



Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Ingeniería Mecánica y de
Materiales



*Análisis y procesado tecnológico del modelo
sólido de una pieza para determinar sus
Elementos Característicos de Mecanizado.*

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Santiago C. Gutiérrez Rubert

Dirigida por:
Pedro Rosado Castellano

Valencia, 2007

Planteamiento y resumen de la Tesis

Una de las primeras etapas en la Planificación de Procesos asistida por ordenador, para procesos de mecanizado por arranque de material, consiste en identificar las zonas de material a eliminar en el bruto de partida para generar la pieza. El resultado es un conjunto de entidades llamadas: Elementos Característicos de Mecanizado, que tienen una clara relación con las operaciones de mecanizado.

Al procedimiento de obtención automática de estas entidades se le denomina: reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado (AFR, Automatic Feature Recognition), en el que partiendo del modelo 3D del bruto y de la pieza se establecen las entidades de trabajo adecuadas (Elementos Característicos de Mecanizado). Estas entidades contienen la información necesaria para poder llevar a cabo una Planificación de Procesos automática. A su vez, la información se va completando y ampliando a medida que se avanza en las etapas de la Planificación.

En la Tesis se plantea el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado como una de las primeras etapas de la Planificación de Procesos, y que permite el enlace con el diseño asistido por ordenador. Este reconocimiento debe tener un planteamiento dinámico, ofreciendo distintas opciones. Su solución no debe ser una entrada estática, prefijada, para el resto de etapas de la Planificación. El proceso de reconocimiento está fuertemente influenciado por conceptos y decisiones de índole tecnológico (tipos de herramientas, movimientos característicos de los procesos, influencia del corte vinculado, ...), que lo guían y que permiten obtener resultados válidos en la aplicación destino: el mecanizado.

Atendiendo a este planteamiento, la Tesis ofrece una solución general y completa al proceso de reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado, teniendo en cuenta a los llamados procesos convencionales (torneado, fresado, limado, rectificado, etc.). La solución propuesta no se restringe a piezas prismáticas, trabaja con cualquier superficie regular (superficies planas, cilíndricas, cónicas, tóricas y esféricas) dando solución a uno de los principales problemas existentes en el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado, la intersección/interacción entre ellos. Para conseguirlo, se trabaja con modelos 3D en formato B-Rep (Boundary Representation; Representación por Límites) acorde a la norma ISO 10303, apoyándose en la relación de concavidad/convexidad presente entre las superficies de los modelos de partida.

Estos conocimientos tecnológicos se aplican en la operativa seguida, destacando la extracción de volúmenes válidos en el proceso de mecanizado destino, la obtención de al menos una herramienta que permita la eliminación del volumen en ese proceso, la comprobación de la accesibilidad en la zona de trabajo para generar la geometría adecuada, así como la accesibilidad a la zona de trabajo a través del resto de geometría de la pieza. Una vez comprobados estos conceptos, queda garantizado que la pieza podrá ser fabricada.

La solución obtenida es múltiple, ya que de una forma sistemática se comprueba con que proceso de mecanizado puede eliminarse cada uno de los volúmenes (incluyendo existencia de herramienta y acceso). A su vez, se ofrecen alternativas tanto en el perfil de la herramienta necesario para su eliminación, como en la orientación de la misma respecto al acceso.

Una característica importante en el método propuesto en la Tesis, hace referencia al modo de extracción de los volúmenes. Se busca que el volumen obtenido pueda eliminarse con una única herramienta, una única orientación y no se produzca un cambio en el Plano de Trabajo, buscando además, que su tamaño sea el mayor posible. Se evita dar soluciones que se correspondan con un mecanizado de superficies esculpidas, mecanizado 3D, que no tienen nada que ver con el concepto y uso de los Elementos Característicos de Mecanizado. Es precisamente esta forma de extraer los volúmenes la que soporta la existencia de interacciones entre posibles Elementos Característicos de Mecanizado.

Las estructuras de datos que almacenan el resultado final están especialmente pensadas para un manejo práctico de la información, por ejemplo, para combinar Elementos Característicos de Mecanizado. Permiten una migración directa a la Parte 224 de la norma STEP, dedicada a la definición de un producto basada en Elementos Característicos de Mecanizado para ser utilizado en una Planificación de Procesos automática.

Para constatar la validez de la exposición teórica y su factible realización algorítmica, se han desarrollado los algoritmos principales, comunes a todos los procesos, y aquellos específicos al proceso seleccionado que permitan probar la metodología teórica propuesta sobre cualquier tipo de pieza, sin importar su complejidad geométrica.

Plantejament i resum de la Tesi

Una de les primeres etapes en la Planificació de Processos assistida per ordinador, per a processos de mecanitzat per arrancada de material, consisteix a identificar les zones de material a eliminar en el material de partida per a generar la peça. El resultat és un conjunt d'entitats anomenades: Elements Característics de Mecanitzat, que tenen una clara relació amb les operacions de mecanitzat.

Al procediment d'obtenció automàtica d'estes entitats se li denomina: reconeixement automàtic d'Elements Característics de Mecanitzat (AFR, Automatic Feature Recognition), en el que partint del model 3D del material de partida i de la peça s'establixen les entitats de treball adequades (Elements Característics de Mecanitzat). Estes entitats contenen la informació necessària per a poder dur a terme una Planificació de Processos automàtica. Al seu torn, la informació es va completant i ampliant a mesura que s'avança en les etapes de la Planificació.

En la Tesi es planteja el reconeixement automàtic d'Elements Característics de Mecanitzat com una de les primeres etapes de la Planificació de Processos, i que permet l'enllaç amb el disseny assistit per ordinador. Este reconeixement ha de tindre un plantejament dinàmic, oferint distintes opcions. La seua solució no ha de ser una entrada estàtica, prefixada, per a la resta d'etapes de la Planificació. El procés de reconeixement està fortament influenciat per conceptes i decisions d'indole tecnològic (tipus de ferramenta, moviments característics dels processos, influència del tall vinculat, ...), que el guien i que permeten obtindre resultats vàlids en l'aplicació destí: el mecanitzat.

Atenent a este plantejament, la Tesi oferix una solució general i completa al procés de reconeixement automàtic d'Elements Característics de Mecanitzat, tenint en compte als anomenats processos convencionals (tornejat, fresatge, llimat, rectificat, etc.). La solució proposada no es restringix a peces prismàtiques, treballa amb qualsevol superfície regular (superfícies planes, cilíndriques, còniques, tòriques i esfèriques) donant solució a un dels principals problemes existents en el reconeixement automàtic d'Elements Característics de Mecanitzat, la intersecció/interacció entre ells. Per a aconseguir-ho, es treballa amb models 3D en format B-Rep (Boundary Representation; Representació per Límits) d'acord amb la norma ISO 10303, recolzant-se en la relació de concavitat/convexitat existent entre les superfícies dels models de partida.

Estos coneixements tecnològics s'apliquen en l'operativa seguida, destacant l'extracció de volums vàlids en el procés de mecanitzat destí, l'obtenció del menys una ferramenta que permeta l'eliminació del volum en eixe procés, la comprovació de l'accessibilitat en la zona de treball per a generar la geometria adequada, així com l'accessibilitat a la zona de treball a través de la resta de geometria de la peça. Una vegada comprovats estos conceptes, queda garantit que la peça podrà ser fabricada.

La solució obtinguda és múltiple, ja que d'una forma sistemàtica es comprova que el procés de mecanitzat pot eliminar cada un dels volums (incloent existència de ferramenta i accés). Al seu torn, s'oferixen alternatives tant en el perfil de la ferramenta necessari per a la seua eliminació, com en l'orientació de la mateixa respecte a l'accés.

Una característica important en el mètode proposat en la Tesi, fa referència a la

manera d'extracció dels volums. Es busca que el volum obtingut pugui eliminar-se amb una única ferramenta, una única orientació i no es produïska un canvi en el Pla de Treball, buscant a més, que el seu grandària siga el major possible. S'evita donar solucions que es corresponguen amb un mecanitzat de superfícies esculpides, mecanitzat 3D, que no tenen res a veure amb el concepte i ús dels Elements Característics de Mecanitzat. És precisament esta forma d'extraure els volums la que suporta l'existència d'interaccions entre possibles Elements Característics de Mecanitzat.

Les estructures de dades que emmagatzemen el resultat final estan especialment pensades per a un maneig pràctic de la informació, per exemple, per a combinar Elements Característics de Mecanitzat. Permeten una migració directa a la Part 224 de la norma STEP, dedicada a la definició d'un producte basada en Elements Característics de Mecanitzat per a ser utilitzat en una Planificació de Processos automàtica.

Per a constatar la validesa de l'exposició teòrica i la seua factible realització algorítmica, s'han desenvolupat els algoritmes principals, comuns a tots els processos, i aquells específics al procés seleccionat que permeten provar la metodologia teòrica proposta sobre qualsevol tipus de peça, sense importar la seua complexitat geomètrica.

Approach and summary of the Thesis

In the computer aided process planning for machining processes, one of the first stages consists of identifying the zones of material to eliminate in the raw material to generate the final part. The result is a set of entities called Machining Features, which have a clear relationship with the machining operations.

The procedure of obtaining automatically these entities is named automatic feature recognition (AFR). This procedure starts with the 3D raw material model and the part model, establishing the adequate working entities (Machining Features). These entities contain the necessary information to carry out an automatic Process Planning. At the same time, the information is completed and expanded as the stages of Planning are developed.

In the Thesis an automatic feature recognition is developed, as one of the first stages of the Process Planning, allowing integration with the computer aided design. This recognition should have a dynamic approach, offering different options. The provided solution should not be a static input, pre-established, for the remainder stages of the Planning. The process of recognition is strongly influenced by technological concepts and decisions (tool types, typical processes movements, linked cut influence, etc.) that guide and allow it to obtain valid results in the final application: the machining.

Attending to this approach, the Thesis offers a complete and general solution to the process of automatic feature recognition, keeping in mind so-called conventional processes (turning, milling, filing, grinding, etc.). The proposed solution is not restricted to prismatic parts. It works with any regular surface (cylindrical, conical, flat, toric and spherical surfaces), giving solution to one of the most important problems that exist in the automatic feature recognition, the intersection/interaction among them. In order to obtain it, it works with 3D models in B-Rep format (Boundary Representation) in accordance to the standard ISO 10303, taking into account concavity/convexity relationships among the surfaces of the initial models.

Technological knowledge is applied in the proposed operative, emphasizing the extraction of valid volumes in the process of mechanized destiny, obtaining at least one tool that should allow the elimination of the volume in this process, checking the accessibility in the zone of work to generate the suitable geometry, as well as the accessibility to the zone of work over the rest of geometry of the part. Only the verification of these concepts can guarantee that the part can be manufactured.

The proposal does not obtain a unique solution, since each one of the volumes can be eliminated with different machine processes (including the existence of a tool and accessibility). At the same time, the proposal offers alternative tool profiles and its orientation respect to the accessibility.

An important issue of the proposed method in the Thesis refers to how to extract the volumes. Each obtained volume must be removed with a unique tool, in only one orientation, without changing the working plane and its size must be the major possible. The proposal avoids to give solutions corresponding to sculpture surfaces machining, 3D machining, because they do not have relationship with the use of machining features. Basically, to extract the volumes in the proposed way support interactions among possible machining features.

Final results data are stored in structures especially thought for the management of the information, for example, for combining Machining Features. These structures allow a direct migration to the Part 224 of the standard STEP. This standard is dedicated to the product definition based on Machining Features to be used in an automatic Process Planning.

To verify the validity of the theoretical exposition of the thesis and its feasible algorithmic execution, main algorithms for all the processes are developed, as well as those specific to the selected process. These algorithms have allowed test the proposed theoretical methodology on any part, regardless of its geometric complexity.

Esta Tesis está dedicada a mi esposa e hijos, a los que siento no haberles podido dedicar el tiempo suficiente y a los que espero compensar a partir de ahora.

Deseo agradecer a todos mis compañeros del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación sus ánimos y apoyo, sobre todo en los momentos más difíciles. En especial a mi director de Tesis, por su implicación en este trabajo, ya que sin su ayuda no se habrían podido alcanzar todos los resultados obtenidos.

Contenido.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1. Objetivo de la Tesis	7
2. Enfoque seguido.....	8
3. Organización de la Tesis	10
CAPÍTULO 2. MODELADO SÓLIDO	13
1. Modelos de representación gráfica.....	13
1.1. Núcleos gráficos	18
1.1.1. Consideraciones en su utilización.....	19
2. ISO 10303 (STEP).....	19
3. Representación por límites (B-Rep)	22
3.1. Definición de un modelo sólido en B-Rep.....	22
3.2. B-Rep según la Parte 42 de la ISO 10303.....	23
3.2.1. Geometría	24
3.2.2. Topología.....	28
3.2.3. Esquema.....	30
3.2.4. Ejemplo de utilización de B-Rep para la definición de una pieza.....	31
4. Modelos B-Rep ‘Non-Manifold’	35
5. Geometrías especiales en B-Rep.....	36
CAPÍTULO 3. DEFINICIONES SOBRE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS	39
1. Elemento Característico	40
1.1. Elemento Característico de Diseño	40
1.2. Elemento Característico de Mecanizado	42
1.2.1. Clasificación de Kramer	43
1.2.2. Clasificación de Lin	46
1.2.3. Clasificación ISO 10303-224.....	47
1.2.4. Clasificación de Sridharan y Shah	50
1.2.5. Conclusiones sobre las clasificaciones.....	52
2. Material a eliminar. Concepto de Delta-Volumen	53
3. Operación de mecanizado.....	54
3.1. Mecanizado de superficies esculpidas, 3D ó escultural.....	55
4. Zona y Volumen de mecanizado	57

4.1. Concavidad y Convexidad.....	58
CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE.....	61
1. Técnicas algorítmicas.....	66
1.1. Reconocimiento por coincidencia de patrones en grafos	67
1.2. Reconocimiento por conversión o ‘mapeo’	71
1.3. Reconocimiento a través de lenguajes formales	72
1.3.1. Gramática de grafos	72
1.3.2. Gramática de caracteres	75
1.4. Reconocimiento mediante descomposición en volúmenes	77
1.4.1. Descomposición mediante envolventes convexas (Convex Hull)	77
1.4.2. Descomposición basada en celdas (Cell decomposition).....	79
1.5. Reconocimiento mediante redes neuronales	80
2. Técnicas basadas en conocimientos tecnológicos.....	82
2.1. Razonamiento basado en pistas o reglas (Hint /rule based reasoning).....	83
2.2. Razonamiento basado en las concavidades (Concavity method)	89
2.3. Métodos basados en incrementos en el eje Z.....	95
3. Técnicas híbridas	97
CAPÍTULO 5. RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO EN LOS PROCESOS CONVENCIONALES.....	101
1. Clasificación de los procesos de mecanizado.....	102
2. Elementos Característicos de Mecanizado en el contexto de la Tesis.....	107
2.1. Modelo de información	110
2.2. Irregularidades superficiales microgeométricas.....	112
3. Visión general de funcionamiento del reconocedor.....	113
4. Relación de concavidad/convexidad	118
4.1. Concavidad/convexidad en superficies tangentes.....	120
4.1.1. Relación entre superficies iguales	122
4.1.2. Relación entre superficies distintas	123
4.2. Concavidad/convexidad entre aristas.....	129
4.2.1. Concavidad/convexidad entre aristas no tangentes	131
4.2.2. Concavidad/convexidad entre aristas tangentes	132
4.3. Concepto de ‘vecindad cóncava’ entre superficies.....	133
5. Proceso de obtención de los Volúmenes de Mecanizado.....	134

5.1. Tipos de salientes de material contenidos en una Zona de Mecanizado.....	136
5.2. Algoritmo propuesto para determinar los Volúmenes básicos.....	139
5.3. Obtención de Volúmenes básicos, ejemplos.....	143
5.4. Elección de superficies 'semilla'	149
6. Tipos de herramientas.....	152
6.1. Herramientas de revolución.....	152
6.2. Herramientas planas.....	154
7. Cálculo de los rangos angulares válidos para el eje de la herramienta.....	157
7.1. Estructura de datos para el rango angular.....	158
7.2. Algoritmo propuesto.....	160
7.3. Planos Equivalentes a una superficie	163
7.4. Ejemplo de aplicación del algoritmo	167
8. Construcción del perfil de la herramienta	169
8.1. Superficies 'compatibles'	171
8.2. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Fresado'.....	172
8.2.1. Procedimiento de proyección.....	177
8.2.2. Nueva orientación del eje de la herramienta.....	179
8.2.3. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta.....	180
8.2.4. 'Fresado' apoyado en entidades externas a la Zona de Mecanizado ...	186
8.3. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Rectificado'.....	188
8.3.1. Disposición del eje de giro de la Zona de Mecanizado	189
8.3.2. Construcción del perfil de la herramienta.....	191
8.3.3. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta.....	192
8.4. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Limado'	194
8.4.1. Disposición del eje de la herramienta	196
8.4.2. Construcción del perfil de la herramienta.....	197
8.4.3. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta.....	199
8.5. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Torneado'	201
8.5.1. Disposición del eje de giro de la Zona de Mecanizado	202
8.5.2. Construcción del perfil de la Zona de Mecanizado	202
8.5.3. Determinación del perfil genérico de la herramienta.....	203
8.5.4. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta.....	212
9. Verificación de la accesibilidad a la Zona de Mecanizado.....	214

Índice

9.1. Tipos de accesos.....	215
9.2. Plano de Proyección y Región de Trabajo	219
9.3. Procedimiento de proyección de las superficies.....	220
9.4. Búsqueda de acceso entre las geometrías resultado.....	226
9.5. Consideraciones finales	227
10. Agrupación de Elementos Característicos de Mecanizado	228
10.1. Agrupación por acceso local continuo	229
10.2. Agrupación por acceso local no continuo	231
10.3. Metodología propuesta.....	233
CAPÍTULO 6. PRUEBAS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	237
1. Ejemplo de funcionamiento ante superficies convencionales, no sólo planas .	240
2. Ejemplo de múltiples 'semillas' donde sólo una es válida	242
3. Ejemplo de construcción de perfil de herramienta no estándar.....	243
4. Ejemplo de geometría local decisiva	245
5. Ejemplo de saliente/protusión debida a una superficie Conflictiva Mayor	248
6. Ejemplo de protusión sobre una superficie no plana.....	254
7. Ejemplo de saliente/protusión debida a una superficie Conflictiva Menor	256
8. Capacidades del desarrollo	259
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS... ..	263
1. Aportaciones de la Tesis	265
2. Trabajos y desarrollos futuros	267
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	269

Listado de Figuras.

Figura 1–1. Etapas del Ciclo de Desarrollo del Producto y principales actividades.	3
Figura 1–2. Situación de la etapa 'Feature Recognition' en el contexto de la Tesis.....	5
Figura 2–1. Construcción del modelo de una pieza basado en CSG.	15
Figura 2–2. Pieza y vista en planta de las celdas de la cavidad central.....	15
Figura 2–3. Pieza en B-Rep y conjunto de superficies que la integran.	16
Figura 2–4. B-Rep de la cara plana circular izquierda de una pieza cilíndrica.	23
Figura 2–5. Semicilindro definido según la Parte 42	24
Figura 2–6. Punto de coordenadas μ y ν sobre una superficie cilíndrica.	26
Figura 2–7. Normales Topológicas a las superficies de una pieza.....	28
Figura 2–8. Parte válida del recorte de una superficie.	29
Figura 2–9. Extracto de las entidades (Parte 42) utilizadas para definir una pieza.	31
Figura 2–10. Pieza ejemplo y parte de su código en B-Rep.	32
Figura 2–11. Plano, tramos delimitadores y sistemas de coordenadas asociados.	33
Figura 2–12. Representación alámbrica de una superficie semicilíndrica.....	33
Figura 2–13. Variable lógica del 'EDGE_CURVE' para una línea.....	34
Figura 2–14. Variable lógica del 'EDGE_CURVE' para un círculo.....	35
Figura 2–15. Distinta representación de un cilindro en B-Rep.	37
Figura 2–16. Distinta representación de un toro en B-Rep.	37
Figura 3–1. Elemento Característico 'ranura' y posibles herramientas.	42
Figura 3–2. Estructura principal de clases en la clasificación de Kramer.....	44
Figura 3–3. 'Rectangular_Groove', atributos y tipos.....	45
Figura 3–4. Elemento número '12' de la clasificación de Lin.....	46
Figura 3–5. Elemento número '25' de la clasificación de Lin.....	47
Figura 3–6. Ejemplos gráficos de 'manufacturing_features' de la 'Part-224'.....	49
Figura 3–7. Clasificación para fresado según Sridharan y Shah.....	50
Figura 3–8. Ejemplos de brutos (líneas discontinuas) y Delta-Volúmenes (azul).....	53
Figura 3–9. Ejemplo de mecanizado de superficies libres.	56
Figura 3–10. Ejemplo de Zona de Mecanizado.	57
Figura 3–11. Pieza ejemplo para concavidad.	59
Figura 3–12. Zona de Mecanizado con superficies convexas.....	59
Figura 4–1. Métodos más habituales empleados en el reconocimiento.....	63

Índice

Figura 4–2. Pieza, grafo que la representa y ejemplo de grafo patrón.....	68
Figura 4–3. Elemento Característico ejemplo y ‘predicados’ que lo definen.....	74
Figura 4–4. Ejemplo de descomposición en envueltas exteriores convexas.	78
Figura 4–5. Pieza ejemplo para un reconocimiento basado en pistas.	84
Figura 4–6. Ejemplo de construcción del volumen según Sandiford e Hinduja.....	93
Figura 5–1. Máquina y geometría ejemplo para los procesos tipo ‘Fresado’.	105
Figura 5–2. Máquina y geometría para ‘Rectificado por revolución’.....	105
Figura 5–3. Máquina y geometría ejemplo para los procesos tipo ‘Limado’.....	106
Figura 5–4. Máquina y geometría ejemplo para los procesos tipo ‘Torneado’.	107
Figura 5–5. Pieza en gris con Volumen de Mecanizado en azul.....	109
Figura 5–6. ‘EXPRESS-G’ para un Elemento Característico de Mecanizado.....	111
Figura 5–7. Zona y trayectoria de corte sobre una de sus superficies.	113
Figura 5–8. Metodología general seguida en el reconocimiento.....	114
Figura 5–9. Detalle del paso ‘Analizar los Procesos Tipo’.	115
Figura 5–10. Detalle de ‘Construir perfil herramienta. Verificar accesibilidad’.	117
Figura 5–11. Concavidad/convexidad en pieza simple.	119
Figura 5–12. Superficies cóncavas, ‘S ₅ ’ y ‘S ₃ ’.....	119
Figura 5–13. Superficies convexas, ‘S ₅ ’ y ‘S ₂ ’.....	120
Figura 5–14. Concavidad/convexidad entre dos puntos de una misma superficie....	121
Figura 5–15. Superficies que deben tratarse como una sola entidad.	122
Figura 5–16. Concavida/convexidad entre un plano y un cilindro tangentes.	124
Figura 5–17. Superficies tóricas con presencia de aristas tipo ‘splines’.....	124
Figura 5–18. Superficies tóricas tangentes unidas por una arista ‘Rminor’.....	125
Figura 5–19. Tóricas unidas por una arista circular de valor distinto a ‘Rminor’.	125
Figura 5–20. Superficies tóricas tangentes unidas, una por su arista ‘Rminor’.....	126
Figura 5–21. Tórica y cilíndrica con ejes paralelos, cóncavas.	126
Figura 5–22. Tórica y cilíndrica con ejes paralelos, convexas.	126
Figura 5–23. Tórica y cilíndrica con Plano de Trabajo horizontal.....	127
Figura 5–24. Tórica y cilíndrica cóncavas con Plano de Trabajo vertical.....	127
Figura 5–25. Tórica y cilíndrica convexas con Plano de Trabajo vertical.....	127
Figura 5–26. Superficies tórica y esférica con Plano de Trabajo horizontal.....	128
Figura 5–27. Tórica y esférica con Plano de Trabajo vertical.	128
Figura 5–28. Ejemplos de concavidad entre superficie esférica, cilíndrica y cónica.	128

Figura 5–29. Relación de convexidad entre superficies.....	129
Figura 5–30. Superficies del mismo tipo pero de distintas características.....	129
Figura 5–31. Relación de concavidad/convexidad entre aristas.....	130
Figura 5–32. Convergencia en un mismo vértice de más de tres aristas.....	131
Figura 5–33. Concavidad/convexidad entre aristas no tangentes entre si.....	132
Figura 5–34 Concavidad/convexidad entre aristas tangentes de distinto tipo.....	133
Figura 5–35. Concavidad/convexidad en aristas curvas tangentes.....	133
Figura 5–36. Conjunto de vecinas cóncavas entre si.....	134
Figura 5–37. Volúmenes de Mecanizado para la pieza 'Demo08'.....	135
Figura 5–38. Ejemplo de 'protusiones no compartidas'.....	137
Figura 5–39. Ejemplo de 'protusiones compartidas'.....	138
Figura 5–40. Algoritmo para la generación de Volúmenes básicos.....	141
Figura 5–41. Descomposición ante protusión no compartida en el recorte exterior..	144
Figura 5–42. Descomposición ante protusión no compartida en el recorte interior..	145
Figura 5–43. Descomposición ante protusión compartida entre vecinas cóncavas..	146
Figura 5–44. Descomposición ante protusión compartida sin vecindad (1 ^{er} tipo).....	148
Figura 5–45. Descomposición ante protusión compartida sin vecindad (2 ^o tipo).....	149
Figura 5–46. Parte de una descomposición ante Conflictivas Mayores.....	151
Figura 5–47. Descomposición ante Conflictivas Menores.....	151
Figura 5–48. Secuencia de selección de la superficie 'semilla'.....	152
Figura 5–49. Perfil de una herramienta de revolución.....	153
Figura 5–50. Perfil de una herramienta que no es de revolución.....	155
Figura 5–51. Formas genéricas y ejemplos de variaciones en ellas.....	156
Figura 5–52. Piezas ejemplo para los rangos angulares.....	159
Figura 5–53. Diagrama de flujo para la obtención del rango angular.....	161
Figura 5–54. Perfil/hta. válido para una Zona sin rangos angulares compatibles.	163
Figura 5–55. Restricciones angulares debidas al interior de un cilindro.....	164
Figura 5–56. Puntos y vectores singulares usados para los Planos Equivalentes....	165
Figura 5–57. Planos Equivalentes para un toro y ángulo entre ellos.....	167
Figura 5–58. Pieza ejemplo para rango angular.....	167
Figura 5–59. Orientaciones permitidas para una herramienta de punta esférica.....	169
Figura 5–60. Reorientación del eje de herramienta.....	170
Figura 5–61. Ejemplo de superficies compatibles.....	172

Figura 5–62. Superficies relacionadas con la ‘semilla’ a través de un sólo punto.....	174
Figura 5–63. Compatibilidades e incompatibilidades en el perfil de la herramienta. .	175
Figura 5–64. Algoritmo para la construcción del perfil de la herramienta.....	176
Figura 5–65. Proyección “lineal” de una superficie.	177
Figura 5–66. Proyección “circular” de una superficie.	178
Figura 5–67. Cambio en las orientaciones del eje de la herramienta.	180
Figura 5–68. Construcción de perfil compatible, proyecciones en el punto ‘Pa’.	181
Figura 5–69. Construcción de perfil compatible, proyecciones en el punto ‘Pb’.	182
Figura 5–70. Construcción del perfil, proyecciones en el punto ‘Pa’.....	183
Figura 5–71. Construcción del perfil, proyecciones en el punto ‘Pc’.	184
Figura 5–72. Construcción del perfil, proyecciones en ‘Pc’.....	185
Figura 5–73. Zonas con necesidad de entidades externas para su mecanizado.....	188
Figura 5–74. Alcance de la herramienta en un ‘Rectificado por revolución’.....	189
Figura 5–75. Zonas con planos para un ‘Rectificado por revolución’.....	190
Figura 5–76. ‘Rectificado por revolución’ con herramienta inclinada.	191
Figura 5–77. Alcance y perfil de la herramienta en Zona de Mecanizado ejemplo. .	192
Figura 5–78. Zona de Mecanizado para un ‘Rectificado por revolución’.....	193
Figura 5–79. ‘Proyección de las superficies, perfil y herramienta admisible.	193
Figura 5–80. Protusión en un proceso tipo ‘Rectificado por revolución’.....	194
Figura 5–81. Ejemplo de aplicación de un proceso tipo ‘Limado’.	195
Figura 5–82. Ejemplo de proceso tipo ‘Limado’ en la modalidad de brochado.	195
Figura 5–83. Eje de herramienta ante ‘semilla’ plana.	196
Figura 5–84. Disposición del eje de herramienta ante superficie ‘semilla’ cilíndrica. 197	
Figura 5–85. Zonas de Mecanizado no aptas para un proceso tipo ‘Limado’.	198
Figura 5–86. Efecto de una protusión en un proceso tipo ‘limado’.....	198
Figura 5–87. Ejemplo de Zona de Mecanizado apta para un Brochado.	199
Figura 5–88. Ejemplo de Zona de Mecanizado abierta y válida.....	199
Figura 5–89 Resultado de las proyecciones en los cuatro puntos de la ‘semilla’.....	200
Figura 5–90. Ejemplo de Zona de Mecanizado cerrada y válida.	200
Figura 5–91. Zonas de Mecanizado y herramientas para un tipo ‘Torneado’.	201
Figura 5–92. Situación de ‘convergencia’ o ‘divergencia’ en el perfil reconstruido. .	203
Figura 5–93. Perfiles resultado, herramientas y compatibilidad entre ellas.	204
Figura 5–94. ‘Operación’ en función de la disposición del eje de la herramienta.....	205

Figura 5–95. Herramientas genéricas para un perfil convergente.....	206
Figura 5–96. Ejemplo de perfil con todos los tramos tangentes entre si	207
Figura 5–97. Centrado de la herramienta.....	208
Figura 5–98. Herramienta obtenida con la bisectriz y con la normal a la recta 'A-B'. 209	
Figura 5–99. Perfil que sólo admite solución con la normal a la recta 'A-B'.....	209
Figura 5–100. Algoritmo para obtener la herramienta en un perfil convergente.....	210
Figura 5–101. Perfiles paralelos no compatibles entre si.....	211
Figura 5–102. Obtención de herramientas genéricas en un caso de perfil paralelo..	211
Figura 5–103. Mecanizado de una ranura por revolución. Perfil paralelo.	212
Figura 5–104. Ejemplo de mecanizado de Zona convergente.	213
Figura 5–105. Ejemplo de perfil convergente que toca el eje de revolución.	213
Figura 5–106. Acceso vertical y acceso lateral (horizontal).	215
Figura 5–107. Acceso en un proceso tipo 'Fresado' (a) y en uno 'Torneado' (b).	216
Figura 5–108. Ejemplo de proyección (luces y sombras).....	217
Figura 5–109. Resultado de la proyección para una ranura en 'T'.....	218
Figura 5–110. Ejemplo de proyección "circular", 'Torneado'.	219
Figura 5–111. Ejemplo de proyección "lineal" de superficies.	221
Figura 5–112. Cara, Región de Trabajo y solape entre ambas.....	223
Figura 5–113. Resultado después de aplicar el Paso 1º.....	223
Figura 5–114. Resultado después de aplicar el Paso 2º.....	224
Figura 5–115. Resultado después de aplicar el Paso 3º.....	224
Figura 5–116. Resultado después de aplicar el Paso 4º.....	225
Figura 5–117. Resultado después de aplicar el Paso 5º.....	225
Figura 5–118. Resultado después de aplicar el Paso 6º.....	226
Figura 5–119. Agrupación de Volúmenes en un Brochado.	230
Figura 5–120. Agrupación de Volúmenes en un proceso tipo 'Fresado'.	230
Figura 5–121. Agrupación de Volúmenes para un 'Perfilado'.	231
Figura 5–122. Agrupación de Volúmenes en un posible 'Taladrado profundo'.	232
Figura 5–123. Agrupación de Volúmenes para un posible 'Cilindrado' y 'Planeado'. 232	
Figura 5–124. Agrupación de Volúmenes en una posible 'Ranura pasante'.	233
Figura 5–125. Pasos para agrupar Elementos Característicos de Mecanizado.....	234
Figura 6–1. Pieza ejemplo: 'Cajera_aristas_redondeadas'.	241
Figura 6–2. Pieza ejemplo: 'Cil_paralelos'.	242

Figura 6–3. Perfil de la herramienta para 'Cil_paralelos'.....	243
Figura 6–4. Volumen 'Padre 1' de 'Perfil_especial'.....	244
Figura 6–5. Herramienta '0', tomando como 'semilla' a la superficie '283'.....	244
Figura 6–6. 'Center' y detalle de una de sus partes complicadas.....	245
Figura 6–7. Árboles de solución para 'Center'.....	246
Figura 6–8. Perfiles de herramientas para ciertas zonas de 'Center'.....	247
Figura 6–9. Ejemplo de la ranura en 'T' y de su proyección en un plano.....	247
Figura 6–10. Volumen crítico en 'Clevis22' y listado de Volúmenes padre.....	249
Figura 6–11. Resultado de la descomposición de 'Padre 3' en 'Clevis22'.....	250
Figura 6–12. Volúmenes '27', '33' y '34' de la 'Descomposición 0' en 'Clevis22'.....	251
Figura 6–13. 'Eliminación general de material' número '1' para 'Clevis22'.....	252
Figura 6–14. 'Eliminación general de material' número '2' para 'Clevis22'.....	253
Figura 6–15. 'Eliminación general de material' número '3' para 'Clevis22'.....	253
Figura 6–16. 'Cylinder_with_boss' y árbol de Volúmenes obtenido.....	254
Figura 6–17. Volúmenes '6', '7' y '8' de la descomposición de 'Padre 1'.....	256
Figura 6–18. Líneas de partición para los Volúmenes '6', '7' y '8'.....	256
Figura 6–19. 'Valve' y parte del árbol de sus Volúmenes de Mecanizado.....	257
Figura 6–20. Algunos Volúmenes de la pieza 'Valve'.....	258
Figura 6–21. Resultado sobre 'Valve' con una aplicación comercial.....	259

Listado de Tablas.

Tabla 2–1. Comparación entre CSG y B-Rep	17
Tabla 3–1. Elementos Característicos según 'machining_feature', 'Part-224'	49
Tabla 4–1. 'Predicados' para el lenguaje de restricciones de Yang y Marefat.	74
Tabla 5–1. Relación tradicional de la geometría en las clasificaciones, y propuesta.	103
Tabla 5–2. Criterios y proceso representativo de la clasificación propuesta.	104
Tabla 5–3. Concavidad/convexidad en función de las normales a las superficies.	124
Tabla 5–4. Rangos angulares para las piezas ejemplo.....	160
Tabla 5–5. Valores de intersección y resultados.	162
Tabla 5–6. Valores de los rangos angulares para la Zona de Mecanizado.....	168
Tabla 5–7. Explicación de los pasos del algoritmo de la Figura 5–100.....	210

Capítulo 1. Introducción

El Ciclo de Desarrollo Producto-Proceso es un elemento esencial de cualquier empresa dedicada a la producción de bienes y equipos. El desempeño de esta actividad repercute directamente en el beneficio obtenido. Este Ciclo supone la realización de un conjunto de etapas, entre las que se encuentran, la documentación, el diseño, la planificación de procesos, la planificación de la producción, la fabricación, etc., cuya ejecución influye directamente en su eficiencia y competitividad.

