniería Industrial (Especialidad Mecánica y Materiales) en la Universidad de Cantabria finalizando en 1999.

En el año 2000 se matricula como alumno de doctorado en el programa de “Ingeniería Geográfica y Expresión Gráfica en la Ingeniería” del Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica de la Universidad de Cantabria, cursando 33 créditos durante los cursos 2000/01 y 2001/02, presentando la Suficiencia Investigadora en Junio de 2003.

En el año 2000 ingresa como profesor del Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica de la Universidad de Cantabria, en el Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería impartiendo docencia en las siguientes titulaciones:

- Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.
- Grado en Ingeniería Eléctrica.
- Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática.
- Ingeniería Industrial.
- Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
- Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad Electricidad.
- Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad Mecánica.
- Ingeniería Técnica de Minas.

La docencia del autor se ha centrado asignaturas de “Diseño Industrial”, “ Expresión Gráfica”, “Dibujo Industrial”, “Ingeniería Gráfica” y CAD, siendo profesor responsable de diversas asignaturas desde el año 2001 hasta ahora. Asimismo ha dirigido proyectos fin de carrera de diferentes titulaciones.

Dentro de la docencia ha implantado diversas asignaturas dentro del Open Course Ware (OCW), y publicado diversas monografías relacionadas con el área al que pertenece.

En lo que respecta a investigación, ha participado en diversos proyectos de I+D+i:

- “Entorno de experimentación de vehículos marinos autónomos”
- Estudio de prototipo de generador eléctrico por energía solar, mediante disco parabólico orientable y motor generador Stirling de 10 a 40 kw.

Ha presentado diversas ponencias y artículos en diferentes congresos internacionales, gran parte de ellos relacionados con el tema presentado en la tesis, así como otros dedicados a temas geométricos y/o energía solar.

Tesis doctoral: Desarrollo de aspectos metodológicos en el diseño de matrices progresivas

Fe de erratas.

Figura 1- 4: La referencia más antigua de un torno es la ilustración en una tumba egipcia de 300 a. C. aproximadamente. (a (Watson 1994);b (Vega 2005))

Figura 1-7: Torno de pedal con volante de inercia. Máquina para fabricar roscas. (Woodbury 1961)

Figura 1-9: Acuñado manual y mediante prensa de balancín de Nicolas Briot (1626) y de Alfred H. Schütte (1913).(a (Wikipedia);b (Fesser 2012); d y e (Aldabaldetrecu 2000).

Figura 1-10: La fuerza motriz para todas las máquinas de la fábrica proviene del eje central situado en el techo, que era accionado por una rueda hidráulica exterior. Las máquinas estaban conectadas al eje por medio de correas de transmisión (Kopplin 2002).

Figura 0-1: Prensa de tornillo para punzonado y corte de metales (Holtzapffel 1852).

Figura 0-2: Troqueles Patentados por Marc Lariviere (1825) y Julius Jefferys (1836) (Holtzapffel 1852). Respirador de Jeffrey (Cortesía de Trustees, the Science Museum).

Bibliografía

Alfonso X El Sabio, *Los libros del ajedrez, de los dados y de las tablas*, 1283.

Fesser, R. T. (2012). *Historia de una Onza: Un periplo de trescientos años*. [Consulta: Noviembre del 2012]. Disponible en:
<http://www.numismaticodigital.com/noticia/6117/Articulos-Numismatica/Historia-de-una-Onza:-Un-periplo-de-trescientos-anos-l.html>

Kopplin, J. (2002). *An Illustrated History of Computers*. [Consulta: Noviembre de 2012].
Disponible en:
<http://www.computersciencelab.com/ComputerHistory/History.htm>

Colaboradores de Wikipedia. *Ceca*. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2013 [Consulta: Noviembre del 2012]. Disponible en:
<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ceca>.

Vega,E. (2005). *The Woodturning Lathe: A Brief History*. [Consulta: Noviembre del 2012].
Disponible en:
http://www.highlandwoodworking.com/woodnews/december_2005/employee_contribution.htm

Watson, A. A. (1994) *Country furniture*, New York, NY: Lyons & Burford.

Woodbury, R. S. (1961) *History of the lathe to 1850; a study in the growth of a technical element of an industrial economy*, Society for the History of Technology Monograph series, Cleveland,,: Society for the History of Technology.