Para la fabricación de una pieza/producto, en un sistema productivo, es necesario un conjunto detallado de instrucciones, en el que se determinan las distintas etapas a realizar. A este conjunto ordenado de información, en el que se establece la secuencia de fabricación, se le denomina *Plan de Proceso*. La Planificación de Procesos, es una de las actividades centrales del Ciclo de Desarrollo Producto-Proceso, encargada de establecer el *Plan de Proceso*.

Para piezas metal-mecánicas, esta actividad es de especial importancia cuando son procesadas por arranque de material, debido a la complejidad, requisitos de calidad, funcionalidad, etc., que se les exige y a la gran influencia que el propio Plan de Proceso tiene sobre estos parámetros. Este tipo de piezas pueden ser directamente el producto final o dar servicio a otros procesos de conformado, como es el caso de los moldes, matrices, herramientas, útiles de amarre, elementos auxiliares, etc. Por lo tanto, de una manera u otra, van a estar presentes en el Ciclo de Desarrollo de la gran mayoría de productos.

Es en la reducción de tiempos, mediante la realización en paralelo de las etapas, donde juega un papel decisivo las prácticas de la Ingeniería Concurrente, otorgando una mayor agilidad y flexibilidad al Ciclo de Desarrollo, a la vez que permite una

integración/colaboración más estrecha.

La ingeniería Concurrente persigue la mejora de indicadores como el 'time to market'. Concepto destinado a cuantificar la eficiencia de una empresa, calculando el tiempo que se tarda desde que se concibe el producto (prácticamente desde su boceto o idea inicial) hasta que es lanzado al mercado. Teniendo en cuenta que está influenciado por parámetros como, el tipo de empresa, y la estrategia y el entorno en el que ésta se encuentra, por citar algunos. Éste y otros conceptos ven incrementada su importancia debido a la configuración actual de las empresas, distribución geográfica, políticas de subcontratación, exigencias a proveedores, respuesta a clientes, etc.

Para reducir los tiempos de cada una de las etapas, se ha introducido la ayuda y automatización a través de sistemas basados en el ordenador, entre los que destacan, los sistemas CAD ('Computer Aided Design', para la parte dedicada al diseño), CAM ('Computer Aided Manufacturing', para la fabricación), CAE ('Computer Aided Engineering', para el análisis), CAPP ('Computer Aided Process Planning', para la planificación de procesos), etc. No todos estos sistemas mantienen el mismo grado de desarrollo, existiendo una gran diferencia, por ejemplo, entre los sistemas CAD, altamente implantados, y los sistemas CAPP, para los que apenas existen herramientas comerciales. Además, para favorecer la necesaria reducción de tiempos, se siguen filosofías de trabajo apoyadas en las nuevas tecnologías de información, que facilitan la colaboración. Todo esto permite abordar la descentralización industrial y deslocalización actual de las empresas.

Los resultados y decisiones que se van tomando en las distintas etapas del Ciclo de Desarrollo Producto-Proceso, condicionan al resto, siendo frecuente las vueltas atrás para cambiar el planteamiento, en función del "conocimiento tecnológico" que se va introduciendo. Para favorecer la interacción entre las etapas del Ciclo de Desarrollo y hacer real un entorno Colaborativo (Ingeniería Colaborativa), deben emplearse unas estructuras de datos adecuadas, y unas técnicas automáticas que traten la conversión y el intercambio de la información necesaria. El uso de aplicaciones o sistemas informáticos no debe limitarse únicamente a llevar a cabo una acción repetitiva y tediosa, sino que debe incluir, de una forma u otra, estos conocimientos tecnológicos que guíen y justifiquen las distintas acciones y decisiones que el sistema va tomando.

Disponer de sistemas, que por su fiabilidad y rapidez de respuesta, permitan tomar decisiones y realimentarse a etapas previas para ajustar cambios y modificaciones, es lo que hace efectiva las prácticas de la Ingeniería Concurrente-Colaborativa. Para lograrlo se necesita una mayor integración entre los distintos sistemas que se usan (CAD, CAM, CAPP,...), y las herramientas para el trabajo distribuido basadas en las tecnologías de la información.

A grandes rasgos, todos los autores coinciden en las etapas que forman parte del Ciclo de Desarrollo. Para contextualizar el conjunto de actividades que se realizan, como están relacionadas, y la situación que ocupa la Planificación de Procesos entre ellas, se ha elegido el modelo de Sormaz et al., [Ref. 99], Figura 1-1.

En el modelo de Sormaz et al., se distinguen tres etapas principales, 'Design', 'Process Planning' y 'Scheduling', que por lógica tienen un orden, pero que admiten, y es deseable aumentarlo, un solape entre ellas que redunde en la reducción del tiempo global. Para hacer efectivo el enlace entre estas tres etapas se incluyen otras dos

etapas, 'Feature Recognition' y 'Resource Planning', en las que se realizan actividades decisivas para una unión adecuada.

En este modelo se incluyen las principales actividades que se llevan a cabo en cada una de las cinco etapas, y aquellas actividades, cuyo resultado generado en una etapa, se necesita en otra. Las actividades que se realizan en cada etapa, se muestran en el interior de cajas rectangulares, Figura 1-1, mientras que las actividades que afectan a más de una etapa, se muestran contenidas en hexágonos.

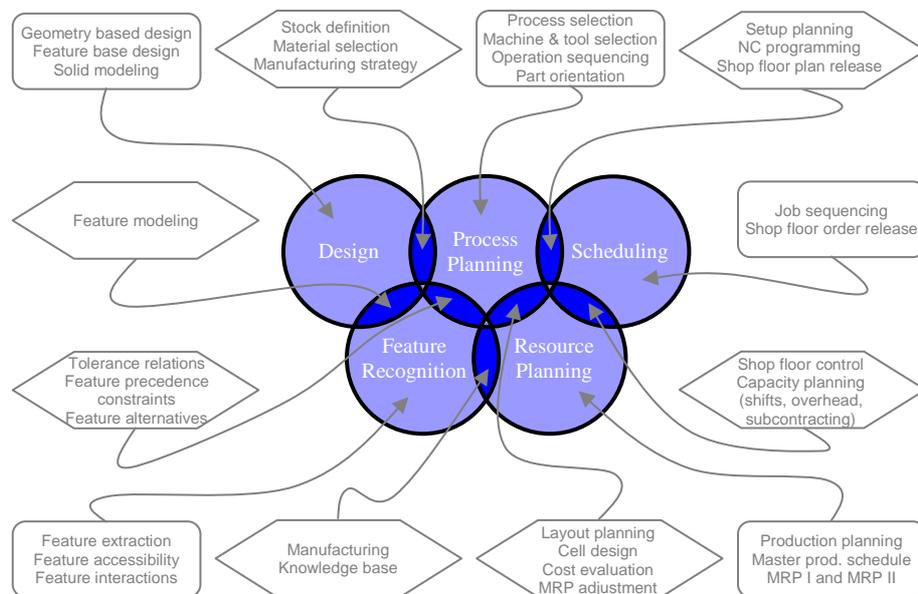


Figura 1-1. Etapas del Ciclo de Desarrollo del Producto y principales actividades.

La etapa denominada 'Feature Recognition' enlaza con la etapa 'Design' y 'Process Planning', pues proporciona la información necesaria, obtenida del diseño, para ser usada en la Planificación de Procesos a través de actividades como, 'la extracción de Elementos Característicos de Mecanizado', 'la obtención de restricciones y precedencias entre ellos', 'la recopilación de tolerancias', etc. La zona de intersección entre la etapa 'Design' y 'Process Planning' indica que hay ciertas actividades, por ejemplo, 'la definición del bruto o material de partida', que no necesitan a la etapa 'Feature Recognition'.

Por su parte, la etapa de 'Resource Planning' sirve de nexo entre 'Process Planning' y 'Scheduling', pues proporciona información sobre 'la planificación de la producción', 'la planificación de requerimientos de material', etc., información obtenida en su mayoría de la Planificación de Procesos. Al igual que en el caso anterior, se necesitan actividades compartidas, como por ejemplo, 'la programación de los controles numéricos'.

También existe un solape entre las etapas 'Feature Recognition' y 'Resource Planning', ocupada por la actividad que genera/actualiza 'la base de conocimientos de fabricación', encargada del intercambio de información entre ambas etapas.

Observando con detalle la Figura 1-1, pueden interpretarse el resto de relaciones entre las etapas y actividades que las ligan. La complejidad del modelo no es más que una traslación de la complejidad real del Ciclo de Desarrollo Producto-Proceso.

La Planificación de Procesos, que es una de las etapas centrales del Ciclo de Desarrollo Producto-Proceso, conlleva una gran complejidad, especialmente para piezas metal-mecánicas. Esta complejidad se debe a la gran cantidad de decisiones a tomar, relativas al material, las máquinas, los utillajes, las herramientas, etc., situación que dificulta su automatización.

Dentro de los niveles de actuación con los que se puede abordar la Planificación de Procesos, se está haciendo referencia a la parte más operativa (Microplan), encargada de producir la pieza. A continuación se muestran las principales actividades a realizar en la Microplanificación, con las que se pretende dar una visión global de la tarea a desempeñar. El número de actividades seleccionadas, e incluso la secuencia en la que se muestran y agrupan, varía en función del criterio seguido por el autor que las presente. En general se encuentran actividades destinadas a:

- Analizar la información geométrica del plano y la documentación.
- Determinar/reconocer los distintos Elementos Característicos de Mecanizado presentes en la pieza (Machining Features).
- Seleccionar máquinas/procesos.
- Determinar configuraciones necesarias, superficies de referencia y sujeción, accesos disponibles, etc.
- Seleccionar/diseñar el utillaje (amarres).
- Determinar la secuencia de máquinas.
- Seleccionar las herramientas y condiciones de corte.
- Calcular las trayectorias/desplazamientos de las herramientas.
- Confeccionar los programas de Control Numérico.
- Etc.

Aunque las actividades se han mostrado siguiendo un orden, su realización no es puramente secuencial, sino que en cualquier momento son necesarios ciclos o vueltas atrás, para seleccionar soluciones que permitan continuar. Disponer de herramientas que las automaticen, y estructuras de datos adecuadas, hace posible asumir estos cambios en tiempo y coste, reduciendo errores, y permitiendo su utilización en estadios intermedios para reevaluar y validar lo tratado. Entre las estructuras de datos necesarias, destaca aquella que sirve de entidad de trabajo a lo largo de todas las actividades de la Planificación de Procesos, el Elemento Característico de Mecanizado.

Gran parte de los autores, para llevar a cabo la Planificación de Procesos, parten de un conjunto de Elementos Característicos de Mecanizado ya establecidos, con una

relación directa entre cada Elemento Característico y una operación de mecanizado bajo un proceso concreto (a falta de unos pocos parámetros que terminen de especificarla). Con este planteamiento el Plan de Procesos queda bastante definido, ya que aspectos como la selección de procesos y operaciones han sido realizados. Esta situación excluye a los Elementos Característicos de Mecanizado de los ciclos y vueltas atrás en busca de soluciones alternativas.

Sin embargo, el concepto de Elemento Característico de Mecanizado propuesto en la Tesis, se corresponde a un estadio previo a la asignación de operación. La operación de mecanizado concreta que se le asocie, dependerá de la información manejada en el resto de actividades de la Planificación. De esta forma no se limitan las soluciones, además, si éstas se obtienen de forma automática, no suponen una penalización en tiempo. El concepto de Planificación de Procesos que se maneja en la Tesis se corresponde con una Planificación abierta, que pueda hacerse de forma automática y contemplando todas las alternativas posibles. Bajo este criterio se ha concebido el proceso de reconocimiento automático y la propia entidad de trabajo: el Elemento Característico de Mecanizado.

De hecho en la Tesis, a diferencia de lo mostrado en el modelo de Sormaz et al., la etapa de reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado (Feature Recognition) está considerada como el nexo obligado entre el Diseño y la Planificación de Procesos, incluido dentro del propio CAPP, como puede verse en la Figura 1-2. Al tratar el reconocimiento (Feature Recognition) como primer paso y preparación de los datos sobre los que trabajará la Planificación de Procesos, no debería imponerse, de entrada, condición alguna que afecte al resto de actividades de la Planificación.

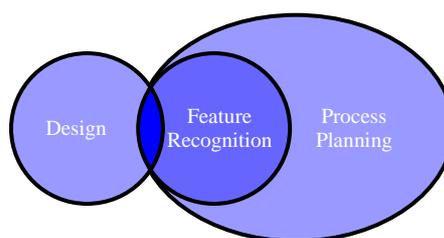


Figura 1-2. Situación de la etapa 'Feature Recognition' en el contexto de la Tesis.

A lo largo de esta introducción se ha dejado patente la necesidad de una automatización e integración de la Planificación de Procesos, en la actualidad, ésta se sitúa a medio camino entre la Planificación completamente manual y la realizada de forma automática (en lo posible), en la que se combina la experiencia y saber hacer del planificador, con la utilización de aplicaciones que ayudan/asisten en determinadas etapas de la misma. Entre estas aplicaciones se encuentran las dedicadas a la selección de herramientas, al cálculo de condiciones de corte, a la programación de trayectorias, etc., en definitiva, todo aquello que requiera la realización de operaciones matemáticas, o simplemente repetitivas, y que sean fáciles de automatizar.

Actualmente no existe la posibilidad de realizar una Planificación de Procesos

completamente automática, ya que no se dispone de técnicas capaces de resolver el problema en toda su magnitud. Sin embargo, los esfuerzos realizados en esta línea son continuos, [Ref. 28]. Se trabaja en entornos interactivos, donde el Plan de Procesos se obtiene a través de un plan maestro (previamente definido). Suele ser bastante habitual un funcionamiento guiado, donde es el usuario quien toma las decisiones en función de las propuestas de la aplicación, y según sus consultas a las bases de datos.

Sin embargo, existen propuestas encaminadas a reducir al máximo la intervención del usuario, en favor de una mayor automatización y una generación completa del Plan de Procesos. Para ello es necesario una representación e interpretación del modelo sólido del producto (la pieza), así como, de los equipos, recursos, utillajes y cualquier otro elemento que pueda involucrarse en el Plan. Es esta representación e interpretación la que introduce un alto grado de complejidad en la automatización, ya que supone desentrañar y aplicar el proceso de razonamiento seguido por un planificador experto.

El trabajo desarrollado en la Tesis se sitúa en el marco de una Planificación de Procesos automática. Concretamente en la interpretación y conversión del modelo geométrico de entrada, a unas entidades que contengan las características de fabricación necesarias para ser utilizadas en el resto de etapas de la Planificación. Esta interpretación de la pieza consiste en su definición en base a unos Elementos Característicos de Mecanizado. Estos Elementos representan unos volúmenes de material a eliminar en el bruto de partida para alcanzar la forma final de la pieza, acompañados de información tecnológica.

Para disponer de una pieza representada en base a unos Elementos Característicos de Mecanizado, pueden seguirse tres caminos:

- Exigir al operario una identificación previa de cada Elemento Característico de Mecanizado que encuentre en el modelo de entrada (modelo 3D de la pieza). Esta situación dota al sistema de subjetividad y de una falta clara de automatización.
- Forzar a un diseño basado en Elementos Característicos de Mecanizado, [Ref. 13], [Ref. 84]. Esto obliga al diseñador a tener conocimientos tecnológicos sobre los distintos procesos de fabricación y a realizar de antemano un Plan de Procesos para la pieza, estableciendo una dependencia entre la fabricación y la forma de modelar geoméricamente. Además, impide el uso de un CAD genérico en la etapa del diseño.
- Reconocer automáticamente los distintos Elementos Característicos de Mecanizado a partir del modelo 3D de la pieza. Esta opción no adolece de los problemas anteriores y es en la que varios autores llevan tiempo trabajando, [Ref. 44], ya que conlleva una gran complejidad.

El primero de los caminos mostrados, es el que tradicionalmente sigue un planificador cuando prepara el Plan de Proceso de una pieza. En este caso, y de manera no ordenada, el planificador a partir de la forma de la pieza, sus conocimientos técnicos y experiencia, determina el conjunto de Elementos Característicos de Mecanizado necesarios para la fabricación de la pieza. Las soluciones alcanzadas conllevan una alta subjetividad, además de no quedar exentas de errores u omisiones.

La realización de un diseño basado en Elementos Característicos de Mecanizado

no evita la subjetividad de la solución, aparte de obligar al diseñador a ser un experto planificador. Para evitar todos estos problemas, los Elementos Característicos de Mecanizado deberían obtenerse de forma automática mediante una aplicación informática, contribuyendo además, a la creación de un verdadero entorno de Planificación automático.

El principal problema que se encuentra en el desarrollo de esta aplicación es trasladar el razonamiento del experto, en este caso el planificador, a unos algoritmos capaces de funcionar sobre piezas con cualquier forma geométrica. Muchas son las técnicas y métodos empleados para la consecución de estos algoritmos, desde soluciones puramente algorítmicas, hasta soluciones en las que se utilizan bases de conocimiento. Las primeras se olvidan casi por completo del componente tecnológico del problema, mientras que las otras realizan búsquedas exhaustivas entre reglas interminables, aplicables a situaciones particulares.

Debe recordarse que, en situaciones reales, existen multitud de Elementos Característicos de Mecanizado fácilmente asociables a operaciones, pero que por circunstancias como la interacción entre estos Elementos, complican enormemente esta asociación, o incluso la decisión sobre su posible fabricación.

Además, no hay que olvidar que las piezas reales suelen requerir la aplicación de más de un proceso de mecanizado. Por este motivo, no resulta conveniente limitar la obtención de los Elementos Característicos de Mecanizado a un solo proceso.

1. Objetivo de la Tesis

El objetivo es establecer una sistemática de actuación para obtener de forma automática los distintos Elementos Característicos de Mecanizado que puedan existir en una pieza, tomando como entrada su modelo geométrico en B-Rep (Boundary Representation). Esta sistemática debe ser aplicable a cualquier proceso de mecanizado por arranque de material.

Durante el proceso de obtención o reconocimiento, la solución no debe quedar afectada por la complejidad geométrica de la pieza, por la existencia de Elementos Característicos de Mecanizado incompletos, o por la intersección entre Elementos Característicos, debiéndose contemplar todos los tipos de superficies regulares, planas, cilíndricas, cónicas, tóricas, esféricas, con la única limitación de no incluir superficies esculturales ó esculpidas.

Además, la solución no debe quedar limitada al reconocimiento de unos pocos Elementos Característicos de Mecanizado del tipo, agujero, escalón, cajera con islas, chaflán, etc., ni impedir la asociación de los Elementos Característicos de Mecanizado obtenidos en busca de otros más complejos. Debe garantizarse en todo momento, que cada Elemento Característico de Mecanizado que se obtenga, sea del tipo que sea, pueda ser mecanizado.

El resultado, los datos de salida, deben poderse trasladar fácilmente a un formato estándar, con la información necesaria para ser utilizados en el resto de etapas en la planificación, permitiendo en cualquier punto de ésta, una validación a través de llamadas a los procedimientos y funciones utilizados.

Para facilitar la consecución del objetivo general se establecieron unos objetivos parciales, que son:

- Manejo de los datos, geométricos y topológicos, de la representación de una pieza en B-Rep según el estándar ISO 10303 (STEP).
- Clasificar los distintos procesos de mecanizado por arranque de material, en función de sus características tecnológicas y las distintas geometrías realizables con cada uno.
- Definir, desde el punto de vista de la fabricación, el concepto de Elemento Característico de Mecanizado, identificando aquellos aspectos que maneja un planificador (experto), cuando se enfrenta a una pieza, para determinar si es posible su fabricación y cómo hacerlo (identificar operaciones y procesos).
- Evaluar la técnica de programación a emplear (orientada a objetos, sistema experto, red neuronal, etc.) en función de los datos a manejar y de la clasificación de procesos realizada, para automatizar el reconocimiento de los Elementos Característicos de Mecanizado. Esto supone decidir las herramientas software a utilizar, por ejemplo, 'kernel' gráfico comercial (tipo, Acis, Parasolid o Granite), librerías gráficas (OpenGL), acceso a datos STEP, ...
- Desarrollar la sistemática propuesta realizando el software necesario para comprobar su funcionamiento, por lo menos, dada la magnitud del proyecto, para los procedimientos y funciones principales del proceso de reconocimiento.

Para alcanzar estos objetivos, ha sido necesario desarrollar un formato geométrico y topológico propio, definiendo las entidades que lo forman (clases) y la relación entre ellas, así como construir una aplicación informática que convierta de STEP al formato propio. A su vez, para facilitar la comprobación y análisis de resultados, se ha desarrollado una aplicación interfaz para una representación visual de los mismos.

2. Enfoque seguido

Analizando el razonamiento, que sobre el plano de una pieza aplica un planificador para determinar los volúmenes de mecanizado, se observa que va delimitando, una a una, distintas partes geométricas en la pieza para identificarlas como los distintos volúmenes a mecanizar. Para lo cual, y centrándose en una de estas geometrías locales, debe pensar en una máquina en concreto, en los tipos de movimiento que permite, la orientación del eje de la herramienta disponible y el tipo de sujeción, entre otros.

A su vez, el volumen quedará validado, si al ser eliminado confiere a la zona de mecanizado la forma geométrica correcta. Para que esto suceda, la herramienta que vaya a utilizarse debe tener el perfil adecuado. El planificador va examinando aquellos detalles que afectan directamente a la forma de la herramienta, como transiciones entre superficies, anchuras, alturas, salientes, ..., y va mentalmente, buscando una herramienta "genérica" (sin entrar en detalles propios de una selección de herramientas, tal y como se realiza en una de las etapas posteriores de la Planificación de Procesos), que sea capaz de satisfacer esas restricciones, comprobando también la accesibilidad a la zona de trabajo. Debe recordarse, que la

forma de la herramienta capaz, puede no corresponder a una herramienta estándar y necesitarse, en según que geometrías, una “herramienta de forma”.

Evidentemente los tipos de máquinas, de herramientas, y en definitiva las distintas configuraciones conocidas por el planificador, van pasando por su mente de forma no secuencial, como posibles opciones para la eliminación de ese volumen de mecanizado. Son distintas soluciones a tener en cuenta para completar la pieza.

Uno de los aspectos, que se mantiene como máxima durante la inspección de la forma geométrica de la pieza, es su fabricabilidad, representada ésta como la realización factible de todos y cada uno de los volúmenes en los que se descompone la pieza. Para ello, se comprueba que las zonas de trabajo son accesibles, que existe una herramienta adecuada, y que las características y configuración de la máquina a utilizar lo permiten.

La forma en la que el planificador se inclina por una u otra solución responde a pequeñas pistas tecnológicas, extraídas de la observación de la geometría de la pieza. El orden en que le llegan es impredecible, pero en caso de encontrarse ante un volumen no realizable, habrá pasado por todas las posibles opciones, o debería haber pasado.

El enfoque seguido en la Tesis mantiene un razonamiento similar: *determinar un volumen de mecanizado teniendo en cuenta un proceso, una forma válida de herramienta, y su accesibilidad a la zona de trabajo.*

La diferencia con el planificador estriba en que éste usa una serie de pistas para reconducir su búsqueda, mientras que en la solución presentada se realiza una búsqueda exhaustiva y guiada para no descartar ninguna posible solución.

Estudiando el comportamiento de un planificador sobre varias piezas ejemplo, pueden distinguirse dos etapas:

- Una primera, donde se obtienen los volúmenes de material a eliminar, manejando restricciones geométricas y espaciales, determinadas casi exclusivamente por los grados de libertad de la máquina, el perfil que debería tener la herramienta y la zona de acceso disponible para su eliminación.
- Una segunda etapa, donde entran aspectos relacionados con los acabados superficiales, las capacidades de máquina, las imposiciones tecnológicas o cualquier otro tipo de consideración que haga abandonar una solución y decidirse por otra. Es en esta segunda etapa donde se determina la operación de mecanizado a realizar, ya que esta elección implica unos resultados y acabados concretos.

La Tesis se centra en la primera etapa, donde se obtendrán de forma automática, todos aquellos Volúmenes (válidos) que físicamente puedan ser eliminados por mecanizado, aportando los rangos o condiciones bajo los cuales pueden eliminarse (referentes a la herramienta, el acceso y la forma de atacar las superficies que delimitan el volumen), para que el resto de etapas de la planificación trabaje sobre ellos y vaya concretando aspectos como, el proceso a utilizar, las operaciones sobre ese proceso, la herramienta específica que se usará en cada operación, el amarre adecuado para poder acceder, las condiciones de corte, etc.

3. Organización de la Tesis

La organización adoptada en el documento (Tesis) sigue la lógica de presentación de un trabajo de investigación, en el que de una forma progresiva se va introduciendo al lector al cuerpo principal del mismo, dejando para el final el apartado correspondiente a pruebas y comprobaciones. En el cuerpo principal y de una forma ordenada, se expone el trabajo llevado a cabo.

A continuación se describen brevemente los distintos capítulos que conforman la Tesis, organizados según se ha comentado:

- Capítulo 1. 'Introducción'. Se corresponde al capítulo en curso, en los puntos anteriores a éste, se ha realizado una primera toma de contacto con el tema de trabajo objeto de la Tesis, realizando una breve puesta en antecedentes y descripción del ámbito de aplicación y utilidad del mismo. Se aprovecha para contar lo que se espera del trabajo hecho en la Tesis, expresándolo en forma de objetivos.

- Capítulo 2. 'Modelado sólido'. Se dedica este capítulo a los conceptos base en los que se apoya la Tesis, destacando aquellos de especial interés y que conviene recordar durante su lectura.

- Capítulo 3. 'Definiciones sobre Elementos Característicos'. Capítulo similar al anterior, con la diferencia de que éste se centra sobre la entidad núcleo de la Tesis, el 'Elemento Característico', concretamente el de Mecanizado. Otra diferencia con el capítulo anterior, es la aparición de comentarios y enjuiciamientos sobre lo que en él se explica en relación con el resto de la Tesis.

- Capítulo 4. 'Estado del Arte'. Permite ver la evolución que ha sufrido el tema tratado en la Tesis y el estado en el que se encuentra. Para lo cual se han examinado los artículos y documentos de los principales investigadores que en él trabajan. Se realiza un repaso de las técnicas empleadas para resolver el problema del reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado, desde los comienzos, hasta la actualidad, citando expresamente los inconvenientes que presentan y las ventajas que aporta cada una.

- Capítulo 5. 'Reconocimiento automático en los procesos convencionales'. Cuerpo principal de la Tesis, en él se dedican los primeros puntos a explicar aquellos conceptos necesarios con el enfoque exclusivo de la metodología propuesta en la Tesis, así como a proporcionar una visión general de funcionamiento, descompuesta en pasos, y que dará pie al resto de puntos del capítulo. Puesto que para el reconocimiento de Elementos Característicos de mecanizado, se manejan modelos gráficos en tres dimensiones, se ha prestado especial cuidado en acompañar a cada definición y explicación de una figura que facilite su seguimiento.

- Capítulo 6. 'Pruebas y discusión de resultados' Se destina este capítulo a mostrar varios ejemplos que corroboren la exposición teórica, destacando explícitamente que problemas se quiere evidenciar en cada uno y como se resuelven. En alguno de ellos se establece una pequeña comparativa con la solución aportada por una de las aplicaciones comerciales a las que se ha tenido acceso (y que incluye a uno de los pocos reconocedores que se usan a nivel comercial). Se dedica el último punto del capítulo para enumerar las partes más relevantes del desarrollo práctico realizado. Desarrollo que, en su conjunto, constituye la aplicación sobre la que se ha ejecutado el proceso de reconocimiento para las piezas mostradas los ejemplos.

- Capítulo 7. 'Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros'. Capítulo en el que se presentan las conclusiones y se recopilan las principales aportaciones del trabajo expuesto en la Tesis. Se exponen también algunas futuras líneas de trabajo relacionadas con él. Líneas que permiten aprovechar la labor realizada, en forma de aplicaciones, algoritmos y estructuras de datos.

Finalmente se incluyen las referencias bibliográficas citadas en la Tesis, siguiendo el formato 'Harvard' con pequeñas modificaciones.

Capítulo 2. Modelado sólido

En este capítulo se realiza un breve repaso sobre aquellos aspectos del modelado sólido directamente relacionados con la Tesis, que conviene recordar para su seguimiento y puesta en antecedentes.

Como se verá a lo largo de los puntos del capítulo, se presta especial atención a la representación por límites de sólidos, B-Rep (Boundary Representation), y más concretamente al definido en la norma ISO 10303, pues es el formato empleado. Puesto que los datos de entrada siguen el formato B-Rep, se dedican los dos últimos puntos del capítulo a presentar y justificar ciertas situaciones 'especiales' que se pueden encontrar en B-Rep, que complican ligeramente su tratamiento informático.

Se aprovecha para recordar y definir conceptos tan importantes como, geometría y topología, que serán utilizados constantemente a lo largo de la Tesis.

1. Modelos de representación gráfica

Los datos de entrada para una Planificación de Procesos automática son los modelos sólidos del material de partida y de la pieza a obtener. Un modelo sólido, en el contexto que nos ocupa, es una representación geométrica de un objeto tridimensional, físico o en proyecto, en formato digital.

Los sistemas de modelado y representación gráfica, sus fundamentos matemáticos, algoritmos y aplicaciones, etc. representan en si mismos una disciplina para el estudio y desarrollo. Puede encontrarse información ampliada sobre ella en el

informe "Solid Modeling" de Rossignac y Requicha, [Ref. 93].

El sistema de modelado sólido, también llamado modelador sólido, es el programa informático que da facilidades para almacenar y manipular las estructuras de datos que representan a objetos individuales o ensamblados. La forma más habitual para la creación de estas representaciones es a través de un interfaz gráfico de usuario (GUI, Graphic User Interface), existente en todas las aplicaciones CAD/CAM comerciales.

En todas las técnicas de modelado sólido se encuentran presentes, en mayor o menor medida, las siguientes propiedades y características:

- Capacidad de representación. Tipos diferentes de sólidos representables y complejidad alcanzable en éstos.
- Validez de los modelos. Desde el punto de vista de alternativas que se tienen en la estructura del modelo. Validez física del modelo tras aplicarle alguna operación intermedia y posibilidad de comprobar esa validez en estadios intermedios.
- No ambigüedad del modelo. Cualquier representación válida del modelo debe converger al mismo modelo.
- Representación única. Si un modelo tiene, o no tiene, una única representación.
- Tipo de operaciones de construcción del modelo permitidas.
- Requerimientos de almacenamiento. Si es conciso o extenso.
- Facilidad computacional. Referente a su representación visual y a las operaciones que sobre el modelo se hagan.

Las aplicaciones comerciales utilizan básicamente tres técnicas en la representación de modelos sólidos:

Geometría construida por sólidos, CSG (Constructive Solid Geometry)

Define un conjunto de sólidos básicos, como el paralelepípedo, cilindro, esfera, prisma triangular, ..., y los compone en la localización y orientación deseada. Las combinaciones se realizan a través de operaciones lógicas tipo, unión, intersección, diferencia, etc. (Figura 2-1).

Entre sus ventajas destacan:

- Al utilizar sólidos básicos bien formados (válidos y correctos), el modelo sólido en estadios intermedios, siempre representa un objeto sólido completo.
- Cada árbol de operaciones CSG representa a una única pieza.
- Es un formato que permite un almacenamiento muy eficiente.

Como desventajas cabe citar:

- Una misma pieza puede ser representada por más de un árbol CSG.
- Al ser difícil tener sólidos básicos que representen a superficies no

regulares, resulta complicado trabajar con ellas.

- Es un formato en el que se emplea mucho tiempo de calculo para su representación visual, debido al tiempo que consumen las operaciones intermedias hasta alcanzar la forma final.

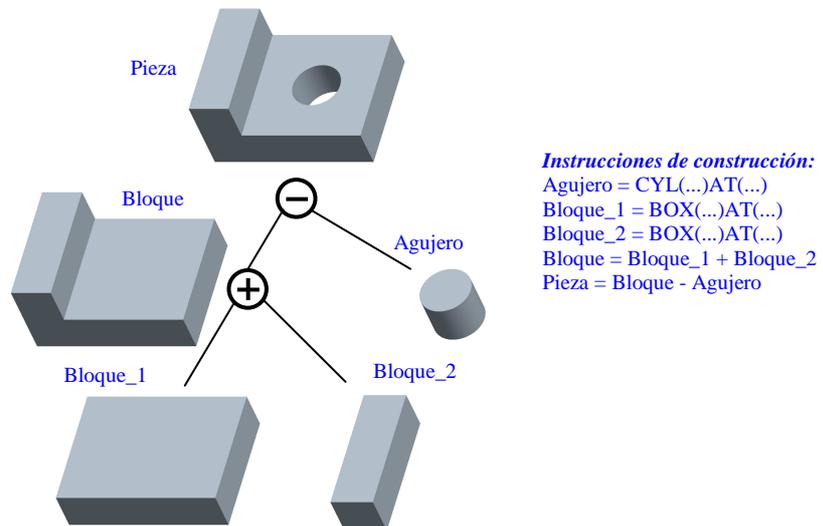


Figura 2-1. Construcción del modelo de una pieza basado en CSG.

Celdas volumétricas, VOXELLS (Volumetric Cells)

Realiza una partición del espacio en una malla de celdas, marcando cada una de las ocupadas por el modelo. Las vacías también suelen marcarse como tal. En la Figura 2-2, se muestra una pieza y la división en celdas del hueco existente en ella.

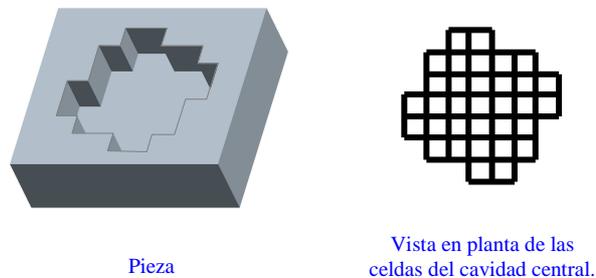


Figura 2-2. Pieza y vista en planta de las celdas de la cavidad central.

Las ventajas de este método son:

- La correcta correspondencia entre representación y realidad (bien

formado).

- El modelo resultante es completo, posee toda la información necesaria para el estudio del objeto representado.
- Es más eficiente respecto al tiempo que se consume en representar por pantalla o en realizar operaciones sobre él.

Sus desventajas son:

- No se trata de una representación general que sirva para cualquier objeto de su clase. Por ejemplo, ante superficies complejas y transiciones suaves se ve restringido.
- Se tiene limitado el tamaño de los objetos representados por cuestiones de almacenamiento, afectando a su resolución.
- Los objetos modelados con esta técnica presentan transiciones no suaves que dependen de un parámetro, relacionado con el tamaño de la celda, que indica el grado de suavizado.

Representación por límites, B-Rep (Boundary Representation)

Representa una pieza como un conjunto de caras que, unidas entre si, constituyen la "piel" del sólido modelado. Para conseguirlo define entidades como, superficies, vértices, filos, ..., que se corresponden con los límites, tanto externos como internos, del objeto a modelar, identificando la relación entre ellos (Figura 2-3).

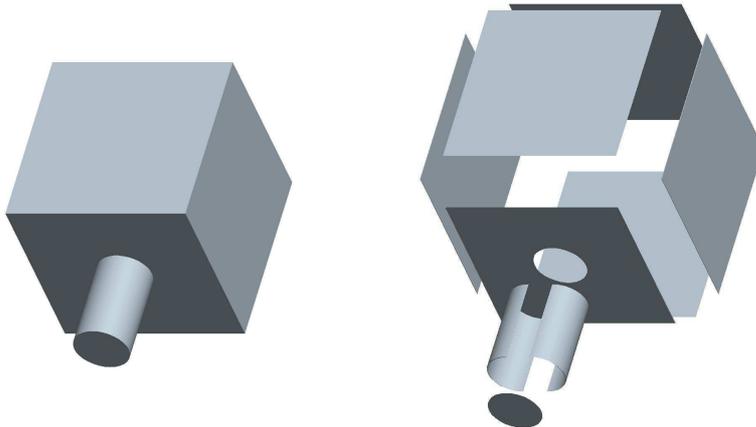


Figura 2-3. Pieza en B-Rep y conjunto de superficies que la integran.

Ventajas:

- Se trata de una representación que permite modelos "bien formados".
- El modelo es completo.
- Posee características eficientes desde el punto de vista del almacenamiento y de la representación visual en pantalla.

- Permite trabajar con superficies paramétricas, posibilitando el uso de superficies no regulares.
- Posee una gran variedad de métodos de construcción de los modelos.

Inconvenientes:

- Es difícil establecer la validez del modelo en estadios intermedios de creación.
- Una misma pieza puede venir representada por estructuras B-Rep diferentes.
- No tiene un comportamiento eficiente en lo que respecta a las operaciones que sobre los modelos con este formato se realicen.

Las dos técnicas más empleadas por las aplicaciones CAD/CAM comerciales son CSG y B-Rep. Normalmente estas aplicaciones usan las dos para compensar sus carencias y aumentar las posibilidades. En la Tabla 2–1 puede verse una comparación de las propiedades más significativas entre ambas.

CSG	Particularidad	B-Rep
Si	Estructura de datos simple. Fácil manejo	No
No	Rápida visualización gráfica (interactividad)	Si
Si	Integridad del modelo en estadios intermedios	No
No	Amplia variedad de operaciones posibles	Si
No	Permite operaciones locales	Si
No	Facilidad para comparar dos sólidos distintos	Si
Si	Facilidad para modificar la forma del sólido	No
No	Requiere mucho espacio de almacenamiento	Si

Tabla 2–1. Comparación entre CSG y B-Rep.

Como puede deducirse de la tabla anterior, y estableciendo una similitud con los lenguajes de programación, un modelo basado en CSG puede compararse a un lenguaje de programación interpretado, mientras que uno basado en B-Rep se corresponde a uno compilado.

El formato de representación gráfico utilizado en la Tesis es B-Rep. Entre otras, las causas de su elección son, la amplia variedad de operaciones posibles, la no existencia de restricciones geométricas en la representación de piezas, y la posibilidad de trabajar sobre partes concretas de la geometría (por ejemplo, sobre una superficie específica o tramo).

1.1. Núcleos gráficos

Para el trabajo con los modelos sólidos (definición, operación, manipulación, ...) las aplicaciones CAD/CAM utilizan los llamados núcleos gráficos (kernels), [Ref. 85]. Un núcleo gráfico es un conjunto de algoritmos que pueden ejecutarse desde una aplicación o programa de usuario, a través de clases, procedimientos, funciones, variables, estructuras, etc. Los algoritmos permiten crear el modelo y realizar operaciones sobre él, intersectar, abstraer, combinar, realizar acuerdos, transiciones, etc. Normalmente un núcleo gráfico utiliza su propio formato de almacenamiento de datos, al que se le suele denominar de la misma forma.

Entre los núcleos gráficos más utilizados, tanto en aplicaciones CAD/CAM como en los reconocedores automáticos de Elementos Característicos de Mecanizado, se encuentran los siguientes:

- ACIS

Está formado por un conjunto de clases C++, procedimientos y funciones, que con una arquitectura orientada a objetos integra el modelado alámbrico, el modelado de superficies y el modelado sólido. Los modelos sólidos cumplen con B-Rep, aunque permite trabajar con topologías que no se ciñen estrictamente a un B-Rep correctamente definido, [Ref. 22].

Este núcleo gráfico ha sido utilizado en algunas aplicaciones destinadas al reconocimiento de Elementos Característicos, por ejemplo, en la aplicación llamada "Mediator", [Ref. 31], descrita en la Tesis de Lim,T., [Ref. 67], y en el método para una descomposición en volúmenes basada en células de Woo,Y., [Ref. 109].

- Parasolid

Se trata de un modelador gráfico, que basado en un correcto B-Rep, soporta modelado sólido y modelado por células, e integra modelado de superficies libres y chapa. Parasolid contiene cientos de funciones orientadas a objetos especialmente diseñadas para el modelado sólido, [Ref. 102].

Parasolid se ha utilizado como núcleo gráfico en distintos trabajos (y Tesis) relacionados con el reconocimiento automático, como los realizados por Han, J., [Ref. 41] y [Ref. 45].

- PADL-2

Es un sistema de modelado sólido desarrollado a partir de los trabajos de investigación de la Universidad de Rochester (EEUU). Los ficheros PADL se asemejan a las estructuras utilizadas en LISP, y en ellos se define el árbol CSG para la descripción de una pieza. Puede encontrarse una descripción técnica de este sistema en el artículo de Brown,C.M., "PADL-2: a technical summary", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 2, No. 2, pp. 68-84, March 1982.

PADL-2 ha sido usado por investigadores como, Han, J., [Ref. 42], en su IFF (Integrated Feature Finder), y Vandenbrande & Requicha, [Ref. 103].

- Otros núcleos gráficos existentes son: Granite, Cas.cade, Romulos, Cadkey, Pelorus, Richoh, ...

Independientemente del núcleo gráfico utilizado, los datos del modelo se pueden

almacenar en distintos formatos como son, STEP, IGES, ACIS, PARASOLID BINARY, VDAFS, etc. Por lo general, cada aplicación CAD comercial posee su propio formato de almacenamiento de datos, llamado nativo, y ofrece la opción de exportar o importar en otros formatos. Cuando el formato de datos no es propiedad de una compañía concreta se le llama “formato neutro”. Entre los que destacan el formato IGES (ANSI) y el formato STEP (ISO).

La principal desventaja de un formato nativo es su ámbito de aplicación, ya que queda restringido al software de la compañía propietaria, o a la utilización intermedia de un conversor (no siempre disponibles, ni totalmente eficaces). Sin embargo, la utilización del conversor garantiza el mantenimiento de todos los datos (geométricos y topológicos), así como las operaciones utilizadas durante la creación del modelo. Al disponer de esta información se pueden editar las geometrías parciales, para modificar el diseño o añadir la geometría necesaria en el módulo CAM, por ejemplo.

Por otra parte, la gran ventaja al utilizar un formato neutro es su interpretación desde diferentes sistemas CAD/CAM. Sin embargo, los formatos neutros sólo contienen la definición final del modelo, no permitiendo acceder a las geometrías intermedias utilizadas durante su creación. Dicho de otra forma, no soportan la información histórica de creación/uso de Elementos Característicos, solo transportan datos geométricos y topológicos, con lo cual no se puede acceder a los Elementos Característicos del Diseño (ranura, cajera, agujero, chaflán, etc.). La pieza queda como un único elemento sin geometrías locales en las que apoyarse.

1.1.1. Consideraciones en su utilización

La utilización de un núcleo gráfico comercial para el desarrollo de un reconocedor de Elementos Característicos de Mecanizado conlleva algunos aspectos importantes a considerar. Por una parte, la facilidad de creación y manejo de las geometrías, favoreciendo un desarrollo rápido. Por otra parte, al tratarse de librerías comerciales, formadas por un conjunto cerrado de procedimientos especialmente pensados para el diseño de modelos, es muy difícil su utilización en otro tipo de actividades.

Una solución alternativa es la utilización de núcleos gráficos abiertos, para los que se dispone del “código fuente”. Sin embargo, se pierde un tiempo considerable adaptándolo a las necesidades específicas, pues sus procedimientos y funciones se han desarrollado con una perspectiva general, no siempre satisfactoria para aplicaciones muy concretas como es el caso del reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado.

En la parte experimental de la Tesis se optó por no utilizar núcleo gráfico alguno, desarrollando los procedimientos y clases necesarias para implementar la solución propuesta. Estableciendo de esta forma un control total sobre la funcionalidad del trabajo realizado.

2. ISO 10303 (STEP)

La norma ISO 10303, conocida como STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data), es un estándar internacional, interpretable por el ordenador, para la

representación e intercambio de datos de un producto. Su ámbito de aplicación abarca todas las etapas a lo largo del ciclo de vida de un producto (concepción, elaboración y gestión de un producto). Las descripciones que ofrece son modelos de información que sirven para capturar el significado de requerimientos industriales, proporcionando estructuras de datos estandarizadas, especialmente pensadas para su manejo desde aplicaciones informáticas.

Este estándar ha sido incorporado por las aplicaciones comerciales de ingeniería, principalmente en lo referido a la creación e intercambio de modelos sólidos, siendo su uso y funcionamiento transparente al usuario.

STEP debe verse como una tecnología para la representación de datos del producto, y como una metodología para crear estándares, por ejemplo para modelos de información. El intercambio de datos es uno de los usos de STEP, pero no el único.

La ISO 10303 es una colección de documentos interrelacionados que cubre muchos aspectos, estructurados en un conjunto de partes. Las distintas partes están agrupadas en las siguientes secciones:

- Métodos de descripción (Description methods). Engloba a las partes de la 1 a la 19. En ellas se especifican los lenguajes usados para la creación de estándares.
- Métodos de implementación (Implementation methods). Incluye las partes de la 20 a la 29. Da soporte al desarrollo de aplicaciones software sobre los estándares.
- Marco y metodología para chequear la conformidad (Conformance testing methodology and framework). De la parte 30 a la 39. Documentos que especifican como chequear un desarrollo acorde a la ISO10303 para ver su conformidad con el estándar.
- Recursos integrados genéricos (Integrated generic resources). Representado por las partes de la 40 a la 49. Ofrece los modelos de representación básicos para la descripción de las características de un producto fabricado.
- Recursos integrados de aplicación (Integrated application resources). De la parte 100 a la 199. Son especializaciones de los 'Recursos integrados genéricos' para aplicaciones concretas en ingeniería.
- Protocolos de aplicación (Application protocols). Partes de la 200 a la 299. Proporcionan los requerimientos de datos para un campo de aplicación de ingeniería, mediante la utilización de los 'Recursos integrados genéricos'. Los protocolos de aplicación están desarrollados para que sirvan de apoyo a aplicaciones software de ingeniería.
- Conjunto de pruebas (Abstract test suites). Incluye las partes de la 300 a la 399. Describe las pruebas a realizar para determinar si una implementación STEP cumple con los requisitos establecidos en su 'Protocolo de aplicación'.
- Construcciones, o modelos de datos compartidos (Application interpreted constructs). Partes de la 500 a la 599. son modelos de datos que describen conceptos comunes a más de un 'Protocolo de aplicación'.

- Módulos de aplicación (Application modules). De la parte 1000 en adelante. Pequeños modelos de información que serán reutilizados en el desarrollo futuro de 'Protocolos de aplicación'.

La propia norma ISO 10303 incorpora un lenguaje orientado a objetos para la definición de los modelos de información propuestos en sus distintas partes, llamado 'EXPRESS'. A través de este lenguaje se realiza una especificación formal de los datos, reglas, funciones, relaciones y restricciones de un modelo de información, de manera que sea procesable por un computador. Un ejemplo de utilización de EXPRESS, relacionado con el mecanizado puede consultarse en el trabajo de Rios-Chueco, [Ref. 91].

Las partes de la ISO 10303 utilizadas en la Tesis son, la parte 42 que permite la definición geométrica y topológica de un producto, y la parte 224 que establece la definición del Plan de Procesos para piezas mecánicas a partir de Elementos Característicos de Mecanizado.

La parte 224: "Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features", [Ref. 53], especifica los recursos necesarios para la representación e intercambio de información desde el punto de vista de la fabricación de piezas mecánicas. Dentro su alcance queda:

- La descripción de la fabricación de piezas mecánicas.
- Los procesos abordados en esta parte para la fabricación de piezas mecánicas son torneado y fresado.
- Los Elementos Característicos de Mecanizado para definir las formas necesarias en la fabricación.
- La representación explícita de la forma geométrica de los Elementos Característicos de Mecanizado a través de geometrías B-Rep.
- La representación implícita de los Elementos Característicos de Mecanizado a través de parámetros estándares de definición del Elemento.
- Los datos administrativos para relacionar las piezas y los clientes a través de los pedidos. No incluye el seguimiento de la orden de fabricación en la planta.
- Datos de aprobación para autorizar la fabricación de la pieza.
- Datos administrativos para identificar los requerimientos y seguimiento de estado de los materiales y equipo necesario para la fabricación de una pieza.
- Orden de trabajo a seguir e identificador del estado de la pieza.
- Seguimiento del estado de la materia prima para documentar el historial de fabricación de una pieza.
- Seguimiento de las anomalías.

En lo referente al modelado de piezas, la parte 224 se basa en la parte 42: "Integrated generic resources: Geometric and topological representation", [Ref. 52],

incluyendo una estructuración conceptual para la definición de una pieza en base a Elementos Característicos de Mecanizado. Además, aporta los modelos de información genéricos que permiten mantener los datos de definición de éstos Elementos.

3. Representación por límites (B-Rep)

3.1. Definición de un modelo sólido en B-Rep

Como ya se ha comentado, en la Tesis se toma como datos de entrada el modelo en B-Rep de la pieza a trabajar. El formato empleado en esta representación es el definido en la parte 42 de STEP. Su utilización ofrece, en otras ventajas, [Ref. 23], la de tratarse de un estándar.

En B-Rep, un modelo sólido queda representado por una envoltura cerrada, formada por un conjunto de caras (superficies recortadas por ciclos cerrados de tramos) unidas dos a dos por cada uno de sus tramos, hasta cerrar completamente el volumen al que representan. Esta envoltura representa la “piel” de la pieza, de hecho las superficies no tienen espesor, puesto que lo único que se persigue es que una vez recortadas y ensambladas su aspecto sea el de un cuerpo sólido, manteniendo la información necesaria para saber la parte o zona que interesa.

Recortar una superficie es establecer unos límites, tanto exteriores como interiores, a una entidad geométrica en principio infinita. Al resultado de este recorte se le denomina “cara”. El límite exterior dimensiona y da forma a una cara, mientras que él o los interiores representan los huecos o salientes que pueden aparecer en la cara. Son estas caras las encargadas de establecer los límites de la pieza.

La definición geométrica de una superficie debe ir acompañada de cierto tipo de información que ayude a discriminar, que parte o zona en cada uno de los recortes es la que debe considerarse, y hacia donde queda el material en la pieza. Toda esta información está agrupada bajo el concepto de topología, y es con la unión de ambas, geometría y topología, cuando se tiene una representación sólida no ambigua de la pieza. En resumen, para cada una de las superficies que se maneje debe quedar claro en que lado de la superficie se encuentra el interior y el exterior de la pieza, así como las partes del recorte de una superficie a considerar y las que deben rechazarse.

En el ejemplo de la Figura 2-4 puede verse como se define en B-Rep la cara plana izquierda de la pieza mostrada. La superficie plana inicial (infinita) se recorta por un ciclo cerrado de tramos circulares que la acotan externamente, ‘tr_A’ y ‘tr_B’, y por un ciclo de tramos rectos que la acota internamente, ‘tr_1’, ‘tr_2’, ‘tr_3’, ‘tr_4’, y que dan paso a una cajera rectangular.

Aunque no se aprecie en la figura, la información topológica permite quedarse con la cara plana circular y desechar el resto de la superficie plana, indicando a su vez en que parte queda el material, la pieza. Con estas consideraciones y una vez unidas todas las caras, queda representado un cilindro macizo con un hueco rectangular en su parte izquierda.

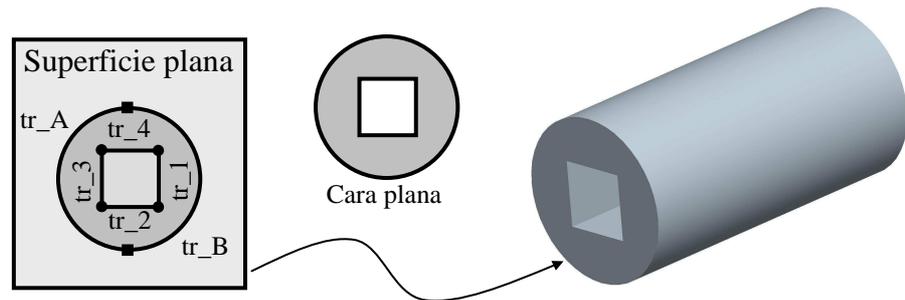


Figura 2-4. B-Rep de la cara plana circular izquierda de una pieza cilíndrica.

3.2. B-Rep según la Parte 42 de la ISO 10303

La parte 42 de la ISO 10303, [Ref. 52], en lo referente a B-Rep, está dedicada a la descripción de los recursos constructivos para la representación explícita de la forma de un producto (pieza). Por representación explícita se entiende aquella en la que se muestra la forma geométrica final, no los estadios intermedios ni las operaciones que a éstos se les aplica para alcanzar la forma final. Dicha representación geométrica se efectúa mediante la descripción nominal de todos los elementos, quedando fuera de su alcance la consideración de las tolerancias geométricas, dimensionales, etc. Aspectos que son tratados en otra parte de la norma, concretamente en la 47 que pertenece, al igual que ésta, a los 'Recursos integrados genéricos'.

Para la representación de modelos sólidos, la parte 42 aporta la descripción del conjunto de entidades geométricas y topológicas necesarias, junto con la estructura que éstas deben tener. Esta estructura queda definida en unos esquemas en los que se establecen los datos de cada entidad y se determinan sus relaciones. Los esquemas aportados para la representación de sólidos permiten una descripción según los dos formatos clásicos, geometría de sólidos constructiva (Constructive Solid Geometry, CSG) y representación por límites (Boundary Representation, B-Rep).

En lo referente a la geometría aparecen entidades destinadas a la definición de puntos, vectores, curvas, curvas cónicas, superficies elementales y paramétricas, superficies réplicas y 'offset', superficies del tipo 'parametric spline', operadores de transformación, intersección de curvas, definición de puntos directamente a través de sus coordenadas (o en términos de parámetros de una curva o superficie existente), etc. En definitiva, da soporte al amplio abanico de elementos geométricos y operaciones geométricas entre ellos necesarias para una completa definición.

Respecto a la topología, se definen entidades fundamentales como, vértice (vertex), filo (edge) y cara (face), cada uno con un subtipo especializado para ser asociado a la geometría de, un punto, curva, o superficie, respectivamente. También define una colección de entidades básicas para formar estructuras topológicas del tipo trayectorias (path), ciclos (loop) y cubiertas (shell), restricciones para asegurar la integridad de estas estructuras, así como la orientación de estas entidades topológicas.

Desde una perspectiva particular, en la parte 42 de la ISO 10303 se define B-Rep

como: *un tipo de modelo geométrico en el cual el tamaño y la forma de un objeto sólido se define en términos de caras, aristas y vértices, que en conjunto definen el límite del propio sólido.*

3.2.1. Geometría

Dentro de la geometría, la norma ISO 10303 incluye multitud de entidades que permiten definir todos los elementos geométricos necesarios. Se han seleccionado, para dar una breve descripción a modo de ejemplo, las superficies y curvas más comunes en las piezas metal-mecánicas.

La Parte 42 define superficie como: *un conjunto de puntos matemáticos, los cuales son la imagen de una función continua definida sobre un subconjunto conexo del espacio R^2 .* Una superficie en 3D puede verse como, *un conjunto de puntos en el espacio R^2 conectados entre sí mediante tramos rectos y/o curvos.* Por ejemplo, una superficie cilíndrica (semicilíndrica) viene representada por cuatro puntos en un plano, unidos por dos tramos rectos paralelos al eje, y por dos tramos curvos de valor el radio del cilindro y con una transición realizada en un plano normal al plano donde se encuentran los puntos de definición, ver Figura 2-5.

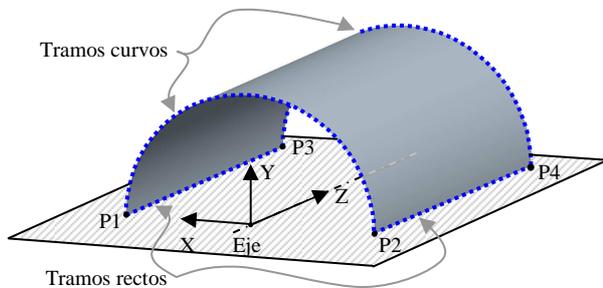


Figura 2-5. Semicilindro definido según la Parte 42

A nivel general dentro de los elementos geométricos se pueden establecer dos grupos, uno representado por los distintos tipos de superficies (regulares o no) que se encargan de acotar el espacio, y otro grupo representado por los distintos tipos de curvas cuya misión es delimitar a las superficies del primer grupo.

Entre las superficies regulares (*elementary_surface*) que maneja la norma se encuentran las planas, esféricas, cónicas, cilíndricas y tóricas, entre las no regulares (*bounded_surface*) se encuentran todas aquellas definidas a partir de 'b-splines', o a partir de recortes libres sobre cualquier otro tipo de superficie.

En el grupo destinado a la definición de curvas aparecen todas aquellas entidades llamadas tramos o aristas, definidas en R^1 y que recortan a las superficies, siendo éstas del tipo, línea, círculo, elipse, hipérbola, parábola, o cualquier tramo definido a partir de puntos (tanto de forma paramétrica como apoyándose sobre otra entidad previamente definida, por ejemplo, en una superficie).

En el contexto de la Tesis, las entidades que interesan son las superficies regulares y los tramos del tipo línea y círculo, ya que desde el punto de vista del mecanizado la introducción de otras entidades geométricas lleva al mecanizado de superficies esculpidas, que quedan fuera del ámbito de trabajo de la Tesis, como se ha comentado en la introducción.

Todas las superficies se definen a partir de parámetros, utilizando para ello un sistema de coordenadas local a la superficie, que a su vez queda situado en el espacio respecto a uno global a la pieza. En su definición, toma especial importancia la normal geométrica, ya que sobre ella se apoyan variables topológicas encargadas de interpretar y dar significado a la superficie dentro del conjunto llamado pieza.

Desde la perspectiva del desarrollo, resulta muy conveniente trabajar con esta representación matemática, ya que facilita la implementación de funciones y procedimientos. Por ejemplo, funciones encargadas de, comprobar pertenencia de puntos a superficies, calcular generatrices, intersectar superficies, calcular rangos angulares, proyectar superficies, calcular distancias entre entidades, etc.

A continuación se muestran dos ejemplos sobre la definición y representación de superficies:

- Plano (plane). Es una superficie ilimitada con una normal constante. Un plano queda definido con un punto sobre el mismo y su dirección normal. Los datos que maneja la parte 42 de la ISO 10303 se interpretan como:

C = Localización espacial del plano, punto con coordenadas, X, Y, Z .

\vec{x} = Vector 'x' del sistema de coordenadas con origen en C .

\vec{y} = Vector 'y' del sistema de coordenadas con origen en C .

\vec{z} = Vector 'z' del sistema de coordenadas con origen en C , es la normal geométrica al plano.

Los valores de ' C ', \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} se definen respecto al sistema de coordenadas global del modelo. La superficie 'plano' queda definida a través de parámetros: $\sigma(\mu, \nu) = C + \vec{x} \cdot \mu + \vec{y} \cdot \nu$. Siendo el rango de parametrización: $-\infty < \mu, \nu < \infty$. En el sistema de coordenadas local al plano, cualquier punto sobre él tendrá su coordenada 'Z' a cero. El eje 'Z' de este sistema de coordenadas es la normal al plano.

- Cilindro (cylindrical_surface). Es una superficie con una distancia constante respecto a una línea recta, de valor el radio. Una superficie cilíndrica está definida por su radio, su orientación y su localización. Los datos paramétricos que emplea la Parte 42 para definir esta superficie son:

C = Localización de la superficie, punto con coordenadas, X, Y, Z .

\vec{x} = Vector 'x' del sistema de coordenadas con origen en C .

\vec{y} = Vector 'y' del sistema de coordenadas con origen en C .

\vec{z} = Vector 'z' del sistema de coordenadas con origen en C . Eje del cilindro.

R = Radio.

Los valores de ' C ', \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} se definen respecto al sistema de coordenadas global al modelo. La superficie queda parametrizada como: $\sigma(\mu, \nu) = C + R \cdot ((\cos \mu) \cdot \vec{x} + (\sin$

$\mu) \cdot \vec{y} + v \cdot \vec{z}$. El rango de parametrización es: $0^\circ \leq \mu \leq 360^\circ$, $-\infty < v < \infty$.

En el sistema de coordenadas indicado, la superficie queda representada por la ecuación $S = 0$, donde: $S(x,y,z) = x^2 + y^2 - R^2$. La normal geométrica a la superficie en un punto viene representada por un vector, con origen en el eje de la superficie, a 90° del eje, y que pasa por el punto en cuestión.

El vector de la normal geométrica se obtiene a partir de la ecuación: $N(\mu,v) = (\cos \mu) \cdot \vec{x} + (\sin \mu) \cdot \vec{y}$, el sentido de la normal es siempre saliente desde el eje del cilindro.

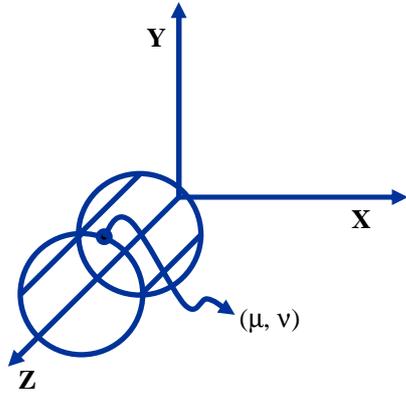


Figura 2-6. Punto de coordenadas μ y v sobre una superficie cilíndrica.

A continuación se muestra el cálculo de la normal de una superficie cilíndrica en un punto sobre la misma, a través del cálculo y uso de sus parámetros, ver Figura 2-6.

Se conocen los siguientes datos, position.location = (Cx, Cy, Cz); position.p[1] = (1,0,0); position.p[2] = (0,1,0); position.p[3] = (0,0,1); valor del radio (R); Coordenadas de un punto sobre la superficie (Px, Py, Pz).

Los valores de μ y v se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$Px = Cx + R \cdot ((\cos \mu) \cdot 1 + (\sin \mu) \cdot 0 + v \cdot 0) \rightarrow Px = Cx + R \cdot ((\cos \mu) \cdot 1)$$

$$Py = Cy + R \cdot ((\sin \mu) \cdot 1)$$

$$Px - Cx = R \cdot \cos \mu; \quad Py - Cy = R \cdot \sin \mu; \quad \mu = \text{tang}^{-1}(Py - Cy / Px - Cx)$$

$$Pz = Cz + v \cdot 1 \rightarrow v = Pz - Cz$$

Una vez conocidos los parámetros del punto sobre la superficie pueden obtenerse las componentes del vector normal, ' \vec{Ns} '.

$$\vec{Ns} = \begin{bmatrix} Ns_x \\ Ns_y \\ Ns_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \sin(\mu) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mu) \\ \sin(\mu) \\ 0 \end{bmatrix}$$

El cálculo del vector normal se simplifica, por ejemplo si 'Px' vale cero, ya que en este caso sus componentes, ' Ns_x ' y ' Ns_z ', valen ambas cero, tomando el valor de '1' la

componente 'Ns_y', en caso de ser la coordenada 'Py' del punto mayor o igual a cero. Toma el valor de '-1' si la coordenada 'Py' del punto es menor que cero.

Las 'curvas' se encuentran también definidas a partir de parámetros. De una forma práctica, una 'curva' puede verse como un punto que se desplaza a lo largo de una trayectoria, utilizando un sistema de coordenadas local para definir esa trayectoria cuando haga falta.

En una entidad del tipo 'curva', se define su tangente geométrica a partir de un punto sobre ella y de su vector director. El vector director se obtiene directamente de la definición de la 'curva', o a partir del sistema de coordenadas local encargado de marcar el sentido de la trayectoria.

Las dos entidades tipo 'curva' más representativas son la línea y el círculo, a continuación se muestra su definición paramétrica.

- Línea (line). Es una curva de radio infinito con una dirección tangente constante. Se define a partir de un punto y una dirección. La dirección positiva de la línea coincide con la dirección de la entidad vector director.

La línea queda parametrizada como: $\lambda(\mu) = P + \mu \cdot \vec{V}$, siendo 'P' un punto en la línea y \vec{V} su vector director, el rango válido es: $-\infty < \mu < \infty$

- Círculo (circle). Queda definido a partir de su radio, localización y orientación. Los datos utilizados en su definición son:

C = Localización del centro, punto con coordenadas, X, Y, Z.

\vec{x} = Vector 'x' del sistema de coordenadas con origen en C.

\vec{y} = Vector 'y' del sistema de coordenadas con origen en C.

\vec{z} = Vector 'z' del sistema de coordenadas con origen en C.

R = Radio.

El círculo se parametriza como: $\lambda(\mu) = C + R \cdot ((\cos \mu) \cdot \vec{x} + (\sin \mu) \cdot \vec{y})$. Su rango de parametrización es: $0^\circ \leq \mu \leq 360^\circ$. Respecto a su sistema de coordenadas local, el círculo queda como: $C(x, y, z) = x^2 + y^2 - R^2$.

Para trabajar correctamente con la información geométrica de un modelo sólido debe tenerse en cuenta la precisión con la que este modelo se creó, también llamada "tolerancia", "incertidumbre" o "error admitido", y que expresa el nivel de precisión a alcanzar para una interpretación adecuada. Por ejemplo, a partir de que decimal, después de realizar los cálculos pertinentes, se admite que dos entidades son perpendiculares, coincidentes, están unidas, ...

Esta precisión está relacionada con las unidades de trabajo en el modelo y suele venir expresada en la ISO 10303, a través de la entidad 'UNCERTAINTY_MEASURE_WITH_UNIT()', entre otras.

Puede realizarse un seguimiento más detallado sobre las geometrías y sus relaciones espaciales a través del libro publicado por Schneider y Eberly con título, "Geometric Tools for Computer Graphics", [Ref. 96], que de forma independiente a cualquier formato de representación ayuda a comprender el tipo de operaciones y relaciones entre entidades geométricas, como las contempladas en la Tesis.

3.2.2. Topología

La geometría no es suficiente para definir el modelo de una pieza. Una superficie (elemento geométrico) establece simplemente una separación del espacio en dos partes. De forma similar, una curva sobre una superficies divide a ésta en dos partes. Se necesita otro tipo de información para decidir, por ejemplo, que parte de las dos debe considerarse.

La topología dota de significado a las entidades geométricas, permitiendo acotar de forma coherente los límites de una pieza, decidiendo cuales son las zonas o partes geométricas a considerar. De esta forma se define el volumen de un sólido.

Entre las entidades topológicas definidas y utilizadas por la parte 42 de la norma se encuentran:

- La normal topológica, indica hacia donde queda el material, o parte sólida de la pieza. En B-Rep la normal topológica (\vec{NT}) siempre apunta hacia donde no hay material, hacia la parte externa de la pieza, como puede verse en cinco de las superficies que integran la pieza de la Figura 2-7. La normal topológica se define en base a la normal geométrica, manteniendo o cambiando su sentido.

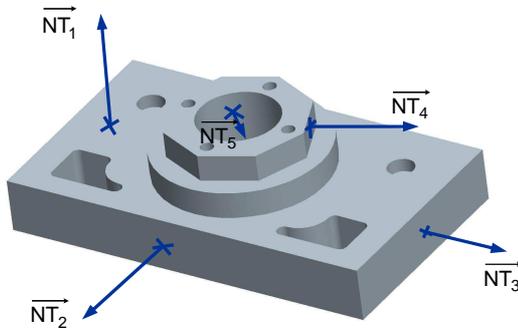


Figura 2-7. Normales Topológicas a las superficies de una pieza.

- Los sentidos de los tramos, que delimitan externa e internamente a las caras de una pieza, llamándose recortes a cada conjunto de tramos que limitan cada una de las zonas. Estos deben tener correctamente asignados sus sentidos, ya que a través de ellos se indica cual es la zona de la superficie a considerar (parte en la que existe material). Para indicar la dirección de la zona a considerar, en un punto de un tramo sobre cualquiera de los recortes, se utiliza la normal topológica a la superficie (\vec{NTs}) y la tangente correspondiente al sentido de recorrido del tramo (\vec{TTa}). El sentido del vector resultado del producto vectorial ' \vec{NTs} ' por ' \vec{TTa} ', indica la parte válida de la superficie que forma la cara, mostrando con que parte del recorte de la superficie quedarse (Figura 2-8). En esta figura se muestra una cara plana con un agujero central, resultado de recortar una superficie infinita. Para establecer este recorte se han generado dos ciclos de tramos, uno que la delimita externamente y otro

internamente. El sentido de los tramos de cada ciclo es el adecuado para que al realizar el producto vectorial, según lo explicado, el vector resultado 'Res' vaya indicando con que parte del plano infinito quedarse. Puede verse que el sentido del ciclo que delimita al agujero interno es el contrario al del ciclo exterior, para cumplir con lo comentado.

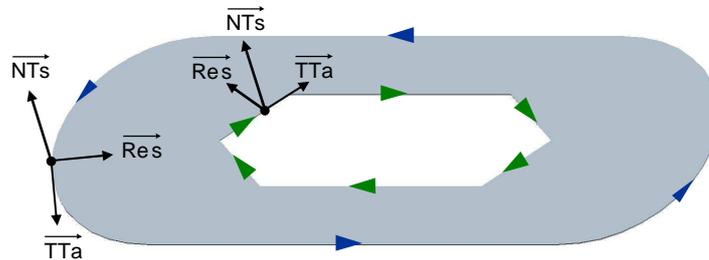


Figura 2-8. Parte válida del recorte de una superficie.

Siguiendo la parte 42, la entidad topológica que a efectos prácticos ocupa la cúspide de la estructura, es la llamada "CLOSED_SHELL" (Figura 2-9). Esta entidad representa la región límite que engloba a la pieza. Es la "piel" de la pieza, y está formada por un conjunto de caras (FACEs) conectadas.

Cada entidad topológica del tipo 'FACE' puede ser a su vez una, 'FACE_SURFACE' (superficie explícita), 'SUBFACE' (parte de una FACE con algunos de sus recortes eliminados, por ejemplo) o una 'ORIENTED_FACE' (es una FACE con información topológica adicional). En cualquier caso incluye una lista de recortes (FACE_BOUNDSs).

La 'FACE_SURFACE', superficie explícita, posee un campo lógico (Boolean) que informa si el sentido de la normal en esta cara está de acuerdo (True), o va al contrario (False), que el sentido de la normal topológica correcto para la misma.

'FACE_SURFACE' deriva en la entidad geométrica 'SURFACE', que a su vez puede ser una superficie elemental (ELEMENTARY_SURFACE), una superficie generada por barrido (SWEPT_SURFACE), una superficie delimitada por curvas compuestas (BOUNDED_SURFACE), una superficie réplica con un desplazamiento normal a la original (OFFSET_SURFACE), o una superficie réplica en cualquier localización (SURFACE_REPLICA).

Dentro de las superficies elementales se encuentran aquellas analíticamente simples, con una representación realizada a través de parámetros. Con anterioridad se ha mostrado la representación paramétrica para la superficie plana (PLANE) y para la cilíndrica (CYLINDRICAL_SURFACE).

El campo 'FACE_BOUND', que incluye toda entidad 'FACE', hace referencia al conjunto de ciclos (LOOPS) encargados de limitar externa e internamente a una cara. En ocasiones, se hace explícita la condición de límite exterior de una cara utilizando la entidad 'FACE_OUTER_BOUND'. El resto de ciclos internos se definen siempre a través de 'FACE_BOUNDSs', aunque puede no existir ninguno. Los ciclos internos representan los huecos o salientes a los que se da paso en esa cara.

Ambas entidades, 'FACE_OUTER_BOUND' y 'FACE_BOUND', poseen una

variable lógica que toma el valor de 'True' si el ciclo de tramos (LOOP) tiene el mismo sentido, cuando se usa para limitar la cara que cuando se definió por primera vez, y 'False', cuando los sentidos de todos sus componentes deben ser cambiados para una interpretación correcta.

La entidad topológica 'LOOP' puede ser del tipo:

- 'VERTEX_LOOP', representando un ciclo con un único punto (VERTEX_POINT), el cual toma valores para sus coordenadas 'X', 'Y' y 'Z' a través de la entidad geométrica 'POINT', entre otras.
- 'EDGE_LOOP', formado por un conjunto cerrado de tramos (EDGEs) del tipo, 'EDGE_CURVE', con su geometría plenamente definida, o del tipo 'ORIENTED_EDGE', copia de otro 'EDGE' con una variable lógica para indicar, 'True', si el sentido de la entidad implicada (línea, círculo,...) está cambiado.
- 'POLY_LOOP', formado por un conjunto cerrado de tramos rectos.

El 'EDGE_CURVE' es una entidad topológica que contiene a la entidad geométrica 'CURVE'. Entre los distintos tipos de 'CURVEs' que se pueden encontrar están, la línea (LINE), y la entidad llamada cónica "CONIC" (pudiendo ser a su vez del tipo 'CIRCLE', 'ELLIPSE', 'HYPERBOLA' o 'PARABOLA'). El resto de tipos hacen referencia a otras curvas paramétricas y copias o réplicas entre ellas.

La variable lógica del 'EDGE_CURVE' indica si los sentidos de la topología, 'EDGE', y de la geometría, 'CURVE', que definen a la entidad 'EDGE_CURVE' son el mismo, 'True', o no 'False'. El sentido del 'EDGE' se toma de 'vertex' 'A' a 'vertex' 'B', y el del 'CURVE' es la dirección del "increasing parameter", equivale a la "regla de la mano derecha" sobre el sistema de coordenadas, entidad geométrica llamada 'AXIS2_PLACEMENT_3D', asociado al 'CIRCLE', o a la 'DIRECTION' en la entidad 'LINE', por ejemplo.

El empleo correcto de las entidades topológicas permite (aunque no obliga) aprovechar las entidades geométricas ya definidas, evitando duplicar datos. Por ejemplo, un tramo que une a dos superficies puede aparecer en el fichero de datos una sola vez, aunque esté referenciado en la definición de cada una de las superficies que lo comparten, eso si, con la topología cambiada para ser coherente a cada una de ellas.

3.2.3. Esquema

Aunque en la parte 42 se dediquen capítulos distintos a explicar las entidades geométricas y topológicas, su utilización es conjunta. De hecho, las entidades topológicas añaden información sobre las entidades geométricas, existiendo una clara correspondencia entidad geométrica y entidad topológica que la complementa.

La estructura seguida en la norma para relacionar las entidades es idéntica a la utilizada en los lenguajes de programación orientados a objetos, de hecho, las entidades pueden verse como clases donde unas son especializaciones (subtipos) o generalizaciones (supertipos) de otras.

Una pieza, modelo sólido, queda representada en B-Rep a través de una

estructura ramificada de entidades topológicas y geométricas que la describen por completo. En la Figura 2–9 se muestran algunas de estas entidades.

La selección de las entidades utilizadas para esa representación corresponde al ‘Esquema’. Dicho de otra forma, se necesita al esquema para interpretar correctamente un fichero de datos sobre el modelo de una pieza en B-Rep. Un ejemplo de esquema es el utilizado en las piezas del ‘NIST Repository’ [Ref. 78] llamado, “CONFIG_CONTROL_DESIGN”, o por ejemplo, el utilizado en la Tesis “FEATURE_BASED_PROCESS_PLANNING”.

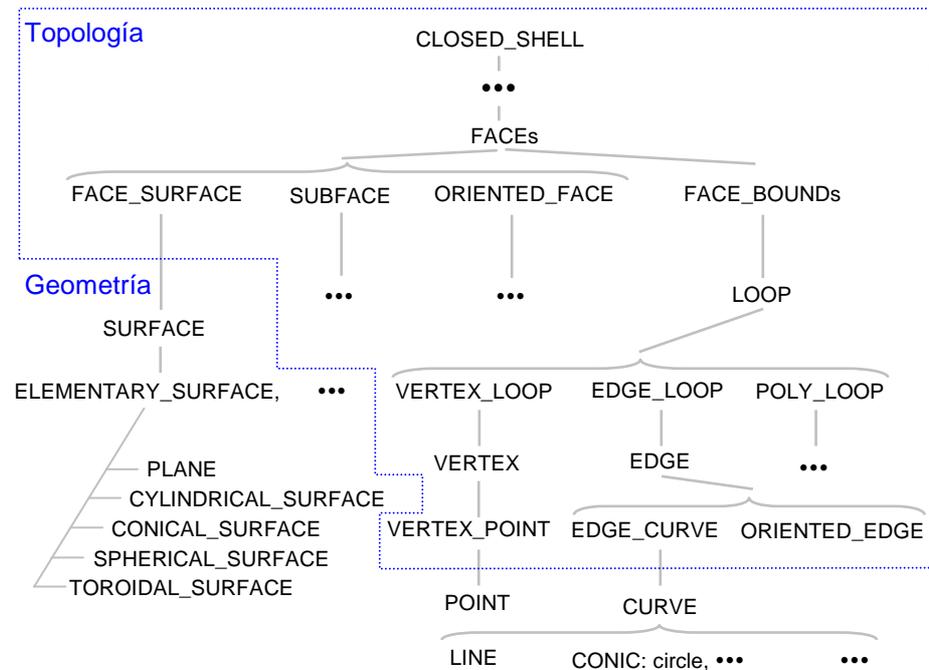


Figura 2–9. Extracto de las entidades (Parte 42) utilizadas para definir una pieza.

En la Figura 2–9 se distinguen dos partes, la inferior referente a la Geometría del modelo sólido (la pieza), y la superior, que apoyada en esa representación geométrica permite interpretar el sólido correctamente. La entidad que da paso a la pieza en su conjunto es la llamada “CLOSED_SHELL”, aunque no se encuentran las definiciones matemáticas de los elementos, hasta descender a la geometría. Para realizar un seguimiento manual, una vez conocidas las superficies que integran la pieza, resulta interesante recorrer las superficies elementales (ELEMENTARY_SURFACE) hacia abajo para conocer los límites y hacia arriba para discriminarlos.

3.2.4. Ejemplo de utilización de B-Rep para la definición de una pieza

En Figura 2–10 se muestra una pieza cilíndrica de 50mm de diámetro y 100mm de

longitud, la figura explotada que se muestra corresponde a las distintas superficies que integran la pieza inicial. Cabe destacar que el cuerpo cilíndrico se ha representado como dos semicilindros que se complementan, de esta forma se facilitan las operaciones que sobre ellos se realicen, al quedar acotados los ángulos de los semicilindros entre cero y π radianes. También se aprecian tres, de los cuatro, sistemas de coordenadas locales empleados para definir cada superficie, uno por superficie.

En la zona derecha de la Figura 2–10 se incluye un extracto del fichero STEP correspondiente a la definición, en formato B-Rep, del cilindro mostrado.

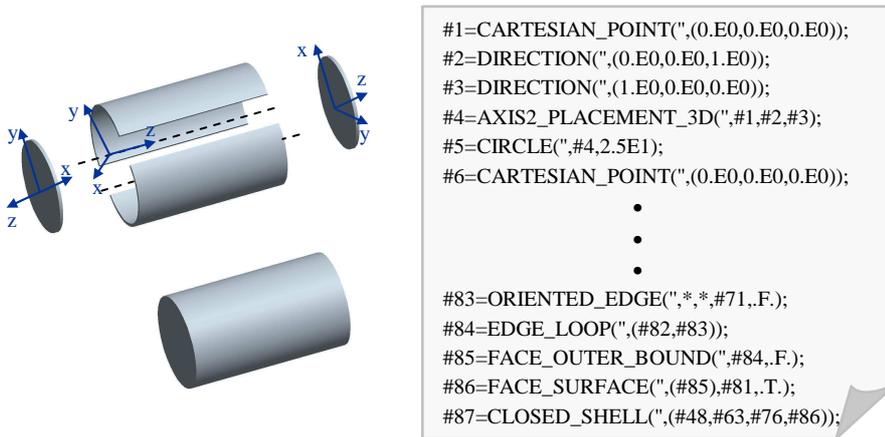


Figura 2–10. Pieza ejemplo y parte de su código en B-Rep.

En este código se aprecia la utilización de alguna de las entidades que aparecen en la Figura 2–9, destacando lo siguiente.

La línea '#87' contiene la entidad que define la envoltura (CLOSED_SHELL) de la pieza, formada por cuatro superficies del tipo, 'FACE_SURFACE', dos planas, '#48' y '#86', y dos cilíndricas, '#63', '#76'.

Tomando como ejemplo la superficie plana '#48' puede apreciarse, Figura 2–11, como los tramos circulares, '#42' y '#44', la recortan para formar una de las caras planas de la pieza. Además, la entidad '#48' tiene su variable lógica instanciada a 'F' (False), informando que la normal topológica va al contrario que la geométrica.

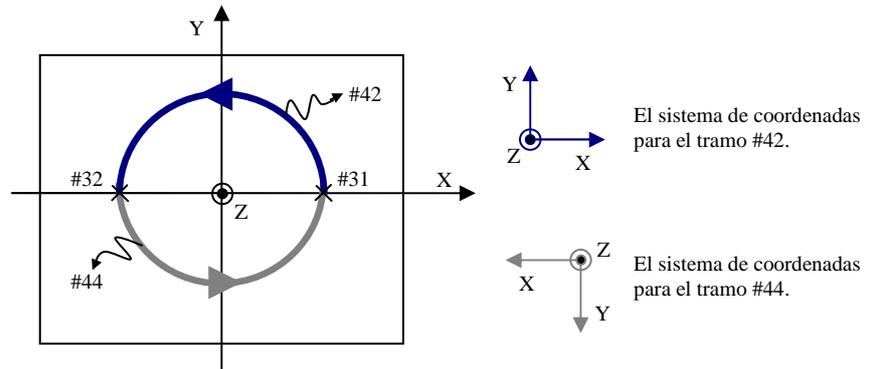


Figura 2–11. Plano, tramos delimitadores y sistemas de coordenadas asociados.

Cada tramo circular queda definido por su radio, un vértice inicial y uno final. La transición entre el vértice inicial y el final se realizará en un plano y con un sentido concreto, esto queda especificado mediante la entidad 'AXIS2_PLACEMENT_3D'. Entidad que define un sistema de coordenadas a partir de la posición de su origen, respecto al sistema de coordenadas general, del vector unitario para el eje 'Z', y del unitario para el eje 'X'. El plano de trabajo es el 'XY', siendo 'Y' el eje con el sentido necesario para completar el triedro ortogonal directo. El sentido de paso del eje 'X' al 'Y' determina la trayectoria a seguir para ir del vértice inicial al final, "regla de la mano derecha".

La entidad 'PLANE', '#41', posee otro 'AXIS2_PLACEMENT_3D' indicando donde está situado el plano y cual es la orientación del eje 'Z', eje que representa a su normal geométrica.

De forma similar, la superficie cilíndrica #63 posee un recorte formado por dos tramos circulares y por dos lineales, Figura 2–12.

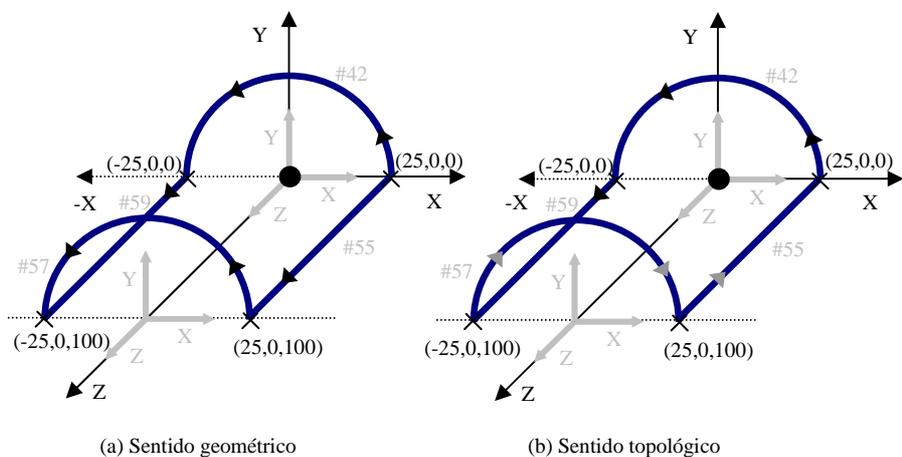


Figura 2–12. Representación alámbrica de una superficie semicilíndrica.

En la Figura 2–12 (a) se muestran estos tramos con la información procedente de las entidades B-Rep sin tener en cuenta las variables lógicas, la topología. Es en la Figura 2–12 (b) donde se realiza una interpretación correcta de la geometría en función de la topología asociada al modelo.

La variable lógica del 'FACE_SURFACE', '#86' en el código de la Figura 2–10, indica si la normal topológica mantiene el mismo sentido que la normal geométrica a la superficie, 'T' (True), o el contrario, 'F' (False).

A continuación, y para una mejor comprensión, se presentan unos ejemplos donde se aprecia el efecto de las variables lógicas (topología) en entidades del tipo 'EDGE_CURVE'.

- Cuando la geometría asociada al 'EDGE_CURVE' es del tipo 'LINE'.

En la definición de la entidad 'EDGE_CURVE' se emplean cinco parámetros. El primero de ellos es del tipo texto, sin relevancia geométrica o topológica. El segundo y tercer parámetro apuntan respectivamente a dos entidades 'VERTEX_POINT', encargadas de definir el punto inicial y final de la línea. El cuarto parámetro da paso a la entidad 'LINE' donde se define completamente a la línea. El último parámetro contienen una variable lógica que indica si el recorrido, al pasar del punto inicial al final, está cambiado.

En la Figura 2–13 se muestra un ejemplo de un 'EDGE_CURVE' del tipo 'LINE', con el punto de inicio en (25,0,100) y el final en (25,0,0), su variable lógica indica recorrido cambiado. Extraída de la definición del cilindro de la Figura 2–10, según STEP.

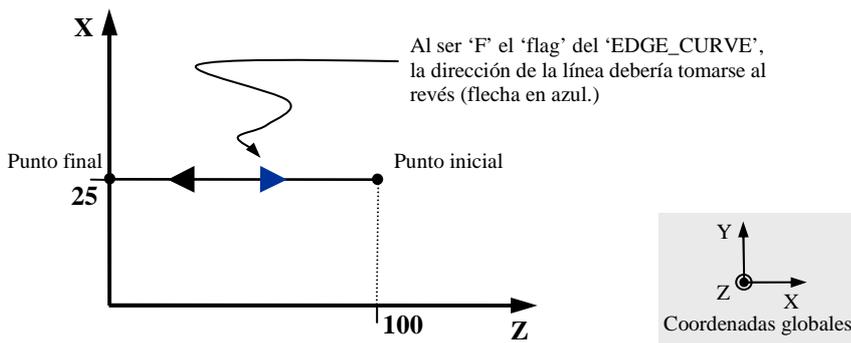


Figura 2–13. Variable lógica del 'EDGE_CURVE' para una línea.

- Cuando la geometría asociada 'EDGE_CURVE' es del tipo 'CIRCLE'.

En este caso la entidad 'EDGE_CURVE' incluye a un 'CIRCLE', al que se accede a través de su cuarto parámetro, el resto de parámetros mantienen el mismo significado que en el caso anterior.

Al definir una entidad del tipo círculo, el recorrido del punto inicial al final se realizará según un arco de circunferencia de radio conocido, su valor se encuentra en la entidad 'CIRCLE'. Esta entidad también incluye un sistema de coordenadas asociado al centro del arco a recorrer en el que, siguiendo la "regla de la mano

derecha”, se obtiene el sentido del recorrido, horario o antihorario.

En la Figura 2–14 se muestra un ejemplo de un ‘EDGE_CURVE’ del tipo ‘CIRCLE’, con el punto de inicio en (25,0,0) y el final en (-25,0,0), su variable lógica indica recorrido cambiado. Está entidad y sus datos pertenece a parte de la definición del cilindro de la Figura 2–10, según STEP.

En el centro de la figura y en color verde se muestra el sistema de coordenadas sobre el que aplicar la “regla de la mano derecha” para conocer el sentido de recorrido, antihorario en este ejemplo.

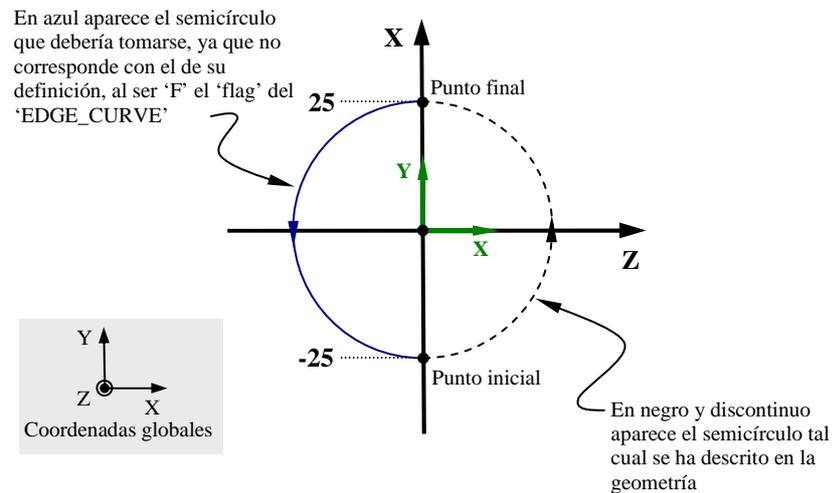


Figura 2–14. Variable lógica del 'EDGE_CURVE' para un círculo.

4. Modelos B-Rep 'Non-Manifold'

Se utiliza el término 'Non-Manifold' para referirse a modelos en B-Rep que no cumplen exactamente con el formato B-Rep, [Ref. 67], en el que básicamente se exige que:

- Todas las aristas sean transición sobre, exactamente, dos superficies o caras de la pieza.
- Todos los vértices estén ligados a un único circuito de caras.

Dicho de otra forma, un modelo 'Non-Manifold' no mantiene una interpretación topológica correcta.

Ejemplos de 'Non-Manifold' se tienen en aquellos modelos que dejan superficies libres, esto es, partes de la pieza no cerradas que se “verían” como superficies de espesor despreciable, o cuando existen aristas libres, sin pertenecer a un ciclo que delimite interna o externamente a una superficie. También se habla de 'Non-Manifold' ante vértices aislados, sin pertenecer a ninguna superficie.

Estas situaciones de no cumplimiento con B-Rep, pues no hay correspondencia

con un sólido real, se dan en cualquier estadio intermedio de representación de la pieza sobre la que se estén realizando operaciones geométricas.

Un buen ejemplo de modelos 'Non-Manifold' se presenta al realizar el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado tal como se explica en la Tesis, ya que se estará ante situaciones como:

- La representación de un Volumen de Mecanizado como un conjunto de superficies relacionadas entre si a través de un criterio de vecindad, pero que no se cierran y por tanto no representan a un sólido.
- El resultado obtenido tras partir superficies ante uniones convexas, antes de eliminar las aristas repetidas y "recalcular" el sentido topológico en el ciclo resultante.
- La perfil que se tiene de la herramienta válida, formado por un conjunto de aristas situadas respecto a un eje, representando una sección normalmente no cerrada.
- En cualquier situación en el que se produzca un corte o manipulación de aristas, donde aparecerán tramos y puntos sueltos no pertenecientes a ninguna superficie definida en el modelo.

Se hace inevitable trabajar con modelos 'Non-Manifold', cuando lo que se pretende es manipular la representación geométrica y topológica, para ir más allá de la simple representación visual de la pieza.

Existen propuestas, como la de Gueorguieva y Marcheix, [Ref. 38], que añaden extensiones al modelado geométrico en B-Rep introduciendo las representaciones 'Non-Manifold'. Esto implica añadir nuevos tipos de elementos topológicos para cubrir esas geometrías, así como un nuevo conjunto de operaciones para poder manipular los objetos. También se aseguran de mantener la validez del modelo en estados intermedios. En su trabajo incluyen una amplia gama de ejemplos e ilustraciones explicativas sobre la construcción de objetos 'Non-Manifold'.

5. Geometrías especiales en B-Rep

Otro aspecto importante a tener en cuenta en los modelos B-Rep es la definición geométrica y topológica de ciertas superficies, que aún cumpliendo con B-Rep "fuerzan" su interpretación, normalmente abreviando su definición, y como consecuencia complicando su tratamiento geométrico.

Situación presente en multitud de piezas, sobre todo en aquellas especialmente pensadas para realizar pruebas y comprobaciones de funcionamiento en aplicaciones que trabajen con B-Rep, por ejemplo, las almacenadas en el 'National Design Repository' [Ref. 78]. La mayoría de aplicaciones que trabajan en B-Rep, comerciales o no, intentan evitar estas situaciones para trabajar y operar sobre los modelos de una forma más cómoda.

Para ilustrar estas definiciones forzadas en B-Rep, se muestra la representación de una superficie cilíndrica completa, Figura 2-15 (a), definida a partir de dos recortes con una sola arista circular cada uno, Figura 2-15 (b), y la misma superficie con una

definición de fácil manejo formada por dos superficies cilíndricas (dos semicilindros), con un ciclo externo cada una y conteniendo cuatro aristas cada ciclo, Figura 2–15 (c). De esta forma se evita, entre otras cosas, tener dos ciclos externos independientes que delimitan una misma superficie.

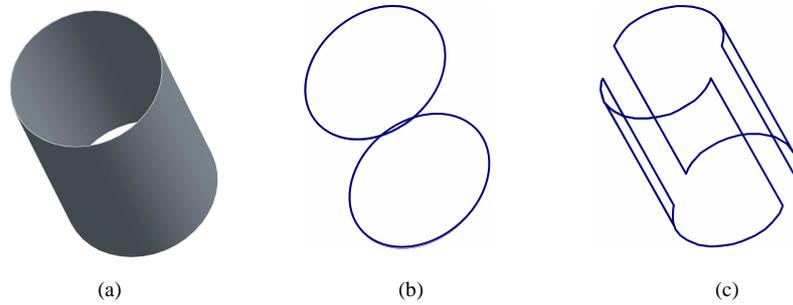


Figura 2–15. Distinta representación de un cilindro en B-Rep.

Algo similar ocurre en la definición de una superficie tórica (Figura 2–16), en una cónica o una esférica.

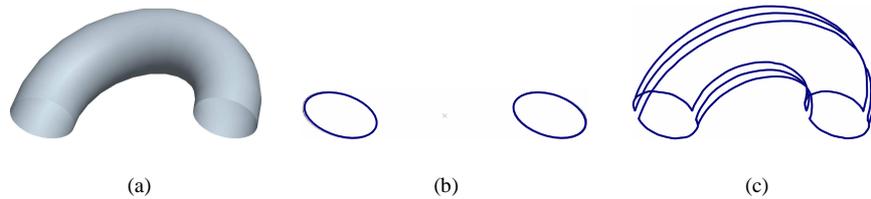


Figura 2–16. Distinta representación de un toro en B-Rep.

Capítulo 3. Definiciones sobre Elementos Característicos

Las entidades objeto de esta Tesis son los Elementos Característicos de Mecanizado, concretamente su obtención o reconocimiento a partir del modelo geométrico de la pieza. En este capítulo se va a presentar el concepto de Elemento Característico de Mecanizado, así como un conjunto de definiciones y consideraciones relacionadas con él, que servirán para contextualizarlo. Se prestará especial atención a la distinción entre Elemento Característico de Diseño y de Mecanizado, cuyas diferencias, obligan a un reconocimiento para establecer un puente entre el diseño y la Planificación de Procesos.

Para ayudar a comprender el tipo de información que contiene un Elemento Característico de Mecanizado, así como su repercusión, se repasan las principales clasificaciones que sobre ellos han realizado diversos autores.

Se aprovecha para recordar el concepto de 'operación de mecanizado', relacionada directamente con el Elemento Característico de Mecanizado, y la necesaria separación con el mecanizado llamado 3D o escultural. Separación que favorece la obtención de ventajas en cuanto a rapidez, economía y mejores acabados que ofrecen las operaciones de mecanizado convencionales.

Ligado al Elemento Característico de Mecanizado se encuentran los conceptos de Zona y Volumen de Mecanizado que de forma habitual se usan como sinónimos, aunque presentan ciertas diferencias que conviene señalar.

Finalmente, se dan las primeras nociones sobre como obtener, a partir de un

fichero en B-Rep y bajo el criterio de la concavidad y convexidad entre superficies, las Zonas de Mecanizado.

1. Elemento Característico

Los Elementos Característicos son unidades, componentes, entidades o partes de una pieza a considerar desde el punto de vista de una aplicación, definidos a partir de la información tecnológica y funcional necesaria para ese dominio específico. La utilización del término aplicación puede concretarse en dominios como el diseño, el mecanizado, el moldeo, la inyección, etc., [Ref. 14], [Ref. 21] y [Ref. 79]. La descripción geométrica y los parámetros que lo definen será una cosecuencia del tipo de Elemento Característico.

Por ejemplo, en un entorno destinado a la construcción de moldes para colada por gravedad, se manejarán Elementos Característicos del tipo, mazarota, noyo, canal de colada, cavidad del molde, etc., [Ref. 18]. Cada uno de ellos estará definido en base a una serie de características o parámetros relevantes desde el punto de vista tecnológico y específico de la colada, como pueden ser, volumen, espesor de pared, forma geométrica, localización final, etc.

Bajo este punto de vista, crear e incorporar una forma geométrica cónica al modelo del molde para desarrollar la función de bebedero, se realizará mediante el uso del Elemento Característico 'bebedero', asignando como parámetros, su localización, altura y conicidad. De esta forma quedará modelado un cuerpo tronco-cónico con la base mayor situada hacia el exterior del molde. Pero además de esa forma geométrica se incluirá cierta información funcional, como disposición favorable para verter el material, reducciones de sección para reducir turbulencias, tipo de enlace con el resto de elementos, etc.

El uso de Elementos Característicos permite construir y definir una geometría de acuerdo a una funcionalidad final. Al restringir el ámbito de utilización de éstos, se tiene una evidente y necesaria ventaja, resuelven correcta y concisamente los problemas de la aplicación destino y permiten al usuario centrarse en el objeto de trabajo.

Sin embargo, para utilizar unos Elementos Característicos en otras aplicaciones diferentes a la inicialmente usada para crearlos, se hace necesario un análisis y conversión a otros Elementos Característicos acordes a la nueva aplicación. Valga como ejemplo, la realización de un diseño funcional utilizando Elementos Característicos de Diseño (ver definición en el Punto 1.1), cuando se vaya a utilizar el objeto diseñado en una posterior etapa de fabricación, serán necesarios Elementos Característicos para la fabricación sobre los que trabajar, por ejemplo, de Mecanizado (ver Punto 1.2).

1.1. Elemento Característico de Diseño

Son patrones específicos que usan las aplicaciones CAD para facilitar y posibilitar el proceso de diseño del modelo geométrico de una pieza, teniendo en cuenta aspectos funcionales de la misma. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, elementos

como, agujero (hole), ranura (slot), saliente (protusion, boss), costilla (rib), canaleta (groove), cajera (pocket), capa (shell), chaflán (chamfer), patrón definido por el usuario (user pattern), ...

Muchos de estos Elementos tienen una gran relación con la forma de obtener físicamente esa geometría mediante procesos de conformado. Por ejemplo, asociándolos a desplazamientos o acciones claramente identificables en el marco de la fabricación, tales como, extrusión, revolución, barrido, acuerdo, etc., [Ref. 41]. Sin embargo, otros no tienen relación directa, o no existe relación con el mecanizado, como por ejemplo los Elementos Característicos: saliente, costilla, etc.

Al diseñar utilizando estos patrones (Elementos Característicos de Diseño) se pretende acercar el diseño y la fabricación utilizando una nomenclatura que, de una forma explícita y desde las primeras etapas del diseño, da pie a pensar en como se van a obtener estas geometrías.

Aunque no existe una definición universal de Elemento Característico de Diseño, algunos autores los definen como regiones de un objeto que son importantes, significativas, para una actividad o aplicación específica, [Ref. 103]. Otros autores acotan más sus definiciones en el ámbito de un diseño funcional, hablando de entidades de construcción con funcionalidad implícita y añadiéndoles relaciones o propiedades que deben cumplir, [Ref. 19], [Ref. 41] y [Ref. 92].

Esta funcionalidad implícita se hace patente en cualquier aplicación CAD comercial dedicada al diseño de piezas mecánicas, que aporta unas primitivas de diseño (Elementos Característicos de Diseño) con una fuerte carga funcional, por ejemplo:

- Generan formas geométricas por revolución de una sección alrededor de un eje común, primitiva llamada Revolución (Revolve). El acotado queda referido al eje, imponiendo unas características al modelo resultante y unos movimientos dependientes del eje seleccionado.
- Permiten añadir geometrías llamadas 'costillas' (Ribs), empleadas normalmente como elementos "ad-hoc" a ciertas superficies, a las que refuerza y rigidizan.
- Crean formas por Traslación/Barrido (Sweep), dotando a la pieza de unas características aptas para el desplazamiento de otras piezas a lo largo de ella, o para el montaje de cojinetes, casquillos, ...

Tratando de buscar una definición universal, autores como Shah et al., [Ref. 97], revisan distintas definiciones separándolas, desde el punto de vista del diseñador, en dos grupos:

- Definición "top-down", donde los Elementos Característicos son las entidades elementales utilizadas en la definición de una pieza. Se corresponde al enfoque conocido como diseño con Elementos Característicos.
- Definición "bottom-up", donde los Elementos Característicos son vistos como combinaciones de elementos geométricos que se repiten en el modelo de la pieza. Se corresponde más con un reconocimiento de Elementos Característicos.

Otros autores como Gindy et al., [Ref. 36], los describen como entidades geométricas que representan una forma patrón y que tienen algún significado. Apoyándose en esta descripción general, definen sus propios Elementos Característicos de Diseño desde una perspectiva concreta: la Planificación de Procesos. De esta forma no es necesario un reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, puesto que coinciden con los de Diseño. El principal inconveniente que tiene esta solución, tal y como se dijo en el Capítulo de Introducción, es obligar al diseñador a decidir como se fabricará la pieza desde las primeras etapas de diseño. A la vez, se impide el uso de cualquier CAD comercial.

1.2. Elemento Característico de Mecanizado

Son patrones específicos en los procesos de mecanizado, (fresado, torneado, rectificando, limado, mandrinado,...) que representan operaciones (o asociación de operaciones) comunes en cualquiera de ellos. Ejemplos de Elementos Característicos de Mecanizado son: cajera circular (circular pocket), taladro ciego/pasante (blind/thru drill), redondeo de aristas (edge round, fillet), escalón (step), superficie avellanada (ream surface), ranura (slot), chafflán (chamfer), superficie plana inclinada (straight ramp), etc. Su definición se efectúa en base a información tecnológica (diámetro, profundidad, relación con otros elementos, ...) del proceso al que representan. Su ejecución en la pieza dará lugar a una forma geométrica concreta y bien definida.

Por ejemplo, la geometría de la pieza mostrada en la Figura 3–1 puede asociarse a un Elemento Característico de Mecanizado tipo ‘ranura pasante’, el cual se define en base a una trayectoria de corte en línea recta, una herramienta (como las mostradas en la figura), un acceso exterior a la misma altura que la zona a trabajar, etc.

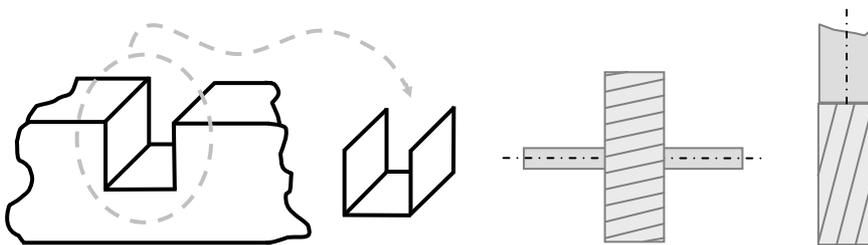


Figura 3–1. Elemento Característico ‘ranura’ y posibles herramientas.

Los Elementos Característicos de Mecanizado pueden considerarse como el agente de unión entre las aplicaciones CAD y CAM, que puede ser utilizado en una Planificación de Procesos Asistida por Ordenador (CAPP), [Ref. 43], ya que define a una pieza desde el punto de vista de la fabricación.

Como apuntan Shah et al., [Ref. 97], la definición de Elemento Característico de Mecanizado más comúnmente empleada es: *una colección de elementos geométricos relacionados entre sí, que se corresponden con un proceso o método particular de fabricación.*

En definitiva, son operaciones parametrizadas para las que existe herramienta adecuada y movimientos de corte y avance válidos. Se define Elemento Característico de Mecanizado, como aquel volumen de material que eliminado al bruto de partida genera un conjunto de superficies que delimitan una zona del modelo 3D de la pieza, mediante la aplicación de un proceso, la utilización de una herramienta y una operación válida.

La mayor parte de los autores relacionan los Elementos Característicos de Mecanizado con operaciones de un proceso concreto, fresado, torneado, ..., matizando aspectos relacionados con la herramienta a emplear. Por ejemplo, la herramienta debe ser única y no cambiar la orientación de su eje, [Ref. 88], o admitiendo la utilización de más de una herramienta (ej.: agujero taladrado y escariado) sin cambiar la configuración de la máquina en ese momento (amarres, condiciones, ...), [Ref. 103].

Tradicionalmente los Elementos Característicos de Mecanizado se han clasificado y agrupado alrededor de un tipo concreto de mecanizado, por ejemplo, mecanizado de 3 ejes, [Ref. 89], de 2 ejes, [Ref. 94], 2 ejes y medio, [Ref. 67], etc. Dentro de cada grupo se establece una estructura jerárquica que mantiene en la cúspide al Elemento Característico de Mecanizado más general, y que se va ramificando con variaciones y especializaciones (formas semblantes, similitud en su realización, ...). A medida que se desciende en esta estructura se va añadiendo información que los distingue de sus ascendentes, como la profundidad, radio, ancho, largo, ángulo, o conjuntos de Elementos Característicos de Mecanizado que contiene (islas o nervaduras de material), etc.

A continuación se van a mostrar algunas de las clasificaciones que se consideran más importantes, y que han sido propuestas y seguidas por distintos autores a lo largo del tiempo.

1.2.1. Clasificación de Kramer

Una de las clasificaciones más conocidas es la que realizó Kramer en 1992, [Ref. 59], en lo que denominó "Material Removal Shape Element Volumes" (MRSEVs). Esta clasificación está concebida como un conjunto estructurado de clases y subclases (con herencia) de entidades 'tipo', que se usarán en los planes de procesos para piezas a ser procesadas en centros de mecanizado de tres ejes, sin incluir a las superficies esculturales.

Al utilizar una estructura de clases, Figura 3-2, las de un nivel superior mantienen aquellas variables o parámetros más generales, añadiéndose los particulares a medida que se desciende en la estructura hacia otras subclases. La clasificación está especialmente pensada para una aplicación práctica, casi directa, mediante la utilización de un lenguaje de programación orientado a objetos. La estructura de clases/subclases establece un modelo de información que recopila los datos necesarios para la definición de un Elemento Característico de Mecanizado.

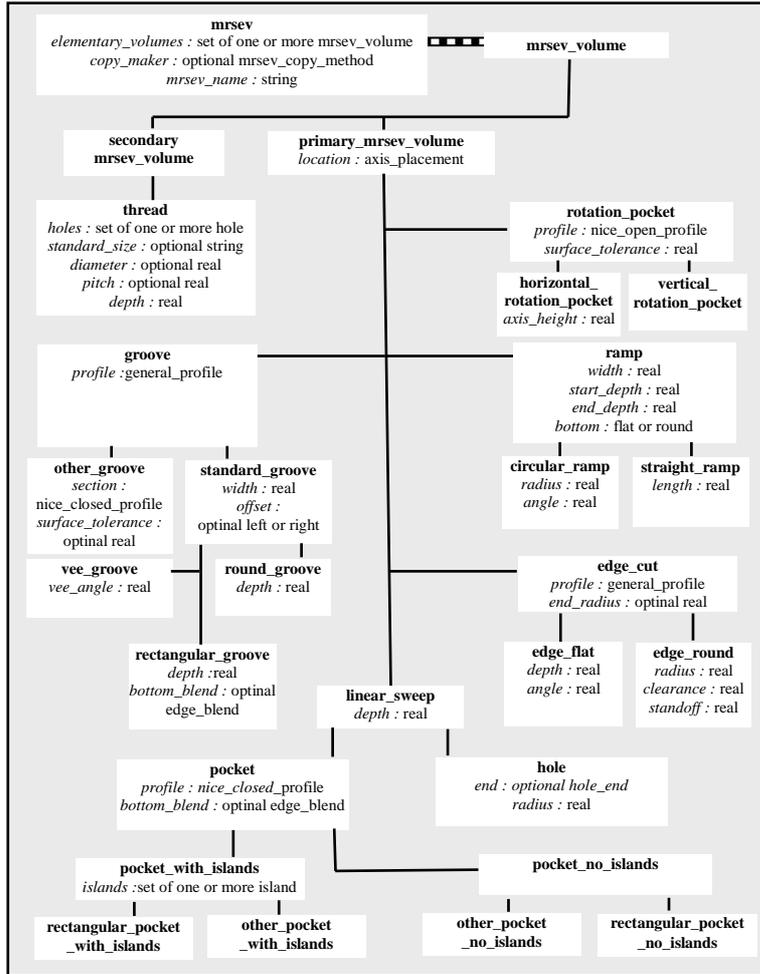


Figura 3-2. Estructura principal de clases en la clasificación de Kramer.

Como puede verse, cada clase tiene una serie de atributos y cada atributo es de un tipo específico de datos (número real, cadena de texto,...). Algunos de estos atributos son opcionales. Toda clase posee sus atributos propios, junto con otros heredados de una clase padre. Sólo aquellas clases que no se especializan en otras, representan a un Elemento Característico de Mecanizado y pueden ser usadas en el Plan de Procesos.

El principal elemento de la jerarquía mostrada es el 'mrsev', que contiene tres atributos:

- 'Elementary_volumes', conteniendo uno o varios volúmenes elementales, 'mrsev_volume', que son las entidades principales. En la jerarquía se desglosa con detalle la organización que posee uno cualquiera de estos 'mrsev_volume'.

- 'Copy_marker', establece unos métodos que permiten realizar copias y replicas de los volúmenes elementales en otras partes del modelo sin necesidad de redefinirlos completamente, para lo cual permiten varias formas de posicionarlos y orientarlos.
- 'Mrsev_name', representa al identificador único de la entidad principal 'mrsev', necesario ya que al guardarse en el fichero coexistirá junto a varias de estas entidades.

Por ejemplo, fijándose en el final de la estructura propuesta por Kramer, se observa que la clase 'cajera sin islas' (pocket_no_islands) se especializa en los tipos, 'cajera rectangular sin islas' (rectangular_pocket_no_islands) y 'otras cajeras sin islas' (other_pocket_no_islands).

Tomando a 'cajera sin islas' (pocket_no_islands) y ascendiendo en la estructura, se ve que hereda de la entidad cajera (pocket), el perfil (profile) y el tipo de base (bottom_blend), mientras que la profundidad se hereda de la clase 'pocket', denominada barrido lineal (linear_sweep). A su vez, la entidad 'linear_sweep' es subclase de volumen primario (primary_mrsev_volume), de la que hereda la localización (location).

Durante la exposición de esta clasificación, Kramer presenta, además de sus distintas clases y relaciones, una descripción detallada de cada entidad, acompañándola de un esquema para una correcta interpretación de todos y cada uno de sus parámetros.

Por ejemplo, se define a la ranura o canaleta (groove) como la forma resultante de trasladar una sección transversal, descrita con parámetros o con un 'perfil cerrado convencional' (nice_closed_profile), a lo largo de una trayectoria del tipo 'perfil general' (general profile), Figura 3-2.

En la Figura 3-3 se muestra la representación de una 'rectangular_groove', subclase de 'groove', junto a sus principales atributos a partir de los cuales puede reconstruirse la forma geométrica de la ranura. La estructura y tipo de datos que recoge son los necesarios para su obtención por mecanizado, permitiendo un manejo eficaz a través de aplicaciones informáticas.

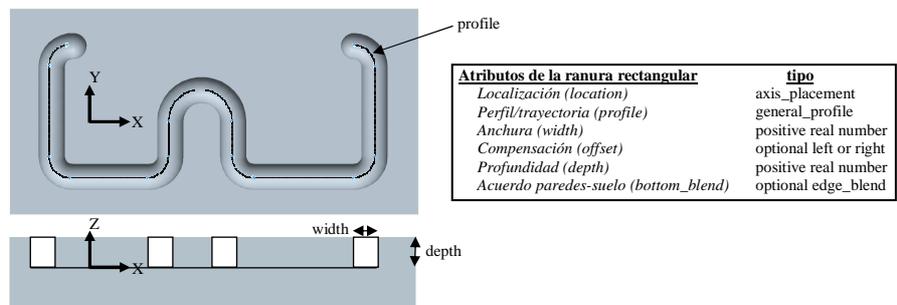


Figura 3-3. 'Rectangular_Groove', atributos y tipos.

Desde un punto de vista global, referente a los procesos de mecanizado que

abarca, la clasificación de Kramer tiene poca generalidad, ya que afecta exclusivamente al fresado. Sin embargo, dentro de este proceso cubre todas las operaciones más comunes, dejando entidades “abiertas” para contemplar casos no tan habituales.

Otro aspecto que se echa en falta en esta clasificación, es la posibilidad de incluir información relevante para la fabricación como, las tolerancias, restricciones, información del lote, etc. Si bien es cierto que, respecto a la inclusión de nuevos tipos, permite utilizar campos como el perfil general (general profile) para incorporar cualquier tipo de “forma”, eso si, como subclase de una existente. Sin embargo, pueden encontrarse otras propuestas que si incluyen relaciones geométricas y topológicas del tipo ‘tolerancias’, como la de Chep y Tricarico, [Ref. 17], o la de Hoffmann y Joan-Arinyo, [Ref. 47], que desarrollan toda una arquitectura capaz de soportar otra variedad de datos vinculados con el CAD y que son necesarios en otras aplicaciones, como por ejemplo, la Planificación de Procesos usando máquinas de control numérico.

1.2.2. Clasificación de Lin

La clasificación de Lin, [Ref. 68], es una clara representante de aquellas creadas teniendo en cuenta consideraciones propias y específicas de una técnica de reconocimiento concreta, en este caso, ‘el reconocimiento basado en pistas’. Al ver las entidades que la forman, se aprecia el criterio geométrico seguido y las pistas o trazas que desencadenarán el proceso de identificación.

En la clasificación de Lin se proponen los siguientes diez grupos: ‘hole’, ‘counter-bore’, ‘counter-sink’, ‘pocket’, ‘slot’, ‘step’, ‘shaped-slot’, ‘chamfer’, ‘draft’, y ‘round’. Cada grupo tiene como características las reglas generales que lo identifican. Una vez en el grupo, estas reglas se amplian para distinguir entre los componentes que abarca. Por ejemplo, en el grupo ‘hole’ se añaden reglas que permiten diferenciar entre un agujero pasante, ciego y de fondo plano, ciego y de fondo cónico, pasante con lamado, etc.

A continuación, Figura 3–4 y Figura 3–5, se presentan dos ejemplos de Elementos Característicos de Mecanizado propuestos en esta clasificación, así como las reglas usadas para su reconocimiento.

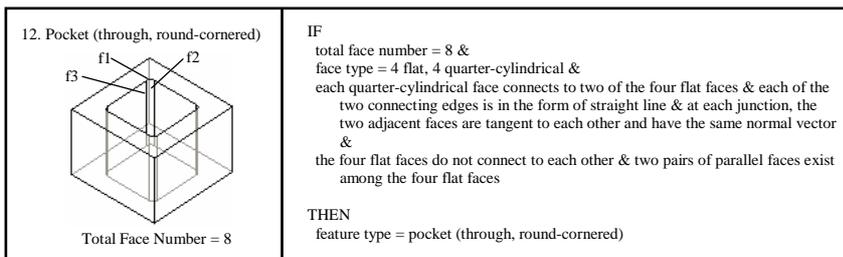


Figura 3–4. Elemento número ‘12’ de la clasificación de Lin.

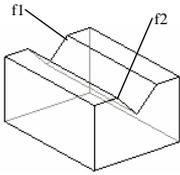
<p>25. V-slot</p>  <p>Total Face Number = 2</p>	<p>IF total face number = 2 & face type = 2 flat & the two connect to each other & the connecting edge is in the form of straight line & angle between the two faces is less than 180° among the four flat faces</p> <p>THEN feature type = V-slot</p>
--	---

Figura 3–5. Elemento número ‘25’ de la clasificación de Lin.

La clasificación de Lin utiliza a sus entidades como patrones de búsqueda, ya que la separación se realiza a partir de aquellas “pistas” que permiten identificar esa zona geométrica como un Elemento Característico de Mecanizado conocido.

En la solución que ofrece el reconocedor que usa esta clasificación, [Ref. 68], se entregan operaciones concretas en función del orden de consulta de las “pistas”. Se puede forzar a obtener todas las soluciones que ofrece, obligando a comprobar el cumplimiento de las pistas asociadas a todos los elementos de la clasificación, o establecer una prioridad, para quedarse primero con los elementos deseados anteponiendo la comprobación de sus pistas.

Añadir nuevos patrones para ser buscados en la pieza implica concretar las condiciones que debe cumplir la geometría para cada uno, y añadir las condicionales o reglas al código del reconocedor.

1.2.3. Clasificación ISO 10303-224

La Parte 224 de la ISO 10303, [Ref. 53], con título: “Definición mecánica de un producto para la Planificación de Procesos usando Elementos Característicos de Mecanizado” (Mechanical product definition for process planning using machining features), incluye una definición y clasificación de Elementos Característicos de Mecanizado. Aunque su ámbito es bastante más amplio, su objeto es la definición de un sistema de información válido para representar el Plan de Proceso de una pieza a mecanizar, dando soporte a todo el conjunto de funciones y acciones involucradas en dicho plan.

Entre las unidades funcionales de la Parte 224 se encuentran las dedicadas a:

- Datos administrativos de la pieza (*part_administration_data*), usados para guardar información relativa a la gestión del producto, como la aprobación del producto (fecha, estado, autoridad,...), organización, persona responsable, etc., junto con el identificador de la pieza (*part_model*) para poderla referenciar en el Plan de Procesos, así como conocer el estado de revisión en el que se encuentra.
- Elemento característico de fabricación (*manufacturing_feature*), almacena la información necesaria (incluyendo la geométrica) para identificar aquellas formas que representan volúmenes de material a ser eliminados

por mecanizado (torneado y fresado) en la pieza.

- Limitaciones en las medidas (`measurement_limitations`), unidades funcionales destinadas a contener información relativa a tolerancias dimensionales y geométricas, así como relaciones y restricciones entre los distintos elementos geométricos que componen el modelo de la pieza y cuyo cumplimiento deberá quedar plasmado en la forma final. Entre algunos ejemplos de estas limitaciones aparecen, tolerancias angulares, concentricidades, tolerancia dimensional, planitud, partes de la pieza a relacionar con la tolerancia geométrica, posición de la tolerancia en la pieza, etc.
- Documentación para el control de la fabricación (`manufacturing_process_control_documentation`), mantiene información relativa al cliente, producto, a la orden de fabricación y a los requerimientos en el proceso de fabricación (`manufacturing_process_requirement_documentation`).
- Representación de las formas para el mecanizado (`shape_representation_for_machining`), destinada a almacenar la descripción física de la forma inicial del material de partida y de la pieza a obtener. Para esta definición se usa información geométrica y topológica (Parte 42).

El resto de unidades funcionales que incorpora dan soporte a, excepciones en el diseño (`design_exception`), definición de características (`feature_definition_item`), características del perfil (`feature_profile`), propiedades de fabricación de la pieza (`manufacturing_part_properties`), y requisitos en la fabricación (`requisitions`).

Bajo esta perspectiva, una pieza queda representada a partir del material de partida y el conjunto de unidades funcionales, Elementos Característicos de Mecanizado, que deben eliminarse en él para obtener la pieza en su estado final.

La principal unidad es el 'Manufacturing_feature', que identifica las entidades necesarias para mecanizar una pieza. La norma contempla tres tipos, el 'Machining_feature', 'Replicate_feature' y 'Transition_feature'.

El más general es el 'Machining_feature', que representa un volumen de material que debe ser eliminado al bruto de partida para ir obteniendo la forma geométrica final de la pieza. Para definirlo se emplean las entidades contenidas en la Tabla 3-1. Cada una de estas unidades funcionales se define con unos elementos comunes: la localización que ocupa, el perfil que los caracteriza, y el desplazamiento o trayectoria a realizar por este perfil para obtener el volumen en si.

La mayoría de entidades en esta tabla deben ser consideradas como elementos que engloban a un único concepto aplicable, conteniendo atributos que constituyen los datos necesarios en el objeto, aunque existen otras que realizan la unión de algunas simples para formar entidades más complejas.

Las entidades 'Replicate_feature' y 'Transition_feature', poseen una definición ligeramente diferente a los 'Machining_feature', ya que al apoyarse en ellos, no necesitan los mismos elementos de definición. En el caso de las 'Replicate_feature' permiten crear patrones de repetición de un 'Machining_feature', añadiendo parámetros para cambiar su localización. Los 'Transition_feature' permiten definir el tipo de transición, redondeo, chaflán, etc., entre dos o más 'Machining_feature'.

Boss	Edge_round	Rectangular_closed_pocket
Catalogue_Knurl	Fillet	Rectangular_offset_pattern
Catalogue_Marking	General_boss	Rectangular_omit_pattern
Catalogue_Thread	General_outside_profile	Rectangular_open_pocket
Chamfer	General_pattern	Rectangular_pattern
Circular_boss	General_pocket	Replicate_base
Circular_offset_pattern	General_removal_volume	Replicate_feature
Circular_omit_pattern	General_revolution	Revolved_feature
Circular_pattern	Groove	Revolved_flat
Compound_feature	Hole	Revolved_round
Compound_feature_element	Knurl	Round_hole
Compound_feature_relationship	Machining_feature	Rounded_end
Constant_radius_edge_round	Manufacturing_feature	Slot
Constant_radius_fillet	Marking	Spherical_cap
Counterbore_hole	Outer_diameter	Step
Countersunk_hole	Outer_diameter_to_shoulder	Straight_knurl
Defined_marking	Outer_round	Thread
Defined_thread	Planar_face	Transition_feature
Diagonal_knurl	Pocket	Turned_Knurl
Diamond_Knurl	Protusion	

Tabla 3-1. Elementos Característicos según 'machining_feature', 'Part-224'.

En la siguiente figura puede verse una representación gráfica que incluye alguna de estas entidades.

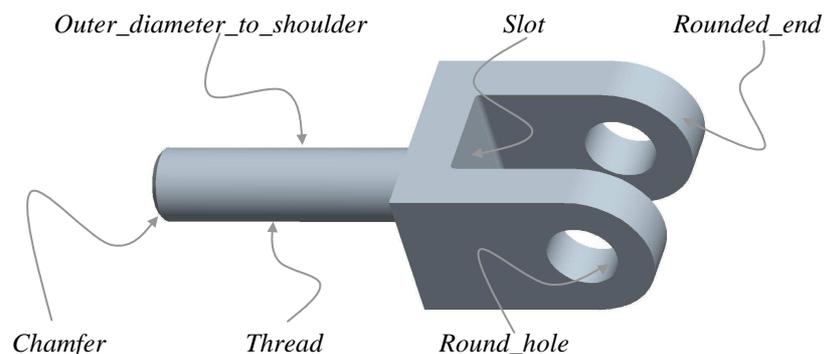


Figura 3-6. Ejemplos gráficos de 'manufacturing_features' de la 'Part-224'.

A continuación se describen las definiciones de tres de las entidades extraídas de la Tabla 3-1, y que aparecen también en la Figura 3-6:

- Agujero de revolución (Round_hole). Es un tipo de agujero resultado de la eliminación de un volumen cilíndrico en la pieza, que puede ser pasante. Su orientación se determina a través de un sistema de coordenadas situado en su base, con el eje 'Z' dirigido hacia el exterior.

- Saliente por revolución (Outer_diameter_to_shoulder). Formado a partir de la revolución completa de una sección, compuesta por dos líneas que conectan en un punto y se extienden hacia el infinito. El ángulo entre esas dos líneas debe ser menor o igual a 90°, y la transición entre ambas líneas puede ser distinta a la de un radio de

acuerdo. Esta entidad contiene como datos, el diámetro en el punto de unión de las dos líneas, y su posición y ángulo.

- Chablán/bisel (Chamfer). Se trata de una transición en los tramos comunes a dos superficies situadas en distintos planos. El chablán tiene una sección ortogonal. Se define indicando la distancia respecto a la primera superficie, junto con una cota angular o distancia respecto a la segunda superficie. Los datos asociados a un 'Chamfer' son, la forma del chablán, 'Chamfer_face', la distancia con la primera superficie a unir, 'First_face_offset', y la situación angular o distancia para la segunda superficie a unir, 'Second_face_offset'.

1.2.4. Clasificación de Sridharan y Shah

Una clasificación más actual es la que presentan Sridharan y Shah, [Ref. 100], para fresado hasta 5 ejes. Los criterios que sirven de base para esta clasificación no son únicamente geométricos, sino que incluyen aspectos directamente relacionados con el mecanizado, como son la selección de las herramientas, la configuración de la máquina, la accesibilidad, y el amarre o sujeción de la pieza. Empieza a ser patente la necesidad de atender a criterios tecnológicos más relacionados con la forma de proceder de un planificador experto. En la Figura 3-7 puede verse la estructura de esta clasificación.

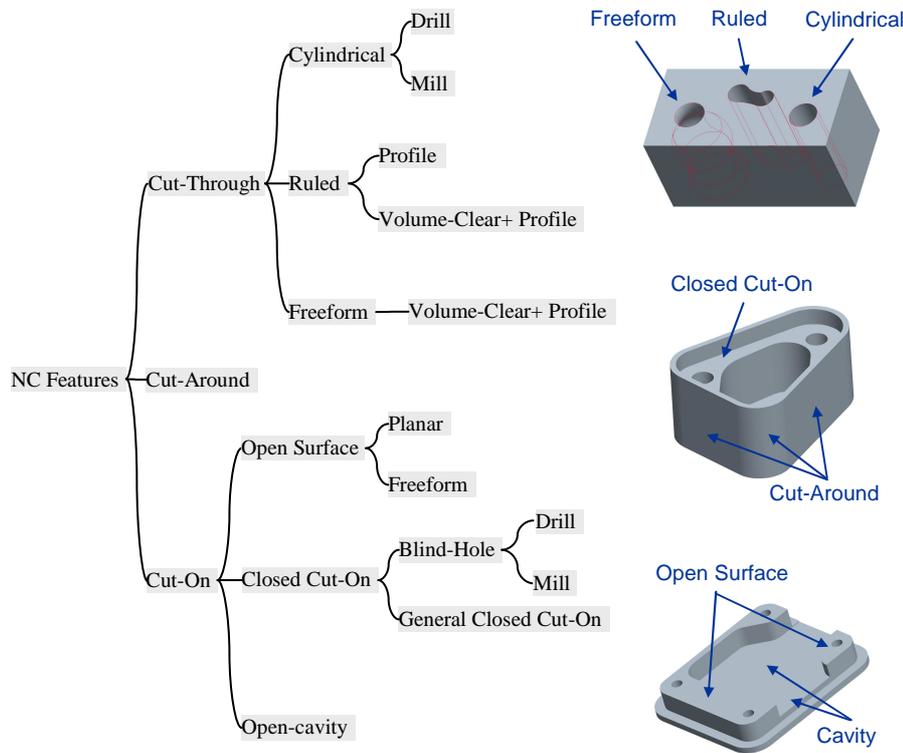


Figura 3-7. Clasificación para fresado según Sridharan y Shah.

Tal como se muestra, el primer nivel está formado por las entidades:

- Corte pasante (Cut-Through). Se corresponde con una cavidad interna pasante y con un tamaño de herramienta y acceso limitados.
- Corte periférico (Cut-Around). Corresponde a las caras limítrofes del exterior de la pieza. El mecanizado es muy dependiente del utillaje, ya que éste determina su acceso y continuidad.
- Corte sobre pieza (Cut-On), representa a cavidades internas ciegas, con al menos una superficie que las cierra, accesibles en una sola dirección y sentido.

Para los tipos 'Cut-Through' y 'Cut-On' se elabora una clasificación más detallada, realizando distinciones en función del tipo de superficies de la geometría a mecanizar, del tipo de herramienta, etc., buscando siempre una relación implícita con operaciones conocidas.

Dentro de los elementos 'Cut-Through' se distinguen:

- Cortes pasantes cilíndricos (Cylindrical). Agujeros cilíndricos simples o escalonados, realizados por taladrado (Drill) o por fresado frontal (Mill).
- Cortes pasantes guiados (Ruled). Agujeros con simetría axial, pasantes, cilíndricos, cónicos o de formas mixtas. A su vez, esta entidad se especializa en: tipo perfil (Profile), donde el diámetro de la herramienta coincide con la dimensión máxima a mecanizar, y volumen más perfil (Volume-Clear + Profile), donde la herramienta es menor que la zona a trabajar requiriendo un movimiento en el plano de trabajo para alcanzar las dimensiones finales.
- Forma libre (Freeform), representando a aquellos agujeros pasantes contruidos con formas libres, donde lo normal es eliminar un volumen de material en un primer desbaste y luego realizar un acabado.

En el grupo de 'corte de cavidades sobre la pieza' (Cut-On), se realiza la siguiente diferenciación:

- Superficie abierta (Open Surface), íntegramente mecanizable con la punta de la herramienta. Dentro de este grupo se distingue entre, planeado (Planar) cuando afecta a una o varias superficies planas realizables a la vez, y formas libres (Freeform) incluyendo al resto de superficies, así como al mecanizado de superficies esculturales con herramientas de punta esférica
- Cavidades cerradas sobre la pieza (Closed Cut-On), donde se distingue entre, depresiones cilíndricas cerradas (Blind-Hole) realizables con un taladro (Drill) o con un fresado frontal (Mill), y cualquier cavidad cerrada diferente a los 'Blind-Hole' (General Closed Cut-On).
- Cavidades abiertas (Open-Cavity), situadas a mitad de camino entre las dos anteriores, pueden verse como superficies semiabiertas con algunas paredes.

En la clasificación de las cavidades se observa como elemento decisivo el acceso disponible, ya que en el primer grupo, 'Open Surface', se permite un acceso vertical y

lateral sin restricciones, en el grupo 'Open-Cavity', aparecen restricciones en los accesos laterales aunque no se impiden por completo, y en el grupo 'Closed Cut-On', ya sólo se admite el acceso vertical, pues se trata de zonas cerradas lateralmente.

1.2.5. Conclusiones sobre las clasificaciones

Situándose ante cualquier clasificación, puede observarse que su propósito último es estructurar una pieza a través de unos Elementos Característicos de Mecanizado. Cada Elemento Característico de las clasificaciones tiene asociados unos parámetros tecnológicos sobre los que trabajará un planificador de procesos automático.

Realizando un análisis sobre la utilización de las distintas clasificaciones en los reconocedores de Elementos Característicos, se detectan las siguientes necesidades:

1.- Establecer Elementos Característicos de Mecanizado que no dependan de un proceso de mecanizado concreto, ya que se pierde generalidad y se reduce su ámbito de aplicación. Debe recordarse, que la consecución final de la mayoría de piezas se lleva a cabo con más de un proceso de mecanizado.

2.- Evitar trabajar con Elementos Característicos de Mecanizado que sólo conozcan un número limitado de personas (planificadores). Situación que conlleva una falta de universalidad y de facilidad de intercambio de información.

3.- Trabajar con unos Elementos Característicos de Mecanizado no predefinidos, ya que los predefinidos de una forma indirecta imponen ciertas condiciones de corte o modos de trabajo. Por ejemplo, afirmar que se trata de una cajera circular (circular pocket) y no de un agujero (hole), implica que la herramienta es de menor diámetro, que se realiza un desplazamiento en un plano de trabajo para cubrir la zona a mecanizar, y que se tendrá que profundizar y repetir el proceso varias veces hasta alcanzar el fondo deseado. Sridharan y Shah, por ejemplo, no asignan nombres específicos de operaciones, utilizan identificadores genéricos en función del acceso disponible en el mecanizado.

4.- Incluir todas las operaciones posibles, no sólo aquellas que se tengan modelizadas en forma de patrones. Además, puede observarse que al buscar las diferencias entre una ranura (slot) con una sola pared, un escalón (step) o una cajera abierta (open pocket) con una sola pared, no son de índole geométrico, más bien de carácter tecnológico, debido a la interpretación que se haga, como por ejemplo, si va a mecanizarse en una sola pasada, con una herramienta específica, o según una trayectoria, razón por la que se deberían ofrecer todas las opciones. Por lo tanto, si no se quieren tomar decisiones tecnológicas en este punto de la Planificación no pertinente, deberán emplearse Elementos Característicos de Mecanizado lo suficientemente generales que permitan una especificación posterior, o la incorporación de la información adecuada, una vez ya seleccionados aspectos tan relevantes como, el proceso de mecanizado, la herramienta de corte a emplear, las condiciones de corte, el tipo de amarre, etc.

5.- Disponer de la información necesaria que permita combinar los Elementos Característicos resultantes en busca de otros más complejos.

2. Material a eliminar. Concepto de Delta-Volumen

En el conformado por arranque de material, y de forma concreta en el mecanizado con herramienta de corte, la obtención de una pieza se realiza a partir de un volumen de material, bruto o material de partida, de mayores dimensiones.

Al conjunto de material que se elimina del bruto para obtener la pieza final, se le denomina Delta-Volumen, [Ref. 89], y coincide con el volumen resultado de sustraer el volumen de la pieza al modelo sólido del material de partida (bruto).

Una de las primeras etapas en la Planificación de Procesos de mecanizado, es precisamente la determinación de la forma y tamaño del material de partida a trabajar. Por razones obvias de economía, el material de partida será, en la medida de lo posible, lo más ajustado a la pieza final, mayorándola en las superficies a trabajar, o coincidiendo con éstas en aquellas que puedan aprovecharse, y por tanto, no deban ser mecanizadas.

En general, al determinar el Delta-Volumen a partir de una preforma o bruto, se pueden presentar dos situaciones: que el material de partida contenga a la pieza final en todas sus partes, o que el material de partida coincida con algunas superficies de la pieza y en el resto las mayores, Figura 3–8.

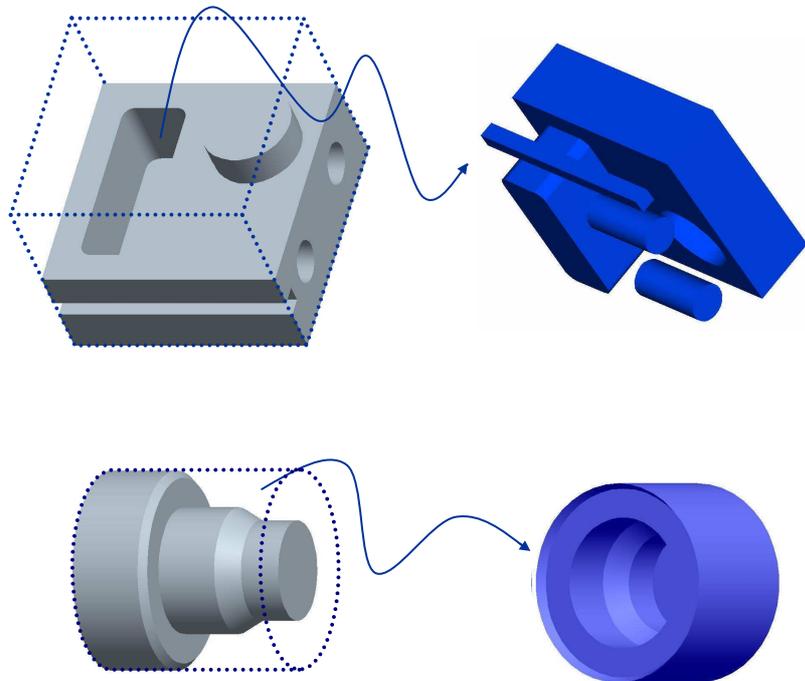


Figura 3–8. Ejemplos de brutos (líneas discontinuas) y Delta-Volúmenes (azul).

En cualquier caso, para obtener el Delta-Volumen basta con restar el modelo sólido de la pieza al del bruto. El conjunto de caras necesarias para la representación por límites del Delta-Volumen estará formado por:

- Todas las caras del material de partida que no interseccionan ni coinciden con las de la pieza.
- Todas las caras de la pieza que no coinciden ni interseccionan con las del material de partida. El sentido topológico en éstas caras será el opuesto al que tienen en el modelo de la pieza.
- Aquellas partes de las caras del material de partida que no interseccionan con las de la pieza.

En el proceso de obtención del Delta-Volumen se debe trabajar con el origen y la orientación adecuada del modelo 3D del bruto y de la pieza, puesto que se van a comparar ambas geometrías. El resultado depende de la posición relativa entre los dos.

El Delta-Volumen puede no ser una entidad continua, y estar formado por varios Volúmenes independientes, como se aprecia en el primer caso de la Figura 3–8. Desde el punto de vista de su definición y tratamiento en B-Rep, esta característica es importante, ya que no existirá un único 'CLOSED_SHELL'. Esta situación complica la utilización del Delta-Volumen en un proceso de reconocimiento, puesto que se deberán contemplar intersecciones entre los distintos volúmenes que lo forman.

Desde el punto de vista del desarrollo de una aplicación informática que se encargue de obtener el Delta-Volumen, tomando como entrada los modelos sólidos en B-Rep del material de partida y de la pieza, bastará con seguir el proceso de inclusión de caras anteriormente descrito, prestando especial atención en asegurar que la o las envolturas (CLOSED_SHELLs) queden completamente cerradas. La obtención del Delta-Volumen suele ser una de las funciones disponibles en los núcleos gráficos comerciales (kernels), sobre todo los que se apoyan en CSG, ya que se trata de una operación tan común como la intersección entre sólidos.

El concepto de Delta-Volumen es un clásico en el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, pues representa el material que debe ser eliminado. Sin embargo, se pueden distinguir dos utilizaciones preferentes del Delta-Volumen, por una parte, como punto de partida en el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, [Ref. 39], [Ref. 41] y [Ref. 103], y por otra, como comprobación del término del proceso, [Ref. 31].

3. Operación de mecanizado

Una descripción lo suficientemente general de operación de mecanizado puede ser, el trabajo realizado en una máquina mediante una herramienta de corte que, a través de unos movimientos de corte y avance uniformes, permite eliminar un volumen de material continuo.

Si se analiza la definición, las operaciones siempre se circunscriben a un proceso concreto, dando nombre a aquellas acciones más características en él y de fácil parametrización.

Las operaciones influyen en:

Aspectos relacionados con la máquina en la que se realizan, determinando:

- La herramienta necesaria para llevarla a cabo. Una operación se lleva a cabo con una única herramienta.
- El amarre necesario. Una operación se realizará con el amarre apropiado, en una sola vez, sin soltar la pieza.

Aspectos referentes a movimientos y modos de trabajo:

- Una operación se realiza con unos movimientos relativos entre pieza y herramienta, determinados y característicos, encargados de producir el arranque, y acompañados de otros auxiliares como los de acercamiento, penetración, retirada, ...
- Una operación impone aspectos relacionados con las condiciones de corte como, profundidad de pasada, avance de trabajo, avance en la retirada o en la penetración, etc.

En una operación básica, tal como se está manejando, se elimina un volumen de material continuo. De hecho, realizar dos agujeros de igual forma y tamaño, con la misma herramienta y con las mismas condiciones de corte, no se corresponderá con una única operación, sino con dos, al no ser continuo el volumen de material eliminado.

Normalmente, la eliminación del volumen continuo genera a más de una superficie de la pieza, razón por la que se utiliza más de una zona diferente de la herramienta en el corte, por ejemplo, su punta y el cuerpo.

En el contexto de la Tesis, el concepto de 'operación de mecanizado' excluye al mecanizado de superficies esculpidas, también conocido como, mecanizado 3D ó escultural. De no ser así, no tendrá ningún sentido trabajar con Elementos Característicos de Mecanizado, todo será un único Elemento Característico, bastará con encontrar la forma de la herramienta adecuada (normalmente el radio de punta) y las condiciones de corte validas para mecanizarlo, controlando las limitaciones en la accesibilidad a ciertas zonas, que provocará la falta de eliminación de material.

Otro aspecto importante que se incluye en la definición de operación, es no admitir un cambio en la orientación del eje de la herramienta durante la realización del mecanizado, situación que sucede en el mecanizado de superficies esculpidas, donde normalmente se utilizan herramientas de punta esférica que varían su orientación en función de las superficies que va encontrando.

3.1. Mecanizado de superficies esculpidas, 3D ó escultural

Son mecanizados que no atienden a un patrón concreto al estar constituidos por superficies no convencionales, también llamadas superficies de forma libre 'Freeform surfaces', formadas a partir de nurbs, splines, bezier, ..., [Ref. 13].

En estas superficies se realizarán movimientos de mecanizado curvos en más de

un plano a la vez, como puede verse en los ejemplos de la Figura 3–9. El movimiento de la herramienta sigue un patrón previamente definido, el cual se encuentra influenciado por la propia superficie.

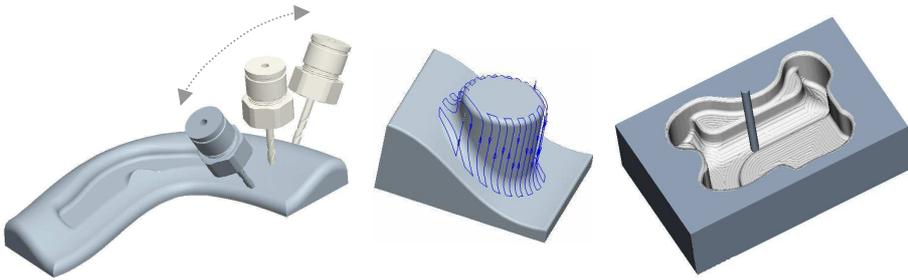


Figura 3–9. Ejemplo de mecanizado de superficies libres.

La investigación relacionada con la fabricación de piezas conteniendo superficies libres, se ha centrado básicamente en tres casos importantes:

- Orientación y accesibilidad de la herramienta, buscando el mínimo número de configuraciones necesarias para completar la pieza, y una reducción del tiempo de mecanizado.
- Descomposición de las superficies libres para obtener tiempos de mecanizado óptimos.
- Elección de la trayectoria de la herramienta, para un mecanizado directo de las superficies libres teniendo en cuenta las tolerancias dimensionales, geométricas y el acabado superficial que se obtendrá.

Como se ha explicado, llamar Elementos Característicos de Mecanizado a volúmenes con superficies libres (esculturales) no tiene sentido, ya que su mecanizado es exclusivo, está influenciado por la forma de las superficies, y no depende de pauta alguna. En estos casos se puede hablar de estrategias de mecanizado en función del tipo de trayectoria a realizar, la cantidad de material a eliminar, el tiempo empleado, etc., dejando de ser aplicable una parametrización general a la operación a llevar a cabo.

Sin embargo, si la existencia de estas superficies libres es esporádica y se incluye en alguno de los Elementos Característicos clásicos, por ejemplo, en el fondo de una cajera, pueden ser admitidos ya que el resto de superficies del Elemento permiten una fácil parametrización, manteniéndose los beneficios en el mecanizado propios del trabajo con Elementos Característicos. En estos casos pueden llegar a clasificarse como nuevos Elementos Característicos de Mecanizado, como se ve en el trabajo de Sundararajan y Wright, [Ref. 101].

Otros investigadores, para trabajar con Elementos Característicos que contienen superficies esculturales realizan un análisis, normalmente en profundidad, del volumen a eliminar en busca de zonas asociables a otros Elementos Característicos de Mecanizado que no las contengan. Por ejemplo, el trabajo de Park y Choi para fresado 3D, [Ref. 83], basado en variaciones en el eje 'Z'.

De forma similar, mediante incrementos constantes en el eje 'Z', Joo y Cho, [Ref. 57], realizan la conversión de cajas con superficies esculpidas a un conjunto de Elementos Característicos. En su propuesta Joo y Choo utilizan modelos matemáticos y operaciones sobre ellos para su obtención, guardando el orden a seguir para su correcta eliminación.

4. Zona y Volumen de mecanizado

Una 'Zona de Mecanizado' está formada por una agrupación de superficies de la pieza cóncavas entre si, que en conjunto representan un hueco o cavidad que debe ser generada por mecanizado, sobre el bruto o material de partida. La Zona de Mecanizado está delimitada por una o varias superficies, como las superficies 'S₁', 'S₂', 'S₃', 'S₄', 'S₅', 'S₆' y 'S₇', del ejemplo mostrado en la Figura 3-10.

Su mecanizado se realiza con una herramienta que en general presenta una forma geométrica convexa y que, en consecuencia, al desplazarse según una trayectoria va generando las superficies cóncavas entre si. De hecho, la forma de la herramienta es el negativo de lo que se va obteniendo.

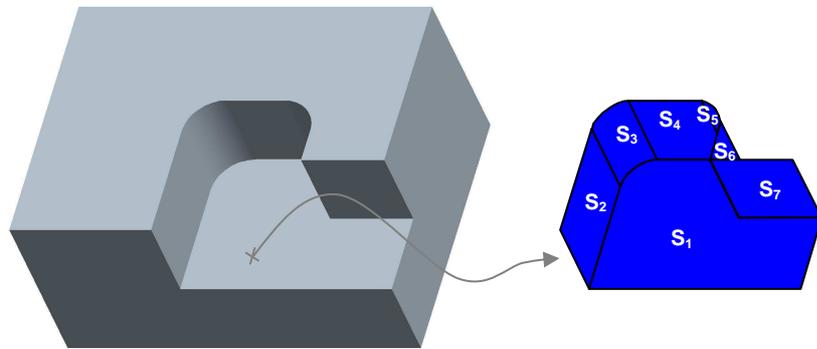


Figura 3-10. Ejemplo de Zona de Mecanizado.

Se tienen formas geométricas convexas en herramientas simples, del tipo, herramienta cilíndrica de punta plana, de punta esférica, plato de cuchillas, plaquita de metal duro (cuadrada, circular, rómbica, ...), broca, etc. Existen herramientas con formas más complejas y que pueden incluir en su perfil concavidades. Al utilizarlas en el mecanizado existirán convexidades entre las superficies resultado, quedando la Zona descompuesta en dos o más nuevas Zonas de Mecanizado. Seguramente podrá utilizarse para cada Zona por separado, una herramienta de las llamadas simples.

Por lo tanto, se deduce que una herramienta compleja no es más que una composición de herramientas simples, y que una operación realizada con la herramienta compleja también será una composición de operaciones. Un ejemplo de esto, es la realización por separado de un taladrado y un lamado, o la realización conjunta de ambas operaciones mediante la utilización de una herramienta con un perfil que abarca a los dos diámetros, uno menor para el taladrado inicial y uno mayor para realizar el lamado.

Como se desprende de la definición de Zona de Mecanizado, y se aprecia en la Figura 3–10, una Zona no define un Volumen completamente cerrado. Sin embargo, el Volumen de Mecanizado asociado a una Zona de Mecanizado, es la cantidad de material (volumen) a eliminar en el bruto de partida para generar todas las superficies de la Zona.

El paso de la Zona de Mecanizado al Volumen de Mecanizado requiere la definición completa de éste último, realizada normalmente a partir de la forma geométrica del material de partida, que determinará como cerrar la Zona.

En general una Zona de Mecanizado da lugar a un Volumen de Mecanizado que puede ser eliminado con una operación. No obstante, en ocasiones la Zona de Mecanizado requiere la ejecución de más de una operación. Al Volumen cuya eliminación es asociable directamente a una operación de mecanizado se le llama Volumen básico.

Cuando la generación de una Zona de Mecanizado necesita la eliminación previa de otra, obtener el Volumen de ésta se vuelve más complicado, ya que no está en contacto con el bruto y hay que decidir como cerrar el Volumen, de hecho, existen infinitas soluciones. Aún así, deberá elegirse una forma de cerrarlo que, aún no siendo la óptima, sea válida. La elección de la forma de cierre dependerá especialmente de la geometría de la herramienta que lo elimine y de los Volúmenes previos.

A lo largo de la solución propuesta en la presente Tesis se verá que la opción seguida, para obtener el Volumen de mecanizado a partir de un conjunto de superficies, pasa por utilizar una de ellas como Plano de Trabajo, sobre la que se realizará la trayectoria de corte, generándose las demás con un perfil adecuado de herramienta. Siendo precisamente este perfil de herramienta y el recorrido que se sigue, la forma de cerrar el Volumen en aquellos puntos donde no existan superficies a generar.

Existen trabajos, como el de Venkataraman y Sohoni, [Ref. 105], que se centran exclusivamente en la reconstrucción del volumen a partir de unas cuantas superficies de él. Esto indica la importancia que tiene desde el punto de vista del mecanizado. En su solución se apoyan en la geometría e incorporan el uso de ciertos heurísticos para obtener aquellas partes inexistentes.

Uno de los conceptos básicos para la determinación de las Zonas, y por tanto de los Volúmenes de Mecanizado, es la relación de concavidad/convexidad entre las superficies de la pieza, como a continuación se explica.

4.1. Concavidad y Convexidad

En B-Rep, una arista o tramo relaciona a dos superficies entre si, sólo a dos, por lo tanto, cuando se habla de concavidad/convexidad se está relacionando a dos superficies que comparten un recorte en al menos una arista.

Observando una pieza, Figura 3–11 por ejemplo, puede verse que el hueco que posee está formado por las superficies, 'S₃', 'S₄', 'S₅' y 'S₆', que son cóncavas entre si, mientras que el resto son todas convexas unas con otras.

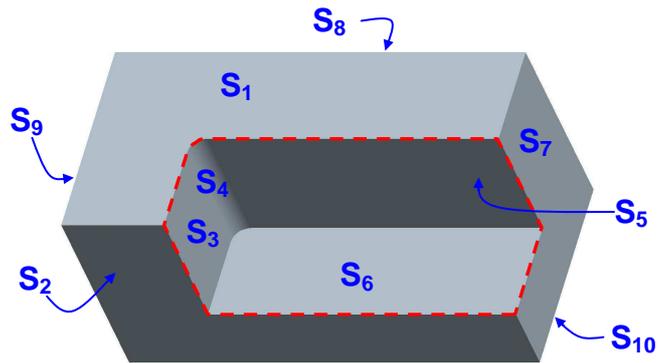


Figura 3–11. Pieza ejemplo para concavidad.

La relación de concavidad/convexidad entre dos superficies debe determinarse a partir de la topología, situándose en el exterior de la pieza, donde no existe material, más específicamente sobre el tramo o arista en común que une a las dos superficies implicadas.

Por su propia definición, una Zona de Mecanizado está limitada exteriormente por un conjunto de superficies (línea roja discontinua en la Figura 3–11), que presentan siempre relación de convexidad con el resto de superficies de la pieza.

Pueden encontrarse casos donde las superficies de la Zona de Mecanizado no siempre son cóncavas entre sí, Figura 3–12, apareciendo parejas de superficies con una relación de convexidad entre ellas. La cuestión será decidir qué superficies pertenecen a la Zona de Mecanizado, y cuáles no, en función de la relación de concavidad/convexidad con las demás.

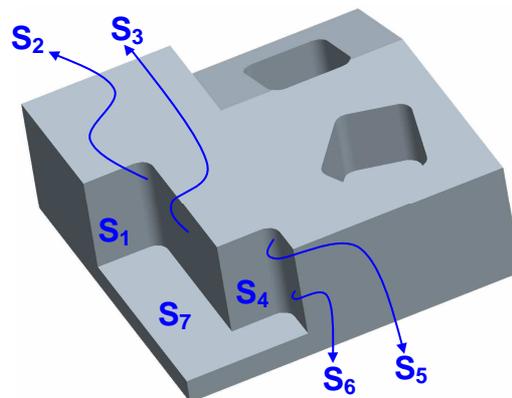


Figura 3–12. Zona de Mecanizado con superficies convexas.

En la Figura 3–12 puede observarse una Zona de Mecanizado formada por las superficies, 'S₁', 'S₂', 'S₃', 'S₄', 'S₅', 'S₆' y 'S₇', donde todas son cóncavas entre sí menos 'S₃' y 'S₄' que son convexas.

Capítulo 4. Estado del Arte

Este capítulo se destina a realizar un repaso de las distintas técnicas y de los principales trabajos y propuestas dedicadas al reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado (AFR: Automatic Feature Recognition).

Pueden encontrarse trabajos sobre el 'reconocimiento automático' que datan de principios de los 80, incluso antes, de la mano de autores como Kyprianou, L.K.; Woo, T.C.; Requicha, A.A.G, en los que se ven las primeras caracterizaciones y se realizan las primeras clasificaciones de los Elementos Característicos de Mecanizado. Desde el comienzo, en estos trabajos se empezó a tomar conciencia de la gran relación con el modelado sólido, y de las implicaciones del método de representación del modelo elegido en el proceso de reconocimiento. Los dos métodos de representación más destacados y utilizados son: Boundary Representation (B-Rep) y Constructive Solid Geometry (CSG).

Durante la década de los 90 toma fuerza el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado, apareciendo recopilaciones de los trabajos más relevantes en formato libro, [Ref. 97], que ayudan a difundir y explicar el objetivo perseguido, así como los desarrollos conseguidos hasta la época. Aumentan considerablemente las publicaciones de artículos y Tesis sobre AFR, empezándose a consolidar las técnicas que, de una forma embrionaria, surgieron la década anterior. Técnicas basadas en su mayoría en el reconocimiento de patrones. Simultáneamente empiezan a aparecer clasificaciones de los métodos de reconocimiento, evidenciando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, [Ref. 98].

Es a partir de 1999-2000 cuando se aprecia un cambio significativo en las técnicas empleadas. Se empieza a abandonar la idea, casi obsesiva, de una búsqueda de

patrones de mecanizado, para conceder una mayor importancia al análisis de las características propias del problema, abordándolo no sólo desde un punto de vista algorítmico, sino también tecnológico.

A continuación se realizará un repaso de las principales agrupaciones sobre las técnicas y métodos de reconocimiento automático, mostradas en publicaciones dedicadas a su revisión. Las revisiones seleccionadas no forman parte de artículos destinados a divulgar un trabajo o propuesta concreta, tienen entidad propia, y sirven para llevar a cabo una puesta en antecedentes de forma relativamente objetiva, puesto que los autores de las mismas son investigadores de reconocido prestigio en el campo del reconocimiento automático. Evidentemente mantienen una línea de trabajo y opinión formada sobre el tema.

No van a comentarse revisiones o clasificaciones incluidas en otros artículos o Tesis, pues aún siendo interesantes, suelen estar bajo la influencia del autor y del trabajo al cual acompañan.

Posteriormente, se realizará una clasificación con unos criterios propios que permitirán ver con detalle las bases y características de cada propuesta. Esta clasificación será comentada a lo largo de los puntos de este capítulo.

En 1993, Case y Gao presentaron su artículo "Feature technology: an overview", [Ref. 15], donde revisan los comienzos de un "campo en auge", el trabajo con Elementos Característicos (Features), para lo cual realizan un repaso de la terminología asociada al tema. Aprovechan para presentar la taxonomía establecida por Gindy sobre Elementos Característicos de Diseño (Form Features), comentando las distintas técnicas de modelado sólido existentes en 2D y 3D.

En su trabajo exponen, aunque sin llegar a establecer una clasificación, las distintas técnicas de Reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado. El principal criterio que utilizan para distinguir entre ellos es el formato de entrada empleado, B-Rep o CSG. Comentan las principales ventajas e inconvenientes entre el reconocimiento y el diseño basado en Elementos Característicos de Mecanizado.

También en 1993, revisado con posterioridad en 1998, la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Bath realizó un informe técnico llamado, "Feature Technology", a cargo de Parry-Barwick y Bowyer.

En este informe se remarca la necesidad de los Elementos Característicos de Diseño y de Fabricación, presentando alguna de las clasificaciones existentes, como es el caso de la de Gindy, la de Pratt y Wilson, y la de Butterfield que comentan brevemente. En el apartado dedicado al reconocimiento, muestran un esquema referente a la clasificación más común sobre las distintas técnicas existentes, esquema que puede verse en la Figura 4-1.

A su vez, realizan un repaso de los métodos más representativos, entre los que citan:

- Métodos basados en el análisis del modelo en B-Rep (Boundary Representation interrogation methods).
- Método basado en los ciclos de aristas (The Loop-based method).
- Método basado en la relación entre superficies (The FACE-based method).

- Reconocimiento de Elementos Característicos a través de modelos basados en B-Rep (Feature recognition using Boundary Representation modelers).
- Reconocimiento basado en grafos (Graph-based recognition).
- Reconocimiento sintáctico (Syntax-based recognition).
- Análisis de los volúmenes equivalentes a las cavidades (Cavity volume).
- Reconocimiento de Elementos Característicos usando modeladores basados en operadores geométricos tipo, unión, intersección, resta, etc. (Feature recognition using set-theoretic geometric modelers).
- Modelado sólido a partir de la eliminación de Elementos Característicos (Destructive modeling with features).
- Búsqueda y extracción de primitivas a través del árbol de operadores que representa al modelo de la pieza, con relaciones espaciales concretas (Unification and extraction of features).
- Basados en sumas alternativas de volúmenes o descomposición de volúmenes (Feature extraction by volume decomposition).

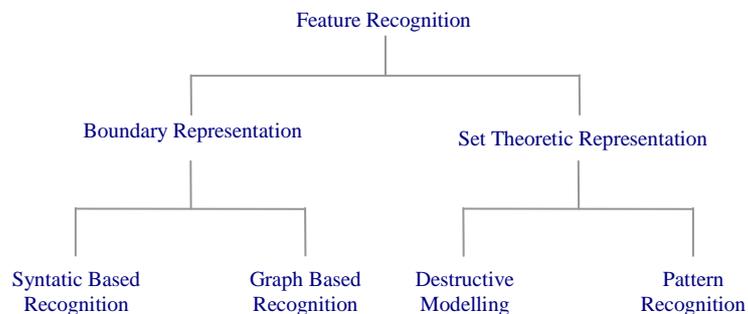


Figura 4-1. Métodos más habituales empleados en el reconocimiento.

Finalmente discuten sobre los principales problemas que se encuentran en común en los métodos citados y que limitan su aplicación, y sobre los resultados con ellos obtenidos. Entre estos problemas destacan, la interacción entre Elementos Característicos, problemas relacionados con la alineación (superposición de modelos geométricos), con las tolerancias de cálculo requeridas, con la validación de lo obtenido, etc.

Shah y Mäntylä, en su libro publicado en 1995, [Ref. 98], repasan las principales técnicas de la época, agrupándolas en:

- Reconocimiento a partir de modelos basados en B-Rep (Recognition from Boundary Models).
- Coincidencia de patrones en grafos (Graph Matching).
- Reconocimiento sintáctico (Syntactic Recognition).

- Algoritmos basados en reglas (Rule-based algorithms).
- Reconocimiento basado en procedimientos (Procedural Feature recognition), entendido como la utilización de procedimientos y funciones específicas para cada tipo de Elemento Característico de Mecanizado a reconocer, para lo cual se apoyan en la geometría y topología, así como en el uso de heurísticos.
- Algoritmos de reconocimiento por descomposición de volúmenes (Recognition by Volume Decomposition Algorithms).
- Descomposición basada en suma alternativa de volúmenes (Alternating Sum of Volumes Decomposition).
- Descomposición basada en el Delta-Volumen (Delta-Volume Decomposition).
- Reconocimiento basado en la descomposición del modelo de la pieza en un conjunto de elementos redundantes o celdas (Recognition of Multiple Feature Models).
- Reconocimiento a partir de modelos CSG (Recognition from CSG Models).
- Reconocimiento a partir de dibujos 2D (Recognition from Two-Dimensional Drawings).

Mencionan los sistemas denominados híbridos, entre los que distinguen los dedicados a resolver interacciones con técnicas específicas, y los que combinan el reconocimiento automático a través de la interacción con el usuario.

En último lugar dedican un capítulo a las nuevas tendencias, como es el caso de la utilización de redes neuronales, el análisis de los ciclos de aristas que delimitan las superficies de la pieza, o el reconocimiento incremental, entendido éste como el que se lleva a cabo durante el proceso de diseño o modificación del diseño.

Por su parte, Han et al., [Ref. 44], en su artículo "Manufacturing Feature Recognition from Solid Models: A Status Report", dan referencia de algunas de las clasificaciones más relevantes, aunque ellos son partidarios de no aceptar una clasificación preestablecida como estándar, sino la de utilizar un estándar que permita definir y dar significado a posibles Elementos Característicos de Mecanizado (ISO 10303. AP-224).

Explican con detalle los fundamentos de las siguientes técnicas y las principales propuestas y avances en las mismas:

- Búsqueda de patrones en grafos.
- Descomposición basada en volúmenes, como el 'convex hull' y el 'cell-based'.
- Propuestas basadas en reglas, pistas o trazas.

Es, en esta última técnica en la que los autores han trabajado, aprovechando para comentar ciertas herramientas experimentales y comerciales desarrolladas, tales como:

- OOFF (Object-Oriented Feature Finder) y su evolución denominada F-Rex.
- IF² (Integrated Incremental Feature Finder).
- La solución comercial FB Mach (Feature-Based Machining Husk).

Dedican un punto a lo que denominan “casos abiertos”, donde tratan aspectos problemáticos comunes y no resueltos satisfactoriamente, como es el caso del reconocimiento de interacciones entre Elementos Característicos. Aprovechan para presentar otras técnicas de reconocimiento: técnicas híbridas y técnicas en las que se manejan múltiples interpretaciones de la pieza (incluyendo sus estadios intermedios de representación).

En el año 2002, y en dos artículos agrupados bajo el título “Evaluation of existing and new feature recognition algorithms”, uno dedicado a la teoría y al desarrollo (Part 1: theory and implementation), [Ref. 80], y el otro a la comprobación práctica del funcionamiento de los algoritmos (Part 2: experimental results), [Ref. 81], Owodunni e Hinduja analizan seis métodos algorítmicos diferentes encargados de identificar a las superficies que delimitan a los huecos y salientes en un modelo geométrico.

Como se tendrá ocasión de comprobar en este mismo Capítulo, estos algoritmos pertenecen a los métodos agrupados bajo el nombre de ‘Técnicas basadas en conocimientos tecnológicos’, concretamente al llamado: ‘Razonamiento basado en las concavidades’.

La recopilación de Owodunni e Hinduja permite, de una forma resumida, ver cuales son las tendencias en el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, evidenciando los problemas a resolver y la dificultad de encontrar una solución completa y general. La parte práctica refuerza la exposición teórica de los algoritmos, mostrando resultados de su ejecución sobre piezas obtenidas del National Design Repository, [Ref. 78]. Adjuntan una tabla donde comparan el resultado ofrecido por cada algoritmo con cada una de las piezas de prueba seleccionadas, y donde comentan las ventajas y desventajas de su utilización.

Como ya se ha indicado, el resto del capítulo se va a dedicar a presentar con cierto detalle las principales técnicas existentes para el reconocimiento de Elementos Característicos, clasificadas de acuerdo a un criterio propio. Este criterio se basa en agrupar a las que hacen uso de algoritmos de carácter general para realizar el reconocimiento, y a aquellas otras que estudian inicialmente el proceso tecnológico implicado e incorporan el resultado en unos algoritmos propios de búsqueda.

Se ha decidido no realizar un seguimiento cronológico estricto de los trabajos, pues la mayoría de las propuestas o métodos siguen activos, bien porque se sigue trabajando en ellos para resolver los problemas que presentan, bien porque se usan en parte, en soluciones posteriores.

Por lo tanto, la clasificación realizada atiende a la técnica de resolución empleada, aunque sin renunciar a aportar referencias temporales sobre los distintos métodos que incluye. Esta clasificación contiene tres grandes grupos:

- Técnicas algorítmicas, basadas en la adaptación/transformación de los datos del problema al algoritmo a emplear. En este caso la geometría de la pieza se convierte a unos datos utilizables en algoritmos y técnicas informáticas existentes y ampliamente conocidas.
- Técnicas basadas en conocimientos tecnológicos, donde los conocimientos sobre mecanizado (máquinas, operaciones, herramientas, configuraciones posibles,...) son los que guían al proceso de búsqueda o reconocimiento.

- Técnicas híbridas, en las que se usa o combina más de un método diferente. Éstos no tienen que pertenecer necesariamente a una sola de las técnicas comentadas.

Como ya se ha señalado, uno de los principales problemas en el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado es la intersección/interacción entre ellos, pues debido a ella, desaparece información geométrica y topológica que dificulta su identificación. En los distintos métodos que se comentarán se hace referencia constante a este problema, entre otros.

Puede encontrarse una explicación detallada sobre la intersección de Elementos Característicos, bajo el punto de vista de la fabricación, en el artículo "What is a manufacturing interaction?" de Faheem et al., [Ref. 29].

Podrá observarse a lo largo de la exposición de este capítulo, que salvo contadas ocasiones, no se incluyen referencias a trabajos anteriores a 1993. La razón es, que muchos de los métodos empleados en la actualidad son modificaciones y mejoras de otros anteriores, que quedan incluidos al explicar los más recientes. En la mayoría de casos los autores se repiten, pues siguen trabajando en la misma línea o evolución de ésta, aprovechando las mejoras en cuanto nuevos algoritmos y propuestas, mayores velocidades de proceso, mejores núcleos gráficos, etc.

1. Técnicas algorítmicas

A este grupo pertenecen las primeras técnicas que se emplearon en el reconocimiento automático, todavía en vigor en la actualidad. El principio de funcionamiento, común a todas ellas, es la utilización en el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado de un algoritmo o técnica de programación existente y perfectamente conocida.

La elección del algoritmo obedece a una correspondencia entre el problema que se maneja y el problema 'tipo' para el que fue desarrollado. Esto exige una transformación o adaptación de los datos de entrada, a la estructura y formato adecuados para el algoritmo a emplear. Un claro ejemplo de esto se tiene en la utilización de estructuras de datos en forma de árbol, para beneficiarse del conjunto de algoritmos de generación y recorrido de árboles, llamados de "ramificación y poda".

En general, esta transformación no supone un gran problema, pues la mayoría de veces se trata de un simple cambio de formato. En otros casos, se incorpora información adicional para aumentar el ámbito de aplicación del algoritmo, por ejemplo, añadiendo datos numéricos que permitan ponderar los parámetros considerados importantes.

A continuación se citan los principales inconvenientes que presentan las técnicas algorítmicas, y por lo tanto, los métodos que en ellas se apoyan.

- Complejidad computacional elevada (NP-complete problem).
- Reconocimiento limitado al conjunto de patrones utilizados en la búsqueda. Cualquier particularidad que se quiera introducir debe tener su correspondiente patrón.

- Dificultad para reconocer interacciones entre Elementos Característicos, por la pérdida de información geométrica y topológica que ésta provoca.
- Uso restringido a piezas formadas sólo por superficies planas. En algunos casos tratan piezas que incluyen superficies cilíndricas.
- Poseen ciertas limitaciones para manejar Elementos Característicos no ortogonales, sobre todo en métodos basados en la coincidencia de patrones ('matching') que manejan la información topológica, como la dirección y sentido de las normales a las superficies.
- Al apoyarse en técnicas algorítmicas existentes, es muy difícil guiar o reorientar el reconocimiento en base a conocimientos tecnológicos. La inclusión de éstos supone un cambio radical en el algoritmo.
- Habitualmente y debido al propio algoritmo, no suelen presentar soluciones alternativas, por ejemplo, distintos Elementos Característicos de Mecanizado para una misma zona a mecanizar.

1.1. Reconocimiento por coincidencia de patrones en grafos

Traducción de la denominación en inglés "Graph Pattern Matching" o "Graph Matching", en este método se utilizan las estrategias y algoritmos existentes para recorrer los grafos en busca de coincidencias entre un patrón y una parte del grafo (subgrafo). Los patrones representan a los distintos Elementos Característicos de Mecanizado a reconocer.

Para hacer uso de los métodos basados en grafos, la geometría de la pieza y la de los patrones se convierte a grafos (conjuntos de nodos interconectados a través de arcos/líneas). Los nodos de un grafo representan habitualmente a las superficies, mientras que los arcos indican la relación entre dos superficies a través de una arista común. Normalmente el formato empleado para el modelo geométrico de entrada es B-Rep, ya que su transformación en un grafo es directa.

Los primeros sistemas de reconocimiento basados en coincidencias en grafos empezaron a utilizarse a finales de los 80, por grupos de trabajo como los formados por Joshi y Chang, Sakurai y Gossard, De Floriani y Bruzzone, ..., [Ref. 97].

Entre los principales problemas que se encuentran en los métodos basados en coincidencias en grafos destacan:

- La complejidad computacional del algoritmo es elevada, se trata de un problema computacional No Polinómico (NP-complete problem). Para solucionar este problema, en ocasiones se recurre a la inclusión de heurísticos. En la Tesis de Cicirello, [Ref. 19], puede encontrarse una excelente descripción de los principales algoritmos para el manejo de grafos, así como las mejoras que propone, sobre todo, en la reducción de tiempos computacionales, [Ref. 20].
- No permiten reconocer Elementos Característicos de Mecanizado cuando estos interaccionan. Al interaccionar se pierden partes de los Elementos, con lo cual, no es posible comprobar la plena coincidencia con un patrón, sobre todo si

las partes modificadas o eliminadas son aspectos clave en su identificación. Solucionar este problema añadiendo patrones para caracterizar todas las interacciones posibles, no parece una solución acertada. Algunos autores, [Ref. 71], trabajaron en el desarrollo de algoritmos encargados de reconstruir los Elementos Característicos incompletos, pero a veces introducen falsos Elementos. Para solucionar este nuevo problema se introdujeron restricciones tan fuertes que hacen que el algoritmo no sea útil en la realidad, por ejemplo, permitir sólo caras planas no inclinadas.

- Los algoritmos basados en esta técnica no tienen en cuenta aspectos tecnológicos fundamentales en el ámbito de la fabricación, por ejemplo, reconocen una 'cajera' cuando no existe accesibilidad de herramienta para su mecanizado.

En la Figura 4-2 se ve un ejemplo simple de aplicación de esta técnica donde se muestra la pieza, el grafo que le corresponde, y el grafo patrón que representa a un agujero ciego. Este patrón puede verse incluido en el grafo de la pieza, pues en ella existe un agujero ciego central.

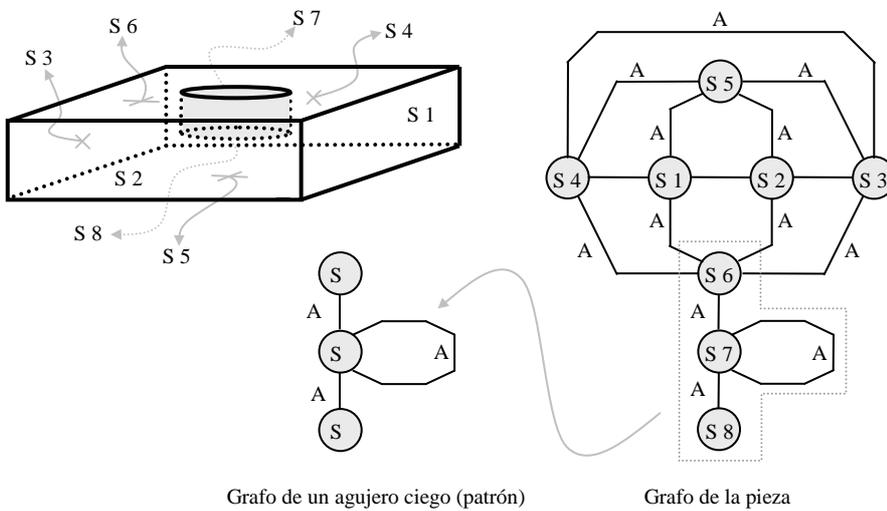


Figura 4-2. Pieza, grafo que la representa y ejemplo de grafo patrón.

Los trabajos en esta línea han continuado en la actualidad, incorporando a la técnica básica matices que permiten ampliar su eficiencia. Esta situación complica los grafos y el tratamiento que sobre ellos se realiza, empeorando los tiempos de respuesta.

Un ejemplo, es el trabajo de McCormack e Ibrahim para fresado frontal, [Ref. 72], en el que utilizan como entrada un modelo gráfico en B-Rep, según el estándar STEP, y lo convierten a un grafo con atributos adicionales. Los nodos representan las superficies y los enlaces las aristas. Se añaden además dos atributos, uno a los enlaces para indicar el tipo de relación entre las superficies que une, y otro a los nodos para caracterizar a las superficies.

Entre los datos adicionales que se añaden a una superficie aparece su tipo, plana, cóncavo-curva, etc. En lo referente a las aristas se indican aspectos tales como, el tipo de transición, el ángulo entre superficies, etc. De esta forma se puede distinguir si el Elemento Característico de Mecanizado detectado es una ranura rectangular o en forma de 'V', con tan sólo recuperar, por ejemplo, el ángulo entre las superficies "pared". Puede consultarse en su artículo: "Process Planning Using Adjacency-Based Feature Extraction", [Ref. 73], una descripción completa del tipo de atributos y una clasificación de los Elementos Característicos de Mecanizado.

Los datos adicionales tratan de solucionar la pérdida de información debida a la interacción entre Elementos Característicos de Mecanizado. Además, permite agrupar a los Elementos Característicos individuales resultado de una interacción.

A pesar de la información adicional, la solución de McCormack e Ibrahim sigue manteniendo los problemas propios de las técnicas algorítmicas. La complejidad computacional aumenta al aumentar la información, además, se necesita la actualización y mantenimiento de la base de datos de patrones con los atributos correspondientes, y con los nuevos patrones a detectar. Otra característica es que mantiene una comprobación en paralelo, utilizando una descomposición en volúmenes sobre un modelo CSG, para asegurar que se ha completado la pieza de entrada.

Una utilización similar de los grafos se realiza en la propuesta de Wong y Lam, detallada en el artículo "Automatic recognition of machining features from computer aided design part models", [Ref. 106]. En ella, se toma como entrada el modelo en B-Rep, pero en lugar de generar un grafo único para toda la pieza, se generan subgrafos de menor complejidad, donde sólo hay aristas cóncavas. Estos subgrafos se completan con información topológica del tipo, dirección espacial de las aristas y superficies, arcos en aquellas aristas relacionadas entre si a través de otras comunes, etc. La información extra se usa para tratar los problemas de interacción y no ortogonalidad en los Elementos Característicos.

Con estos subgrafos y con la ayuda de una red neuronal, descomponen y orientan a aquellos posibles Elementos Característicos no ortogonales al sistema de referencia de la pieza.

Solucionado el problema de la no ortogonalidad, pasan a reconocer Elementos Característicos de Mecanizado comprobando cuales pueden ser las superficies límites en los subgrafos, de forma que, tomando una dirección favorable en el mecanizado, puedan obtenerse el resto de superficies mediante barrido. Por lo tanto, están utilizando unos patrones cuyos volúmenes se definen a partir de una dirección y sección de barrido.

En caso de encontrarse ante Elementos Característicos resultado de una descomposición y orientación previa por falta de ortogonalidad, se reúnen a todos los procedentes del mismo volumen inicial para combinarlos, ofreciendo distintas soluciones. La variedad en las soluciones se consigue a través de unos heurísticos que favorecen ciertos aspectos, como mantener el mismo tipo en los elementos resultado, o mantener una orientación común para la herramienta que los genere.

Alguno de los aspectos que se echan en falta en la propuesta, es conocer como se determina "la dirección favorable en el mecanizado", o como se tratan las geometrías que contienen islas de material en su interior, ya que las únicas

geometrías que contempla son las generables por barrido.

Huang y Yip-Hoi, [Ref. 48], no sólo se apoyan en el reconocimiento basado en grafos, sino que proponen establecer otros patrones que denominan de “Alto nivel”, tales como taladros de forma, plantillas de agujeros, unión de cajeras, o cualquier otro patrón bajo un punto de vista o aplicación concreta y con significado para el usuario. Los patrones de “Alto nivel” están formados por la unión de unos simples, de “Bajo nivel”. Por ejemplo, el agujero encargado de alojar y guiar una válvula en un motor de explosión (patrón de “Alto nivel”), está formado por varios cilindros unidos unos encima de otros, con diferentes transiciones entre ellos (planas, cónicas, etc.). Estos cilindros de forma aislada representan a los patrones de “Bajo nivel”, e incorporan datos sobre su disposición y transición en forma de restricciones.

Para su propósito, Huang y Yip-Hoi utilizan una variación de los grafos relacionados por atributos (ARG: Attributed Relational Graph), los grafos parametrizados y restringidos (CPG: Constrained and Parameterized Graph). Un CPG es un grafo ARG en el que los atributos de los nodos y arcos son variables, y al que además se añaden restricciones sobre sus parámetros. A partir de toda esta información pueden establecerse los subgrafos de “Alto nivel”, procediendo a operar con la técnica de ‘pattern matching’, con la complejidad añadida de tener que satisfacer a una serie de restricciones que los validan.

Facilitan el reconocimiento basado en grafos, al permitir realizar un proceso de abstracción del grafo en un ámbito específico de aplicación. Establecen varias clases de Elementos Característicos de “Alto nivel”, facilitando el proceso de abstracción, distinguiendo entre clases en función de la herramienta y la trayectoria que ésta realiza para su consecución.

Consideran los patrones que manejan, como aquellas geometrías que pueden obtenerse por el barrido de una sección a lo largo de una trayectoria. Para los Elementos llamados de ‘forma libre’, proponen como obtener la sección que realizará el barrido a partir de las aristas que delimitan a las propias superficies a obtener. No concretan como establecer los vectores iniciales, sobre los que se apoyan, o como determinar que superficies son pared o fondo en geometrías no ortogonales, sin embargo, si comentan la sistemática a seguir ante superficies incompletas debido a intersecciones, aunque no ante superficies con salientes o islas de material.

Lee y Kim, [Ref. 61], abordan de pleno el problema de la obtención de diferentes Elementos Característicos de Mecanizado para una misma zona. Estos elementos se obtienen durante el proceso de modelado de la pieza a través del uso de Elementos Característicos de Diseño. Con el conjunto inicial de Elementos Característicos de Mecanizado obtenido, y utilizando grafos ‘And/Or’ a los que se les añade una serie de funciones que permiten expresar, reorientación, reducción, separación, y unión de elementos, obtienen una representación con varias alternativas. Comprueban que con cualquiera de las soluciones se abarca completamente la forma geométrica final a obtener en la pieza. Resulta interesante la explicación sobre el desarrollo teórico seguido para obtener las distintas alternativas con las funciones propuestas, así como el empleo del estándar STEP para guardar los resultados.

A través de una técnica muy similar Li et al., [Ref. 63], amplían el número de tipos de interacciones reconocidas entre elementos, e incluyen el tratamiento de Elementos Característicos complejos, del tipo composición entre elementos y réplicas (plantillas

de Elementos Característicos). En su solución incorporan aspectos relacionados con la comprobación de la orientación de la herramienta asignada, para un correcto acceso en el mecanizado completo del Elemento. Toman como orientaciones iniciales las normales a ciertas superficies que asumen como base, una vez identificado el Elemento Característico.

Podría pensarse en incluir los métodos de Lee y Kim, junto con el de Li et al., en el grupo referido a la descomposición en volúmenes, sin embargo no se debe olvidar que trabajan con volúmenes procedentes de los Elementos Característicos de Diseño, y más que un reconocimiento se trata de un mapeo. Por lo tanto, se ha decidido considerar la utilización de los grafos que hacen para operar y ofrecer varias alternativas, como razón de peso para mantenerlos en este grupo.

Un avance significativo en el uso de grafos se encuentra en el trabajo de Di Stefano et al., [Ref. 24], en el que se evidencia la problemática existente alrededor de la capacidad de los formatos gráficos para representar, en más de una manera, a una misma pieza. Para solucionarlo proponen un formato propio, extensión de B-Rep, donde los modelos geométricos sólo pueden ser descritos de una única manera.

Además, introducen un concepto innovador en estos métodos: el dominio o ámbito de trabajo, permitiendo utilizar el reconocedor de Elementos Característicos bajo cualquier perspectiva, el mecanizado es una de ellas. Para lograrlo definen y buscan por coincidencia de patrones unas entidades básicas llamadas 'semantemas'. Un 'semantema' es el mínimo elemento con significado en ingeniería, que puede ser reconocido en un modelo geométrico.

Los Elementos Característicos bajo el dominio que sea, se expresan a partir de un conjunto mínimo de estos 'semantemas'. Para precisar y acotar los 'semantemas' se permite el uso de ciertas pistas (trazas) y restricciones obtenidas a partir del modelo gráfico, por ejemplo, que dos de las superficies implicadas sean paralelas entre si.

Un aspecto interesante que aparece en el artículo, es la clasificación de Elementos Característicos generales establecida, donde puede apreciarse la variación en superficies y formas que es capaz de tratar el método. En esta clasificación se aprecia una fuerte influencia del proceso de construcción de la pieza, seguido en la etapa de diseño.

1.2. Reconocimiento por conversión o 'mapeo'

Aunque puede pensarse que realizar una conversión directa entre Elementos Característicos de Diseño y Elementos Característicos de Mecanizado no debe considerarse un proceso de reconocimiento como tal, existen autores que complementan el método estableciendo unas restricciones (geométricas y topológicas) a satisfacer durante el proceso de conversión, realizando además una comparación del resultado con unos patrones preestablecidos. Esta forma de proceder merece ser considerada como un reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado.

En su trabajo, Gao et al., [Ref. 34], proponen utilizar la matemática para realizar una conversión de Elementos Característicos de Diseño en Elementos Característicos de Mecanizado. Éstos, serán deducidos a partir de los de Diseño mediante la

utilización de un conjunto de operaciones matemáticas, como la unión, intersección, resta, diferencia simétrica, etc. Incluyen durante el proceso de conversión la comprobación de relaciones del tipo, perpendicularidad, paralelismo, angularidad, superficies compartidas, etc.

Inicialmente los Elementos Característicos de Diseño se expresan según un formato matemático sobre el que se aplican funciones específicas. En el caso de interacción entre Elementos Característicos de Diseño, se incrementan los operadores matemáticos y las restricciones a aplicar para obtener la topología perdida. Con ello se reconstruyen las superficies necesarias para cada uno de los Elementos Característicos de Mecanizado en los que se ha descompuesto el de Diseño.

Esta técnica exige disponer de una clasificación y representación de los Elementos Característicos de Diseño y de Mecanizado en el formato matemático utilizado, describiendo también a los operadores y a las relaciones restrictivas disponibles.

Su ámbito de aplicación queda reducido a lo previamente guardado en la base de datos, así como al tipo de operadores previsto.

Debe recordarse, y el propio artículo así lo hace, que existen Elementos Característicos de Diseño que no tienen un equivalente con los de Mecanizado, por ejemplo los que añaden material, y que las conversiones en ocasiones no son uno a uno.

1.3. Reconocimiento a través de lenguajes formales

Un lenguaje formal puede definirse como un modo de expresión más cuidadoso y preciso que el lenguaje hablado. En un entorno informático, es un modo de expresión perfectamente esquematizado y organizado que responde a un modelo matemático y lógico específico.

Varias son las técnicas empleadas para la definición de un lenguaje formal, una de ellas es a través de una gramática formal, entendida ésta como un conjunto de reglas capaces de generar todas las posibilidades combinatorias de ese lenguaje. Uno de los modos de representar una gramática formal es a través de grafos, otro es a través de cadenas de caracteres.

1.3.1. Gramática de grafos

Una gramática de grafos es una descripción formal de una clase de grafos, que pueden ser creados mediante la aplicación de una secuencia de 'producciones' definidas en la gramática. Estos grafos poseen información adicional en los nodos y arcos, incorporada en forma de etiquetas con significado.

Las 'producciones' son una serie de funciones o modificadores que, aplicados según unas reglas, permiten transformar y combinar los grafos manteniéndose acordes a la gramática.

En una gramática de grafos se emplean algoritmos llamados 'Graph-Parsing', que sirven para determinar si un grafo concreto pertenece a la clase de grafos definidos

por la gramática, y que 'producciones' son necesarias para crearlo.

Tanto las piezas de entrada, como los patrones correspondientes a los Elementos Característicos de Mecanizado, quedarán expresados en forma de grafo. Estos grafos contienen la información geométrica y topológica necesaria para su interpretación, así como aquella adicional que se decida incluir, como por ejemplo, relaciones extra entre elementos, tolerancias, orientaciones, etc.

El hecho de utilizar gramáticas en forma de grafo viene determinado por la posibilidad de relacionar directamente mayor número de elementos con una mayor variedad en las relaciones. Situación que se evidencia si se compara con una gramática en forma de cadenas de caracteres, donde un elemento sólo se relaciona con el que posee a la derecha y a la izquierda en la cadena.

Rosen et al., [Ref. 92], utilizan una gramática basada en grafos para describir la pieza, partiendo de los grafos que representan a los Elementos Característicos de Diseño. Estos grafos se corresponden con lo que los autores denominan: 'representación primaria' de la pieza.

La combinación de los Elementos Característicos de Diseño para obtener la pieza, se realiza según unas 'producciones' establecidas, a modo de reglas sintácticas. Para obtener los Elementos Característicos de Mecanizado, definidos según la gramática, se aplica un proceso llamado de 'conversión', dividido en tres pasos:

- Filtración. En este paso se crea el grafo inicial a partir de los elementos y de la información procedente de la representación primaria.
- Selección. En esta etapa se analizan las relaciones (solapes, accesibilidades, ...) entre los elementos geométricos del paso anterior, aplicando una serie de producciones. El resultado queda expresado en forma de arcos etiquetados que conectan a las entidades.
- Reunión. Donde se recoge, y en ocasiones combina, la información anterior para transformarla en los Elementos Característicos de Mecanizado. Para ello se sigue un proceso de acondicionamiento a través de algoritmos del tipo 'graph parsing'.

Rosen et al. centraron su trabajo en piezas de paredes delgadas (chapa). En su artículo puede verse un ejemplo de utilización de la gramática basada en grafos para definir una pieza en forma de 'L'. Esta pieza se construye a partir de dos paredes planas y una transición con radio de acuerdo entre ambas. Para la pieza se usan además dos producciones distintas, una para crear las paredes planas, y otra para combinarlas en esquina con radio (corner). En la definición formal para este ejemplo se necesitan nodos del tipo, 'pieza', 'pared', 'esquina', 'superficie', etc., arcos del tipo, 'forma parte de', 'adjuntos', ..., y producciones que permitan, 'añadir pared plana', 'combinar paredes planas', etc.

Los propios autores indican que han utilizado una gramática como modelo formal con el cual determinar las propiedades teóricas de las conversiones, pero que los algoritmos 'graph parsing' no han sido directamente desarrollados debido a su complejidad computacional.

Yang y Marefat, [Ref. 111] y [Ref. 112], en su propuesta formulan el reconocimiento automático como un problema de satisfacción de restricciones

geométricas. Para su codificación utilizan una representación en forma de lenguaje, conjunto de “predicados” y relación entre ellos.

El lenguaje propuesto inicialmente cubre Elementos Característicos ortogonales, aunque pueden incluirse otros añadiendo más predicados. Con esto se está limitando el uso de la técnica a las particularidades disponibles en forma de predicados. Entre los predicados predefinidos aparecen los mostrados en la Tabla 4–1.

Predicado	Significado
Opp(f_1, f_2)	Dos superficies planas con normales opuestas
Perp(f_1, f_2)	Dos superficies planas con normales perpendiculares
Adj(f_1, f_2)	Dos superficies planas adyacentes
Type(f_i)	Tipo de superficie plana: Real (R), Borde/límite (B)
Concave(f_1, f_2)	Dos superficies adyacentes que forman ángulo cóncavo
Convex(f_1, f_2)	Dos superficies adyacentes que forman ángulo convexo
Unificable(f_1, f_2)	Dos superficies planas que se pueden unir
Cylindrical(f_1)	Una superficie cilíndrica
Angle(f_1, f_2)	Ángulo entre dos superficies planas
Num-Of-Opp-Face(f_1)	Número de superficies ‘Opp’ que tiene f_1
Num-Of-Real-Face(C_1)	Nº. de superficies ‘Real’ del Elemento Característico C_1

Tabla 4–1. ‘Predicados’ para el lenguaje de restricciones de Yang y Marefat.

En la Figura 4–3 se muestra una ‘ranura ciega’, las superficies que la integran y su definición en forma de predicados. Éstos representan las restricciones a considerar.

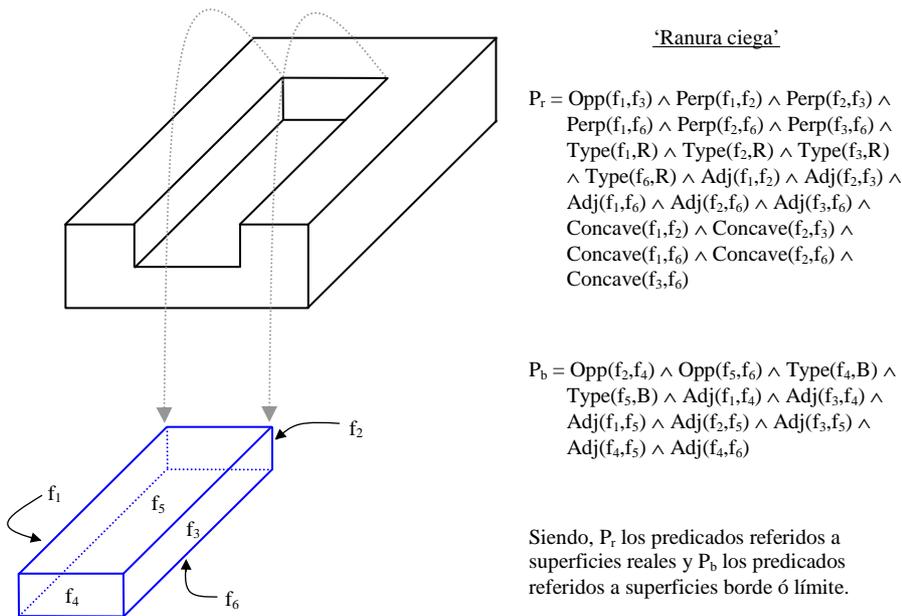


Figura 4–3. Elemento Característico ejemplo y ‘predicados’ que lo definen.

El reconocimiento se hace por coincidencia con los patrones adecuados ('mapeo'), con todo lo que el uso de patrones supone. Incluyen un método "relajado" de coincidencia para contemplar las posibles variaciones o pérdidas de información ocasionadas por la interacción entre Elementos Característicos. Para poder llevar a cabo el reconocimiento y comprobación de restricciones, mapeo, emplean grafos restringidos y técnicas de propagación de restricciones.

1.3.2. Gramática de caracteres

Este método de reconocimiento se basa en codificar con caracteres los distintos Elementos Característicos de Mecanizado que van a tratarse (patrones). A su vez, se realiza una codificación de la geometría de entrada, la pieza, para realizar una búsqueda según diversos criterios y decisiones sobre aquellas regiones de la pieza susceptibles a ser generadas por mecanizado. A partir de aquí, se realiza una búsqueda en estas regiones basada en la coincidencia de patrones sintácticos, determinando los Elementos Característicos de Mecanizado que representan. En definitiva, se trata de comprobar la pertenencia de las regiones, previamente codificadas, a la gramática definida a través de los elementos patrón.

Un trabajo interesante sobre reconocimiento sintáctico es el llevado a cabo por Jain y Kumar para piezas prismáticas, [Ref. 55]. En él, partiendo del modelo alámbrico reconocen, agujeros, cajeras, escalones y ranuras. Por la metodología empleada, la solución no se ve afectada por la intersección entre Elementos Característicos.

El método propuesto por Jain y Kumar puede considerarse como híbrido por las técnicas que combina, aunque en la identificación final del Elemento Característico de Mecanizado, concretamente en su forma, utiliza un reconocimiento sintáctico.

A modo de resumen su método conlleva los siguientes pasos:

- Conversión a un grafo del modelo alámbrico 3D de entrada.
- Creación del mínimo volumen prismático que engloba a la pieza. Se utilizan los seis planos de este volumen y una serie de reglas para desplazarlos a lo largo de los ejes coordenados, buscando los huecos o cavidades que contiene la pieza. Siempre obtienen volúmenes convexos, aplica un método similar al de 'Incrementos en Z' (Punto 2.3 en este mismo Capítulo).
- Búsqueda de la localización y la posible entrada al mecanizado, a través de reglas y heurísticos aplicados sobre los volúmenes del punto anterior.
- Codificación basada en caracteres, aplicada sobre las aristas que definen la sección del volumen obtenido. Mediante la utilización de algoritmos de comprobación de pertenencia a gramáticas, se establece una clasificación de lo codificado de acuerdo a patrones sintácticos.

Entre las principales limitaciones del método de Jain y Kumar se encuentran:

- Trabaja únicamente sobre piezas prismáticas, superficies planas.
- El formato de codificación utilizado no incluye otro tipo de datos tecnológicos diferentes a los puramente geométricos y topológicos.

- El método de obtención de los volúmenes iniciales es muy rígido, y no ofrece soluciones en las que se contemplen uniones de volúmenes cuyo resultado presente una forma externa no completamente convexa, si asociable a una operación de mecanizado.
- Utiliza un conjunto finito de patrones. En un principio puede ser aumentado, pero con especial cuidado para que las producciones que puedan salir de la gramática final cubran los casos deseados.
- Establece una secuencia de eliminación de volúmenes, ya que los volúmenes se obtienen de forma secuencial/incremental.

Prabhu y Pande, [Ref. 86], también utilizan una gramática basada en cadenas de caracteres, para identificar a cada Elemento Característico de Mecanizado encontrado en función de unos patrones previamente establecidos.

En su método, van construyendo la cadena de caracteres que identifica al posible candidato, rellenando de forma progresiva y simultánea la estructura de datos que lo representa. Para conseguirlo, se apoyan en varias vistas de la pieza, planta, alzado perfil, de donde obtienen valores del tipo, profundidad, diámetro, posición, orientación, etc. Utilizan unas reglas para ir encaminando la construcción de la cadena en función del Elemento que puede ser. Estas reglas activan la comprobación de nuevas restricciones geométricas. De cara al manejo algorítmico de los datos de entrada (en formato 'DXF' o 'IGES'), convierten el modelo a una estructura en forma de grafo, donde los nodos etiquetados con caracteres representan a las aristas y los arcos las relaciones de vecindad.

En el artículo referenciado, Prabhu y Pande muestran un ejemplo detallado sobre la construcción de la cadena en un elemento tipo 'agujero', y como se va rellenando la estructura con la información adecuada. Para completar la estructura que representa al Elemento Característico utilizan un reconocedor del lenguaje natural, encargado de procesar la información textual que aparece en el modelo sólido y obtener más datos relevantes, por ejemplo, las tolerancias.

Utilizan una gramática definida a partir de las cadenas que representan a los Elementos Característicos patrón. Posteriormente clasifican al elemento codificado, en un Elemento Característico de Mecanizado viable. Aplicando esta técnica reconocen elementos del tipo: agujero, cajera, ranura y escalón, así como sus composiciones y sus réplicas (plantillas).

Resulta interesante destacar en su artículo, los ejemplos de cadenas de caracteres que utilizan, junto al Elemento Característico patrón al que representan, así como distintos algoritmos en pseudocódigo que permiten entender y secuenciar las distintas partes del método propuesto. Dentro de cada tipo realizan una nueva clasificación en función de parámetros como, el radio de acuerdo entre paredes, la inclinación, la condición del fondo, la sección transversal, etc.

Como puede deducirse de los ejemplos comentados sobre lenguajes formales, estos métodos tienen un campo de aplicación muy acotado y están fuertemente limitados por el algoritmo informático empleado. Sigue tratándose de una transformación de un problema tecnológico a uno recortado, cuyos datos satisfagan una técnica existente, en este caso la utilización de gramáticas y reconocedores sintácticos.

1.4. Reconocimiento mediante descomposición en volúmenes

Aunque se maneja el concepto de volumen, al igual que se verá en los métodos basados en conocimientos tecnológicos, el principio de funcionamiento es puramente algorítmico, realizando comparaciones con patrones sobre el resultado previamente obtenido, sin dejar intervenir en el proceso de obtención a ningún razonamiento tecnológico que lo guíe.

Esta técnica presenta cierta similitud con el proceso real de eliminación de partes de la pieza hasta conseguir la forma final deseada. Los criterios seguidos para la confección de los patrones a utilizar obedecen a conocimientos tecnológicos, ya que evidentemente, se corresponden con operaciones de mecanizado.

En estas técnicas, aunque no se reseñe de forma explícita, suelen utilizar el formato CSG, por la evidente relación de la composición/descomposición de los modelos con los volúmenes asociables a operaciones de eliminación de material. Lo normal es seguir manteniendo una representación paralela en B-Rep, por la facilidad computacional que ésta aporta en el manejo de la geometría y topología a más bajo nivel.

1.4.1. Descomposición mediante envolventes convexas (Convex Hull)

Estos métodos parten del volumen que representa al bruto, y a través de sucesivas operaciones de adición y sustracción con otros volúmenes convexas (envoltura exterior convexas), obtienen una descomposición que da como resultado la pieza final (Figura 4-4).

El método de 'Convex Hull' aprovecha los conocimientos y algoritmos desarrollados para obtener el envolvente convexo mínimo que rodea a un sólido. Estos algoritmos se desarrollaron con anterioridad e independencia al reconocimiento de Elementos Característicos. Una de sus limitaciones es el trabajo exclusivo con piezas formadas por caras planas, ya que los algoritmos para envolventes convexas así lo requieren.

La Figura 4-4, muestra para un volumen poliédrico ' P_0 ', su descomposición mediante envolventes convexas, formada por la sustracción al mínimo volumen convexo que contiene a ' P_0 ', de un volumen (convexo o cóncavo). Este nuevo volumen (convexo o cóncavo) se somete de nuevo al mismo tipo de descomposición, y así sucesivamente mientras el resultado sea distinto del volumen nulo. Al final la pieza quedará definida como una composición de volúmenes, todos convexas.

En la figura, $P_{2,1}$ y $P_{2,2}$ son el resultado de realizar la resta: $VE_1 - P_1$. De la misma forma se obtienen los (\emptyset), a través de las resta, $VE_{2,1} - P_{2,1}$ y $VE_{2,2} - P_{2,2}$, respectivamente.

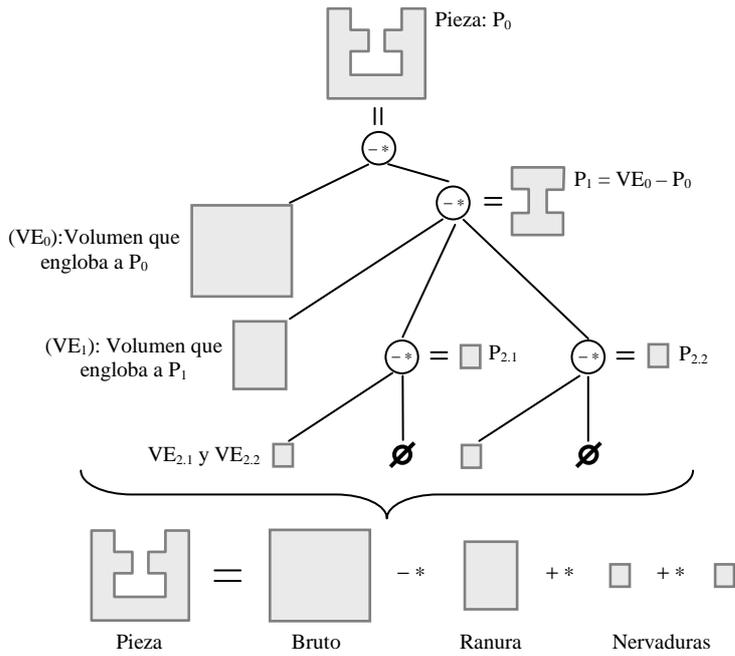


Figura 4-4. Ejemplo de descomposición en envolturas exteriores convexas.

Este método, junto a una de sus variantes conocida como descomposición por suma alternativa de volúmenes, “Alternating Sum of Volumes” (ASV), tiene entre sus principales problemas:

- La no convergencia del algoritmo, que puede entrar en bucles infinitos en función de la geometría de la pieza a descomponer. La no convergencia aparece cuando en alguno de los pasos de la descomposición se obtiene un volumen intermedio (de los que pueden ser cóncavos y/o convexos) que ya había aparecido antes, y al buscar su envoltura convexa y seguir el proceso volvería a aparecer, y así sucesivamente. En el ejemplo de la Figura 4-4 se entraría en un bucle si volviera a aparecer ‘ P_1 ’.
- La detección de volúmenes no equivalentes a operaciones de mecanizado válidas y por tanto no asociables a Elementos Característicos reales. Estos casos se dan siempre que en la descomposición de la pieza aparecen volúmenes que se añaden, como es el caso de las nervaduras en el ejemplo de la Figura 4-4.
- La restricción en su aplicación sólo a piezas poliédricas, determinada por el uso de los algoritmos desarrollados para el cálculo de envolturas convexas. Aunque se han modificado para tratar otro tipo de superficies, las cilíndricas por ejemplo, estos algoritmos siguen teniendo fuertes restricciones, sobre todo en lo que respecta a la detección de intersecciones entre Elementos Característicos.

Los Elementos Característicos no se asignan directamente a cada uno de los

volúmenes convexos tal como van apareciendo. Cuando se tiene el conjunto de volúmenes convexos final, es cuando se establecen los Elementos Característicos de Mecanizado, realizando agrupaciones de los volúmenes en busca de operaciones de mecanizado reales.

A principios de los noventa surgió el método llamado suma alternativa de volúmenes con partición, "Alternating Sum of Volumes with Partitioning" (ASVP), [Ref. 98], que trabaja según la técnica ASV hasta encontrar una situación que provoque no convergencia. En este momento, se selecciona un plano adecuado para partir la pieza, y el proceso continua con cada parte por separado.

Autores como Kim, [Ref. 97], han trabajado utilizando este método, proponiendo variantes que resuelvan el problema del reconocimiento de Elementos Característicos que no son de mecanizado, concretamente aquellos en los que hay aportación de material en lugar de quitarlo. Para ello realizan una conversión de los Elementos Característicos llamados "positivos" (aditivos), reconocidos a partir de los volúmenes resultantes de la descomposición 'ASV', en unos llamados "negativos" (sustractivos) que suponen eliminación de material, y que combinados llevan a la misma solución.

Un Elemento Característico negativo sugiere una eliminación de material del bruto para su consecución, por ejemplo una ranura. Por el contrario, uno positivo implica un aporte de material (operación imposible en mecanizado), por ejemplo, una nervadura.

Un método similar al 'Convex Hull' ha sido desarrollado por Dong y Vijayan, [Ref. 27], en el que directamente se descompone el Delta-Volumen en partes completamente convexas, llamadas GMF (General Manufacturing Features), buscando como líneas de partición en el Delta-Volumen a las aristas cóncavas. Una arista es cóncava cuando une a dos superficies que forman concavidad.

De esta forma aseguran que todos los GMF son volúmenes convexos, cuya suma compone el Delta-Volumen. Todas las concavidades presentes quedan situadas en la zona de unión entre los GMF. Este método se aplica sobre piezas construidas a partir de superficies planas y/o cilíndricas, obteniendo inicialmente los GMF de forma puramente algorítmica. Finalmente hacen uso de una serie de reglas y heurísticos para combinar los GMF en busca de Elementos Característicos de Mecanizado asociables a operaciones reales.

1.4.2. Descomposición basada en celdas (Cell decomposition)

En este método, seguido por Sakurai y Chin, [Ref. 97], el volumen de la pieza se descompone en celdas, obtenidas a partir de la extensión e intersección de todas las superficies o espacios intermedios existentes en el Delta-Volumen. Posteriormente, se combinan dichas celdas para identificar Elementos Característicos conocidos.

Para la descomposición en celdas, parten de un fichero en formato B-Rep, y siguen tres pasos:

1. Generación de fillos. Todas las caras de la pieza se interseccionan entre si. En cada intersección, y dentro de los límites de la pieza, aparece un segmento llamado fillo.
2. Generación de caras a partir de ciclos de fillos. Para cada cara inicial de la

pieza y teniendo en cuenta todos los fillos generados que en ella se apoyan, se realiza una búsqueda de todos los ciclos de fillos cerrados que representarán las distintas caras de las celdas. El algoritmo utilizado es sólo aplicable a piezas prismáticas. En éste, se empieza por un filo y se va pasando de vecino en vecino hasta regresar al punto de partida, en caso de encrucijada se opta por aquel filo vecino con el que se forme mayor ángulo (indica cambio de dirección), medido al contrario del sentido de giro de las agujas del reloj. Se descartan aquellos ciclos que formen parte de los límites exteriores de la pieza.

3. Generación de las celdas. Las celdas se generan buscando ciclos de forma igual a como se hizo en el punto 2, pero esta vez enlazando caras. Se tendrán dos tipos de celdas, aquellas que se encuentran en el exterior del modelo sólido de la pieza, y las que están en su interior. Se seleccionan las exteriores, pues representan cavidades y son en definitiva los elementos a mecanizar.

Terminados los tres pasos, se realiza una composición de volúmenes a partir de las celdas generadas, buscando la máxima agrupación que represente a una cavidad asociable mediante un 'graph matching' a un Elemento Característico de Mecanizado.

La técnica de descomposición celular, en su etapa de formación de volúmenes, permite diferentes asociaciones de celdas, dando lugar a múltiples soluciones. Gracias a esta asociatividad múltiple se tratan aspectos como las interacciones entre Elementos Característicos.

Los principales problemas que se encuentran en el uso de este método, sobre los ya comentados para las técnicas algorítmicas, son:

- El efecto, en la descomposición de la pieza en celdas, que ejerce un tamaño pequeño de una geometría local, aumentando enormemente el número de celdas resultado.

- La necesidad de heurísticos para descartar composiciones que no llegarán a solución. Así se reduce la complejidad del algoritmo, ya que suele ser exponencial.

Para mejorar este método Woo et al., [Ref. 107] y [Ref. 108], proponen una descomposición previa del Delta-Volumen con objeto de reducir el número de superficies en la geometría de entrada. Con ello se divide el problema inicial en subproblemas de menor tamaño. Los elementos obtenidos, llamados "maximal volumes", son combinados en una etapa final en busca de Elementos Característicos de Mecanizado más generales. Permite múltiples soluciones y reduce el tiempo computacional al eliminar el efecto de las geometrías locales sobre el conjunto de la pieza. Este efecto queda aislado en una de las descomposiciones iniciales.

Woo, [Ref. 109], reconoce que su método es útil para tratar intersecciones entre Elementos Característicos de Mecanizado, ya que se obtienen volúmenes mínimos que posteriormente se combinan buscando cualquier forma. Sin embargo, no es tan eficaz ante Elementos Característicos aislados, apostando por un uso combinado con otro de los métodos existentes.

1.5. Reconocimiento mediante redes neuronales

Otra de las técnicas algorítmicas aplicadas al reconocimiento de Elementos

Característicos de Mecanizado es el empleo de una red neuronal.

Una red neuronal no es más que un modelo matemático formado por un conjunto de nodos (neuronas) y enlaces, que usan como entrada y salida un conjunto de datos numéricos, [Ref. 97]. Cada nodo acepta una entrada, hace una serie de operaciones aritméticas sobre los datos de entrada, y pasa el resultado a otro nodo. Un nodo queda definido por sus entradas, operaciones aritméticas que realiza y un factor de peso.

La salida de la red es un valor nodal, resultado de muchas operaciones en nodos intermedios. Las entradas y los pesos pueden cambiar con el tiempo, dotando al sistema de capacidad de adaptación, aprendizaje. Este aprendizaje es necesario desde el principio para establecer los pesos adecuados. Se lleva a cabo a través de ejemplos que abarquen un amplio espectro de los casos sobre los que debe dar respuesta. La red trabajará con variaciones, casos similares, a los previstos en el aprendizaje.

El uso de redes neuronales posee las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Acepta "errores" ligeros. Puede hacer una conjetura razonable cuando los problemas planteados están fuera de rango de su experiencia aprendida. Por ejemplo, reconocer Elementos Característicos parciales o cortados.
- La velocidad de ejecución es mayor que en otros métodos, ya que se trata de operaciones matemáticas.

Inconvenientes:

- Se necesita un entrenamiento de la red, con un número de patrones aceptable para que posteriormente se reconozcan a los Elementos Característicos que estos representan.
- Detecta Elementos Característicos falsos que deben ser cribados aplicando otras estrategias o métodos.
- Necesita un cambio de formato del modelo geométrico, pasarlo a matrices, vectores, fórmulas de puntuación, ..., para poder introducirlo en la red.
- La salida de la red, datos numéricos, deben interpretarse, formatearse, compilarse, ..., para ser útil en otra aplicación.

En la actualidad autores como Öztürk y Öztürk, [Ref. 82], utilizan redes neuronales realizando un filtrado de los parámetros de entrada a la red a través de algoritmos genéticos. De esta forma consiguen reducciones significativas en los tiempos computacionales.

Un algoritmo genético genera una serie de posibles soluciones al azar, va creando sucesivas generaciones de soluciones hijo, mezcla de las anteriores, asignando un mayor peso a las mejores soluciones. Su objetivo es buscar dentro del espacio de hipótesis candidatas, a los mejores parámetros o variables, por ejemplo. En un algoritmo genético la mejor hipótesis es aquella que optimiza una función predefinida para el problema tratado.

Öztürk y Öztürk toman como entrada a la red el Elemento Característico expresado en forma de vector, con términos que representan a los vértices, las aristas y las caras, asignándole una serie de pesos, en los que toma especial importancia las relaciones de concavidad/convexidad entre caras. Éste será clasificado en función del resultado de la red (nivel de confianza, representado como un valor numérico) según las clases: ranura (slot), escalón (step), cajera (pocket), saliente (protusion), ranura ciega (blind slot), cajera rectangular (corner pocket), agujero pasante (through-hole), y agujero ciego (blind-hole). Los datos utilizados para el entrenamiento de la red lo constituyen Elementos Característicos de Mecanizado con formas diferentes a las estándar de la clase.

Su trabajo no incluye el proceso matemático para convertir la geometría de entrada y asignar pesos. Tampoco aparece el criterio seguido para determinar los Elementos Característicos de Mecanizado de entrada a la red a ser identificados, y que en el artículo son llamados 'unidades de material a eliminar'.

En el trabajo de Ding y Yue, [Ref. 26], se incluyen relaciones entre los Elementos Característicos para reducir la complejidad computacional. Los datos de entrada proceden del grafo por adyacencia de atributos que representa al modelo sólido, pero en lugar de utilizar la matriz de adyacencia, utilizan dos matrices, 'F-adjacency matrix' encargada de reconocer cinco primitivas ('round hole', 'conical hole', 'general hole', 'slot/step' y 'pocket'), y la 'V-adjacency matrix' usada para identificar relaciones entre superficies.

Para encontrar la interacción entre Elementos Característicos se apoyan en una serie de heurísticos. Realiza un pre-procesado para construir las matrices mediante una serie de reglas que ayudan a simplificar los datos de entrada. Vuelven a emplear heurísticos en la conversión de las matrices a vectores.

La red neuronal de Ding y Yue es un sistema jerárquico de tres niveles, de más general a más particular, disponiendo cada uno de ellos de una topología y un método de aprendizaje. En el proceso de entrenamiento de la red también conjugan más de un método.

La red utiliza como datos de entrada al conjunto de Elementos Característicos de Diseño procedentes del modelo 3D de la pieza, previamente tratados y convertidos. En su clasificación de los Elementos Característicos de Mecanizado toman como referencia la propuesta AP-224 de la ISO.

2. Técnicas basadas en conocimientos tecnológicos

Este apartado se destina a todos aquellos métodos que no utilizan de una manera exclusiva y rígida un algoritmo o técnica informática existente. Aunque también utilizan el ordenador como herramienta de automatización, prevalecen los aspectos relacionados con un razonamiento tecnológico sobre el problema.

En todos estos métodos se realiza un importante estudio inicial, en el que se llegan a ciertas afirmaciones y heurísticos que posteriormente son aplicados en el proceso de reconocimiento. El postulado que se mantiene constante en estos estudios

es: *la existencia de un volumen de material a eliminar con una configuración de máquina y herramienta que marcan y definen la operación a llevar a cabo.*

Aunque es muy difícil establecer una clasificación entre los distintos métodos incluidos en esta técnica, ya que en todos se encuentran elementos comunes, se han establecido tres grupos, como a continuación se expone.

2.1. Razonamiento basado en pistas o reglas (Hint /rule based reasoning)

Método considerado por algunos autores como un sistema de reconocimiento híbrido, ya que suele utilizarse muchas veces junto a otros para solucionar deficiencias o defectos.

Entre los primeros impulsores del razonamiento basado en pistas se encuentran Vandenbrande y Requicha, [Ref. 103], que se dieron cuenta que los métodos algorítmicos eran demasiado rígidos, ya que en su búsqueda de coincidencia con patrones, una pequeña diferencia impedía el reconocimiento. Por ejemplo, una pérdida de información geométrica y topológica causada por algo tan común como la interacción entre Elementos Característicos. Además, la solución a este problema no puede ser el incremento del número de patrones para cubrir cualquier caso posible, ya que la combinatoria es demasiado elevada.

La solución pasa por analizar tecnológicamente el problema para encontrar aquellas características que lo definen de forma inequívoca. Desde un punto de vista operativo, se tiene una región o zona de la pieza que debe ser generada eliminando material con una operación de mecanizado.

Para conseguir este objetivo, se busca en los datos de entrada (modelo 3D en B-Rep) alguna pista, superficie, eje, relación de vecindad, disposición entre superficies, etc., que lleve a pensar que se está ante un Elemento Característico de Mecanizado. Esta metodología obliga a tener a todos los Elementos Característicos de Mecanizado perfectamente relacionados con un conjunto de pistas o trazas.

Por ejemplo, encontrar una superficie cilíndrica cerrada, indica la posible presencia de un agujero. Posteriormente, en función de otras restricciones del tipo, 'si existe fondo o no', 'si el diámetro es menor a un límite', etc., se podrá afirmar que se trata de un agujero de tipo ciego, pasante, etc., o que es otro Elemento Característico, como por ejemplo, una cajera circular.

La detección de interacciones está garantizada, puesto que se trabaja con las trazas (pistas) que deja un Elemento Característico y no con toda su definición. El principal problema se tiene al definir las reglas o trazas que lleven a detectar todos los posibles casos y a discernir entre ellos.

Por esta razón, un algoritmo basado en pistas, ante una pieza simple como la de la Figura 4-5, detecta la presencia de un Elemento Característico de Mecanizado ranura y de dos Elementos Característicos de Mecanizado tipo escalón. Tomando como pista la 'Superficie 1' se detecta una ranura, si la pista es 'Superficie 2' se detecta un escalón a la izquierda, y si la pista es 'Superficie 3' el escalón queda a la derecha. Está situación se aprovecha para obtener varias soluciones sobre una

misma zona.

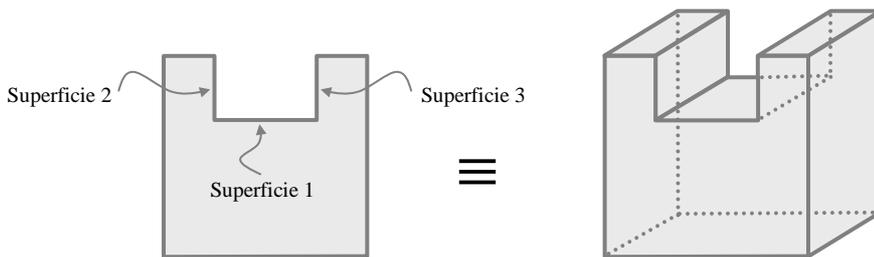


Figura 4-5. Pieza ejemplo para un reconocimiento basado en pistas.

Una vez detectado un Elemento Característico de Mecanizado, hace falta un proceso de corte (mecanizado) que lo valide como tal. Esta validación, según Vandenberg y Requicha implica el cumplimiento de las siguientes cuatro normas:

- 1.- No intrusión. El Elemento Característico no debe en ninguna de sus partes invadir a la pieza final.
- 2.- Presencia. Ninguna parte del volumen correspondiente al Elemento Característico detectado debe quedar en la pieza después de su eliminación.
- 3.- Accesibilidad. Debe existir una herramienta que elimine el volumen correspondiente al elemento reconocido.
- 4.- Reglas dimensionales. Se trata de límites físicos, impuestos por el proceso y tecnología implicada. Por ejemplo, el diámetro mínimo para realizar un agujero por mecanizado convencional.

Estas cuatro normas teóricas ponen en evidencia la necesidad de manejar conocimientos tecnológicos para que los Elementos Característicos de Mecanizado detectados sean reales.

Otro aspecto importante en estas técnicas, es la necesidad de una base de conocimiento y de un sistema de búsqueda eficaz, que ayude a almacenar y utilizar todas las reglas y pistas que hacen falta. Lo normal es recurrir a Sistemas Expertos y Bases de Conocimiento.

Cuando la cantidad de reglas es importante, o incluso para establecer las propias reglas, suele recurrirse al uso de heurísticos, reduciéndose de esta forma el tiempo computacional. Puede encontrarse una explicación más detallada, así como ejemplos sobre este método y sobre la utilización de heurísticos, en el artículo de Han y Requicha: "Integration of feature based design and feature recognition", [Ref. 42].

En artículos posteriores, Han et al., [Ref. 45] y [Ref. 46], perfeccionaron y mejoraron su método de reconocimiento, presentando el IF² (Integrated Feature Finder), una aplicación basada en el razonamiento por pistas. En esta aplicación se establece un enlace entre STEP AP203 y AP224, como formato de los ficheros de entrada, y Parasolid, que es el núcleo gráfico utilizado. Además, introducen conceptos relacionados con la configuración de la máquina y las herramientas a emplear, buscando entre las distintas soluciones obtenidas aquellas que son mejores, según

unas orientaciones elegidas para la herramienta y unos criterios de costes.

Entre estos costes se incluyen los relacionados con el volumen de material a eliminar y las distintas orientaciones de la herramienta, que por ejemplo, se trasladarán en diferentes amarres. Se busca mejorar, la integración con el resto de la Planificación de Procesos y la velocidad de respuesta.

Hay que señalar que las orientaciones de la herramienta se elijen de forma fija, esto es, en función de la superficie "base" para el Elemento Característico al que apunten las pistas. Las direcciones y sentidos de las herramientas vienen fijadas por el vector normal a la superficie y su opuesto. Por otra parte, las formas de herramienta disponibles para satisfacer la zona a mecanizar son las almacenadas en una base de datos de herramientas.

Otro aspecto importante que incorpora, es la posibilidad de introducir interactivamente las tolerancias en las superficies para su utilización durante la Planificación de Procesos.

Por todo lo comentado, puede verse un creciente interés por el concepto de "fabricabilidad" de lo que se está reconociendo, de ahí la inclusión de aspectos relacionados con la herramienta, el acceso o las tolerancias, entre otros. Esta situación no se aprecia de forma tan evidente en las técnicas puramente algorítmicas.

Utilizando un razonamiento basado en pistas, otro grupo de investigadores entre los que se encuentran Regli, Nau, Kramer, Gupta y Zhang, [Ref. 39], [Ref. 40], [Ref. 87] y [Ref. 89], han realizado importantes avances. Conscientes de la importancia de las interacciones entre Elementos Característicos de Mecanizado, y de las limitaciones y complejidad computacional de las técnicas algorítmicas, apostaron por un reconocimiento basado en pistas, aunque con ciertas diferencias respecto al propuesto por Vandenbrande y Requicha. Entre sus características principales cabe destacar:

- El estudio detallado del dominio de trabajo, en este caso el mecanizado en fresadoras de tres ejes. Esto les llevó a utilizar unas estructuras de datos adecuadas para almacenar la información que posteriormente iba a ser utilizada en la Planificación.
- Disponer de una clasificación y un modelo de información estructurado en el que se recogen los Elementos Característicos a reconocer. Para ello hacen uso de la librería de "volúmenes constituidos por elementos de forma y que representan el material a eliminar en una pieza" llamados MRSEV (Material Removal Shape Element Volumes) de Kramer, [Ref. 59].
- Utilizar como datos de partida para activar el procedimiento de búsqueda, al conjunto de superficies del Delta-Volumen presentes también en la pieza final.
- Incluir restricciones para una comprobación elemental de la accesibilidad.
- Centrarse en el reconocimiento de agujeros, cajeras, chaflanes, redondeos y sus variantes. Afirmando que puede ser ampliado siguiendo los mismos principios.
- Utilizar un conjunto de procedimientos informáticos especializados en

detectar cada uno de los Elementos Característicos por separado, a través del uso de pistas o trazas específicas y condiciones a cumplir. Consiguen una reducción importante de la complejidad computacional, dejándola en el peor de los casos, con un valor polinómico de cuarto orden, a diferencia del exponencial que se maneja en otros métodos. En uno de sus artículos, [Ref. 88], plantean la posibilidad de utilizar el método en entornos de computación distribuida, para mejorar el tiempo de respuesta.

- Es aplicable a sólidos con superficies planas, cilíndricas, cónicas, tóricas y esféricas. A diferencia de otras técnicas que solo trabajan con poliedros.

Las soluciones obtenidas son múltiples, razón por la cual desarrollaron algoritmos para eliminar los MRSEVs (Material Removal Shape Element Volumes) del mismo tipo y que abarcan la misma región del Delta-Volumen, y que fueron obtenidos a partir de pistas distintas, MRSEV redundantes. Por la forma de proceder del método, una misma superficie puede pertenecer a más de un MRSEV, completándose su mecanizado al eliminar los MRSEV implicados.

Entre las descomposiciones ofrecidas, seleccionan aquella cuyo subconjunto de MRSEVs contiene menos zonas repetidas. Comentan la posibilidad de utilizar algún criterio externo para realizar la selección, por ejemplo, tener en cuenta el acceso que permite el amarre, minimizar los cambios de herramienta, etc.

Un aspecto destacable en los artículos del método empleado por Regli et al., es la incorporación de algoritmos en pseudocódigo, así como la explicación y cálculo de la complejidad computacional de los mismos.

Un enfoque diferente, utilizando el método basado en pistas, es el mostrado por Lin et al., [Ref. 68], en su artículo: "Extraction of manufacturing features from a feature-based design model". Después de estudiar la pieza modelada, el tipo de información que se maneja y almacena, y los Elementos Característicos de Mecanizado que se encuentran, llegan a la conclusión de que se pierde una importante cantidad de datos geométricos y topológicos, sin los cuales el proceso de obtención del Elemento Característico se complica enormemente. Estas pérdidas se producen ante situaciones como superficies que se parten, trozos de aristas que son eliminados, variación en el número de ciclos en una superficie, etc.

Como solución proponen un modelado a partir de Elementos Característicos de Diseño, guardando toda la información de éstos y del proceso de creación, y respetando la secuencia seguida y la relación "padre-hijo" entre ellos. A partir de esta información construyen una estructura jerárquica de cinco niveles sobre la cual llevar a cabo el proceso de reconocimiento. El reconocimiento consiste en un conjunto de reglas topológicas que definen al Elemento Característico a encontrar (número de superficies, tipos, posiciones relativas, relaciones topológicas entre superficies, etc.). Estas reglas topológicas están disponibles para unos Elementos Característicos concretos, de los que también se incluye su representación gráfica. En una última etapa buscan asociaciones entre los Elementos Característicos de Mecanizado obtenidos, así como otro tipo de datos necesarios en la Planificación de Procesos, tales como, dimensiones, altura, etc.

Junto a los problemas propios del método utilizado, la técnica de Lin et al. incluye

uno adicional y destacable: la no independencia entre el diseño y la fabricación, ya que obliga a un proceso de diseño muy rígido, tanto en el conjunto de elementos geométricos disponibles, como en la importancia de la secuencia seguida en su creación.

Jha y Gurumoorthy, [Ref. 56], aplican un reconocimiento basado en pistas con múltiples interpretaciones en función del ámbito de aplicación, soldadura, mecanizado, análisis del diseño, etc. En función de la aplicación buscan Elementos Característicos positivos o salientes, negativos o depresiones, y mixtos. Por ejemplo, en una aplicación de soldadura resultan de interés los elementos positivos, pues suponen la adición de material, mientras que en una de mecanizado son los negativos los importantes, pues indican una eliminación de material.

Limitan su ámbito de trabajo a piezas o sólidos creados por el barrido de una sección a lo largo de una trayectoria, modificados convenientemente hasta obtener la forma final mediante la intersección con otros sólidos, creados también por barrido.

Las reglas utilizadas en el proceso de reconocimiento se apoyan principalmente en una clasificación de las superficies del modelo de partida, separando las que son límites del Elemento Característico y las que forman parte del cuerpo. En ambos casos se distingue, si son exclusivamente del Elemento Característico, o de la pieza modificada al interseccionar con el Elemento Característico. A partir de esta clasificación, y de una serie de relaciones topológicas y geométricas en forma de reglas, se obtiene el resultado. Para buscar Elementos Característicos positivos o negativos, debe modificarse la clasificación inicial de las superficies y los algoritmos de captura.

El resto de superficies que integran al Elemento Característico encontrado se obtienen a partir de las superficies adyacentes a la que desencadenó el resultado, aplicando procedimientos apoyados en la definición de los propios Elementos Característicos.

Miao et al., [Ref. 77], realizan un estudio de la integración entre el CAD y el CAM a través de Elementos Característicos de Mecanizado, proponiendo la incorporación de su aplicación de reconocimiento en un software CAD/CAM comercial. Su técnica de reconocimiento es muy similar a la de Regli et al., con ciertas mejoras, sobre todo por la información que se recoge a través de métodos basados en el conocimiento para una posterior utilización en el resto de etapas de la Planificación, como es el caso de la configuración, la secuenciación de operaciones, la selección de herramientas, etc.

Un aspecto destacable en la técnica de Miao et al., es el hecho de partir los volúmenes de material a mecanizar (MRV: Machining Removal Volume) cuando no existe ninguna operación de mecanizado que se adapte a él. Situación motivada por la existencia de Elementos Característicos que interaccionan, y por tanto, de superficies que deberán partirse. Este aspecto da a entender que la falta de coincidencia plena con un patrón o unas reglas no significa que no se puede mecanizar, sino que probablemente, no se puede asociar a un único Elemento Característico de Mecanizado.

En su propuesta Miao et al. se limitan a partir volúmenes ante la presencia, en una de sus superficies, de un ciclo de aristas interno que da paso a superficies cóncavas. Situación que hace expresa referencia a la existencia de agujeros.

Entre los Elementos Característicos de Mecanizado que reconocen se encuentran, los perfilados exteriores, los agujeros ciegos y pasantes, y las cavidades internas ciegas y pasantes. Permiten la inclusión de superficies formadas por “splines”, aunque no mencionan a qué tipo de Elemento Característico de Mecanizado se asocia un MRV que contenga “splines”, y a qué operación de mecanizado corresponde.

Investigadores como Ibrahim y McCormack, [Ref. 49], que inicialmente trabajaron en un reconocimiento basado en grafos, destacan la existencia de un componente importante en todo Elemento Característico de Mecanizado: la superficie sobre la que se realiza la trayectoria. De hecho, un conjunto de superficies que forman un Elemento Característico, con tan solo variar el tipo de superficie sobre la que se realiza la trayectoria, o la forma en como ésta discurre, puede dar lugar a diferentes Elementos Característicos de Mecanizado. Además, indican la necesidad de tener en cuenta la forma de la herramienta durante la validación del elemento, sin limitarlas a unas almacenadas o establecidas previamente. De esta manera, pueden obtenerse Elementos Característicos mayores, que hubieran sido descompuestos para adaptarse a herramientas cilíndricas simples.

Teniendo en cuenta lo anterior, Ibrahim y McCormack proponen una clasificación basada en la profundidad del Elemento, distinguiendo entre: ‘single depth depression’ (huecos de profundidad única), ‘protusion’ (salientes), ‘multiple-depth depression’ (huecos con distintas profundidades), ‘passages’ (pasantes), ‘basic interactions’ (interacciones básicas), y ‘partially closed features’ (elementos parcialmente cerrados). Como puede deducirse, esta clasificación está enfocada hacia un razonamiento tecnológico y geométrico, útil para un reconocimiento basado en pistas.

Aunque en el artículo referenciado, Ibrahim y McCormack no comentan su método de reconocimiento en concreto, las definiciones de los Elementos Característicos de Mecanizado propuestos aportan un punto de vista tecnológico interesante: el concepto de superficie sobre la que se realizará la trayectoria. Junto a esto, se indica la necesidad de no limitar las herramientas aplicables, y de no establecer una relación directa entre los Elementos de la clasificación y las operaciones de mecanizado conocidas, ya que hay factores que pueden variar la posible relación, por ejemplo, realizar un aparente escalón con una trayectoria de herramienta no rectilínea (zig-zag o concéntrica) sería más propio de una cajera.

En general, entre los inconvenientes que se encuentran en los métodos basados en pistas, destacan:

- La necesidad de unas reglas o pistas que cubran todos los casos que se quieren reconocer. Éstas pueden ampliarse, pero el proceso de generación de reglas no es sencillo, ya que las nuevas no deben modificar el resultado que se alcanzaba con las existentes. Dicho de otra forma, se debe tener un control completo del conjunto de reglas y de la relación entre ellas. Puede encontrarse una propuesta para la creación automática de reglas en el artículo de Dimov et al., [Ref. 25].
- Al aumentar el número de reglas, aumenta el tiempo computacional necesario. Esta situación se compensa con la utilización de heurísticos. Un heurístico puede producir resultados no deseados, esto se tiene que controlar y corregir, por ejemplo, variando reglas o el propio heurístico, situación que vuelve a incidir sobre el inconveniente anterior.

- Las reglas o pistas responden ante ciertas presencias o trazas, en el modelo 3D de la pieza, indicando que se ha encontrado un Elemento Característico de Mecanizado. Aún así, falta concretar, correcta y completamente, las superficies que lo delimitan.
- En estas técnicas cuando se habla de accesibilidad se está refiriendo, casi exclusivamente, a la disposición del eje de la herramienta para el mecanizado. Dejándolo en la mayor parte de los casos, coincidente con la normal a la superficie “base” (key face) en sus dos sentidos, o coincidente con su eje si la superficie es de revolución. Existe todo un rango de orientaciones posibles que no es explotado.
- La posibilidad de encontrar falsos Elementos Característicos ante geometrías complejas.
- La fuerte dependencia entre la solución obtenida y el orden de consulta de las reglas.

2.2. Razonamiento basado en las concavidades (Concavity method)

Aunque este método puede fácilmente relacionarse con alguno de los vistos, o simplemente incluirse en el grupo de las técnicas híbridas, existen pequeñas diferencias que exigen un tratamiento separado, éstas son:

- Trabajan directamente sobre los datos de entrada, sin cambiarlos de formato para adaptarlos a uno favorable a la utilización de una técnica algorítmica, por ejemplo a un grafo.
- Comienzan con unas superficies, llamadas “semilla”, a partir de las cuales se extraen el resto de superficies con las que conformará un volumen de mecanizado. Este volumen de mecanizado representa una ‘concavidad’ o ‘hueco’ en la pieza final, indicando que existe una cantidad de material en el bruto de partida que ha de eliminarse.
- Utilizan conocimientos tecnológicos para validar y rechazar al volumen obtenido.

Gaines, Hayes y Castaño, [Ref. 31], desarrollaron una aplicación informática donde se hace uso del método de las concavidades. En su aplicación, llamada MEDIATOR (Maintainable, Extensible Design and Manufacturing Integration Architecture), presentan un extractor automático de Elementos Característicos de Mecanizado para las primeras etapas de la Planificación de Procesos en fresado de tres ejes. En el proceso de extracción se tienen en cuenta las herramientas, los accesos y los útiles a emplear durante el mecanizado. El sistema se adapta a los cambios que sobre ellos introduzca el usuario.

El sistema propuesto por Gaines et al. facilita el cambio y adecuación del conocimiento incluido en los algoritmos, como por ejemplo, añadir información para que pueda trabajar con una nueva forma de herramienta o tipo de superficie. En la versión presentada en su artículo sólo trabajan con superficies planas, cilíndricas y esféricas.

Durante el proceso de extracción toman como superficies 'semillas' a todas aquellas presentes en el Delta-Volumen que también lo estén en la pieza final. Para cada 'semilla', y teniendo en cuenta un tipo de herramienta determinado, obtenido de su base de datos de herramientas, y una o varias trayectorias de corte adecuadas a la herramienta, obtienen el conjunto de superficies compatibles. Este conjunto de superficies compatibles debe entenderse como, aquellas superficies que se obtendrán al realizar un barrido de la sección de la herramienta a lo largo de la trayectoria seleccionada. Si en algún momento se introduce alguna superficie que desvirtúa el resultado respecto al teórico, se descarta el volumen y se varían los elementos: trayectoria, herramienta, utillaje.

Resulta de vital importancia la orientación del eje de la herramienta. Esta orientación se decide a priori en función de la superficie 'semilla' y del tipo de herramienta: punta plana, punta esférica, etc. En la orientación de la herramienta también se usan heurísticos en los que intervienen el resto de superficies del volumen, descartando soluciones no factibles. Un ejemplo de heurístico es: *si una superficie plana es adyacente a una cilíndrica, el eje de este cilindro determina las direcciones de la herramienta.*

En un análisis posterior, una vez conocida la herramienta y su orientación, se analizan los utillajes de amarre y sujeción. Este análisis consiste en comprobar que puede sujetarse la pieza dejando libres y orientadas a las superficies requeridas, para ello se consulta una base de datos definida por el usuario sobre útiles.

Posteriormente Gaines y Hayes, [Ref. 33], presentaron un reconocedor, evolución de 'Mediator', capaz de trabajar no sólo con herramientas estándar, sino también con "herramientas de forma", definidas y almacenadas por el usuario, lo llamaron "Custom-Cut".

La obtención de los Elementos Característicos de Mecanizado variará en función de las herramientas consideradas. En el proceso de obtención se tiene en cuenta la forma de la herramienta y los grados de libertad que ofrece la máquina, situación que reafirma la necesidad de introducir aspectos tecnológicos para alcanzar un método de reconocimiento razonable.

En su artículo explican con detalle como se lleva a cabo la validación del perfil de la herramienta seleccionado, comparándolo con la forma de "atacar" el volumen de mecanizado. Para ello se apoyan en unos planos (slices) obtenidos de una forma preestablecida a partir de las superficies adyacentes a la 'semilla'. De hecho, se realiza una comprobación por coincidencia de perfiles, entre el reflejado por el volumen de mecanizado en el 'slice' considerado, y el que posee la herramienta. La orientación de la herramienta varía en función de la gama de posibilidades que ofrece la superficie 'semilla'. Por ejemplo, si la superficie 'semilla' es plana cualquier arista recta que forme parte del perfil de la herramienta podrá apoyarse en ella, obteniéndose distintas orientaciones.

Para comprobar la coincidencia de perfiles emplean una serie de restricciones que deben cumplirse, como aristas con longitudes fijas en ambos perfiles.

Gaines, en el artículo, "A tool-centric approach to designing composable feature recognizers", [Ref. 32], ofrece un repaso al método propuesto inicialmente, enfatizando el uso del perfil de la herramienta como elemento central en el proceso de reconocimiento, ya que en última instancia, es la herramienta quien determina la

forma final que se obtendrá. Los perfiles de herramienta que utiliza se encuentran almacenados en una base de datos.

Gaines et al. hacen hincapié en la modularidad del método, y lo demuestran explicando una adaptación del sistema para el reconocimiento de Elementos Característicos exclusivamente para torno.

Un aspecto muy importante, y que no queda reflejado en los artículos de Gaines et al., es el procedimiento seguido para obtener el volumen de mecanizado, concretamente cuáles son las superficies que lo constituyen. En la presentación de la aplicación 'Mediator' se obtenía por comparación con un patrón. Éste patrón estaba formado por un conjunto de superficies ideales, resultado de realizar el barrido del perfil de la herramienta según una trayectoria.

En el proceso de extracción mejorado, llamado Custom-Cut, se utilizan unos planos llamados 'slices' sobre los que situar el perfil de la herramienta seleccionado, comprobando que por barrido da como resultado la zona representada por la superficie 'semilla' y sus adyacentes.

Estos 'slices' se toman en función de las superficies adyacentes consideradas, expresando direcciones preferentes. Ante esta forma de proceder surgen ciertas dudas del tipo:

- ¿Cuál es el criterio para saber que superficies adyacentes incluir?
- ¿Se permite un solape entre partes del perfil hasta alcanzar la profundidad?
- ¿Qué se hace ante salientes o islas de material en la zona considerada?
- ...

En un artículo posterior Zhou y Gaines, [Ref. 118], plantean la posibilidad de utilizar el método comentado para proponer cambios en la pieza, rediseño de aquellas superficies que no se adapten a los perfiles de las herramientas, o a los grados de libertad de la máquina, evitando geometrías no mecanizables en la pieza según su reconocedor.

Otros autores, como Bhandarkar y Nagi, [Ref. 12], han desarrollado un método para el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado en fresado, para piezas formadas por superficies planas y cilíndricas. En su propuesta parten de un fichero STEP, dejando los resultados finales acordes al mismo estándar (AP224).

Recorren directamente los ciclos de aristas de la geometría en B-Rep, para clasificarlas como cóncavas o convexas según la relación entre las superficies que unen. Distinguen los siguientes tipos de Elementos Característicos de Forma:

- Inválidos, aquellos completamente cerrados por material.
- Internos, a los que se accede desde un ciclo interior de aristas en una superficie.
- Externos, en los que intervienen ciclos exteriores de las superficies, distinguiendo a su vez entre los que afectan a una arista (redondeos, chaflanes,...) y los que implican a más de una superficie.

La extracción de los Elementos Característicos de Forma se hace manejando

listas con los ciclos de aristas. A partir de estos ciclos se recoge la superficie “semilla”, la tratada en ese momento, y el resto de superficies adyacentes cóncavas. Con esta información y una serie de restricciones simples, buscan la equivalencia con los Elementos Característicos de Mecanizado de la ISO 10303, AP224. Se contempla la utilización del Elemento Característico de Mecanizado de carácter general de esta norma (llamado “removal volume”), cuando no se encuentra una equivalencia clara con lo definido en la norma.

Aunque la relación de concavidad entre superficies indica existencia de hueco, y por tanto región a mecanizar, no analizar de forma más concienzuda la relación entre las superficies de la región, da lugar a que aparezcan muchos ‘removal volume’ que no son mecanizables. También se encuentran serios problemas cuando aparecen relaciones entre ciclos de aristas externos en unas superficies e internos en otras, puesto que no están contemplados.

Para decidir ante que tipo de Elemento Característico de Mecanizado se está, se usan restricciones basadas en heurísticos. Estas restricciones son únicamente de carácter geométrico y topológico, sin considerar otros aspectos, como por ejemplo, el tipo de trayectoria, la forma y orientación de la herramienta, etc.

Sandiford e Hinduja presentan un interesante trabajo, [Ref. 95], donde enfatizan dos aspectos fundamentales, la necesidad de tener un volumen de mecanizado asociado a cada grupo de superficies que represente una zona o región a mecanizar, y la existencia de ciertas relaciones entre ellas que imposibilitan su mecanizado conjunto.

Según explican, el volumen asociado al Elemento Característico de Mecanizado es necesario para buscar en la base de datos el tipo de herramienta y la trayectoria de corte necesaria para su eliminación. Hablan de cuatro estadios en el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado:

- Detección del Elemento Característico de Mecanizado.
- Construcción del volumen de mecanizado asociado a él.
- Verificación de su validez.
- Actualización del material de trabajo.

En el método propuesto trabajan directamente sobre B-Rep, haciendo uso de la relación de concavidad y convexidad entre caras, para lo cual trabajan y clasifican las superficies, las aristas y los vértices del modelo 3D de la pieza.

Llaman superficies cóncavas a todas aquellas que son de revolución (cónicas, tóricas, etc.), mientras que las planas pasan a clasificarlas como neutras. Por otra parte, clasifican las aristas como, cóncavas, convexas, cóncavas suaves, convexas suaves y neutras suaves, introduciendo el concepto “suave” cuando existe tangencia entre superficies. Respecto a los vértices, son clasificados como cóncavos o convexos en función de la relación existente entre las superficies ligadas a las tres aristas que en ellos convergen.

En su técnica, buscan regiones de superficies cóncavas entre si, pasando a construir el volumen que las engloba mediante una extensión, estirado, de las aristas límite de las superficies pertenecientes a la región tratada (Figura 4–6).

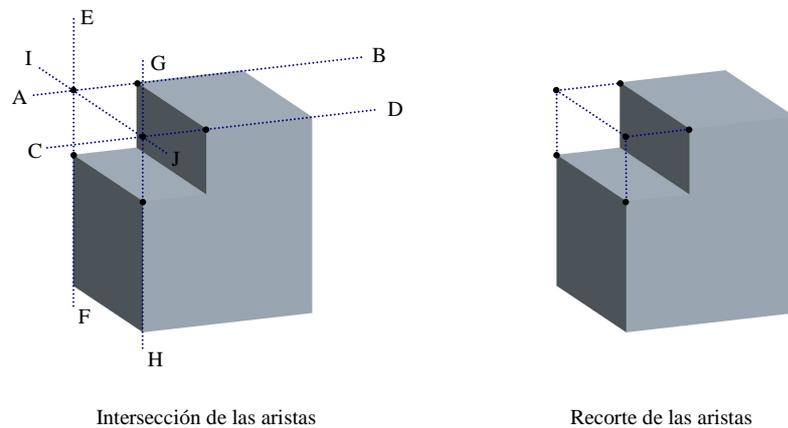


Figura 4-6. Ejemplo de construcción del volumen según Sandiford e Hinduja.

En algunas de las regiones obtenidas advierten ciertas anomalías que achacan a la existencia de interacciones entre Elementos Característicos de Mecanizado, y que impiden la utilización de una única operación para su eliminación. Estas anomalías se detectan comprobando la existencia de ciclos de aristas internos a una superficie, analizando vértices para ver si existe una arista, entre las que en él confluyen, ligada a una superficie que no pertenece a la región tratada.

Si detectan problemas de interacción, descartan la región y construyen otras partiendo de la superficie en la que se detectó el problema. Con esta forma de actuar se hace patente que no es viable obtener las regiones a mecanizar simplemente con la relación de concavidad entre superficies, ya que en ocasiones se introducen superficies que impiden un mecanizado a través de una única operación.

Entre los inconvenientes atribuibles a este método cabe citar que:

- Las superficies de revolución son clasificadas directamente como cóncavas.
- Los grupos de aristas llamados “suaves”, engloban situaciones de tangencia entre superficies, donde se hace referencia a terceras superficies. Al contemplar relaciones con más de dos superficies de cualquier tipo, las posibles combinaciones no quedan completamente cubiertas con la clasificación propuesta.
- En la construcción de volúmenes sólo se contemplan superficies planas.
- Se sigue utilizando una base de datos de herramientas y trayectorias de corte para averiguar como eliminar el volumen.

Chen et al., [Ref. 16], trabajan con volúmenes de mecanizado, definiéndolos como el resultado del movimiento de una herramienta según una trayectoria. La metodología que proponen se apoya en dos principios:

- 1.- Utilizar un conjunto reducido y simple de volúmenes patrón, deducidos a partir

de la combinación del comportamiento de herramientas tipo, cilíndrica y cónica, con los grados de libertad del proceso elegido. Éstos permiten movimientos “axiales” de la herramienta, o de penetración, y “radiales”, en un plano fijo.

2.- Buscar directamente en B-Rep aquellas superficies, relacionadas por concavidad, que casan con parte de las que aparecen en los volúmenes patrón.

Para recoger el conjunto de superficies de la pieza que constituyen el Elemento Característico de Mecanizado, buscan coincidencia entre las superficies cóncavas obtenidas en la pieza y las que forman parte del volumen patrón. Si no se encuentra equivalencia con una superficie, o parte de una superficie, el volumen encontrado se clasifica como no mecanizable.

En su método, realizan la comprobación de la accesibilidad a la zona de trabajo a través de la detección de interferencia entre, la herramienta, el mango y la pieza.

Aunque a esta propuesta se le pueden atribuir los problemas propios de un reconocimiento basado en patrones, unido al hecho de fijar las geometrías de las herramientas de partida (dos en este caso), cabe indicar que se basa en unos principios interesantes, entre los que destacan:

- La consideración del volumen de mecanizado como parte principal en la definición de un Elemento Característico de Mecanizado.
- La importancia al remarcar que todas las superficies agrupadas se generan en una única operación de mecanizado.
- La inclusión de una etapa final de comprobación de la accesibilidad, que puede servir para rechazar al Elemento Característico encontrado o para forzar un rediseño de la pieza.

Por su parte, trabajando en B-Rep y dentro del método basado en las concavidades, Li y Liu, [Ref. 62], utilizan procedimientos geométricos existentes que permiten el redondeo de aristas entre superficies convexas, para modificarlos y aplicarlos al redondeo de aristas entre superficies cóncavas.

Previamente realizan una clasificación de las aristas en, Cóncavas, Convexas y Suaves (smooth edge), y de los vértices en, Cóncavos, Convexos, Suaves e Híbridos convexos (vértices con presencia de aristas cóncavas y convexas). Tomando como referencia a los vértices que incluye una superficie, se las clasifica en, Cóncavas, Convexas, Suaves e Híbridas convexas.

Posteriormente, van aplicando la técnica de redondeo de forma sucesiva a cada una de las concavidades que detectan en el modelo 3D de la pieza, obteniendo unos Elementos Característicos de Forma, que son precisamente los que se eliminan para producir el redondeo. Aquellos obtenidos en una misma región, son recogidos y unidos en busca de su similitud con unos patrones que representan a los Elementos Característicos de Mecanizado.

Aplican ciertas reglas para guiar la solución final, cada vez que se encuentran soluciones múltiples para una misma región. Es crucial en la solución final el valor del radio de redondeo empleado, aunque pueden realizarse varias iteraciones para contrastar resultados.

Teniendo como ventaja la utilización de una técnica geométrica conocida y ya

desarrollada, “el redondeo de aristas”, posee elementos en contra de gran calado, como son, la restricción a piezas con formas poliédricas, la utilización de patrones para identificar los volúmenes extraídos, la rigidez del método para incorporar en el proceso de reconocimiento otros criterios destinados a tratar geometrías más complejas, y la dificultad para abordar aspectos relacionados con la comprobación de la posible fabricación.

Fu et al., [Ref. 30], en su trabajo realizan un completo análisis de la geometría y topología en B-Rep para llevar a cabo una identificación y clasificación de superficies, ciclos de aristas, y aristas individuales, de cara a obtener dos tipos de Elementos Característicos de Diseño: interiores y exteriores.

A través de las relaciones entre superficies, y de los tipos de ciclos y aristas que éstas contienen, se obtienen los Elementos Característicos de Diseño que representan a una región concreta. Definen “caja límite” como el mínimo volumen representado por un bloque cúbico que contiene a las superficies de la región considerada. El Elemento Característico de Mecanizado se corresponderá con la diferencia entre la ‘caja límite’ y la pieza en la región tratada.

Las taxonomías realizadas, y la definición detallada de las entidades geométricas y topológicas manejadas, junto con la tipificación en B-Rep de los Elementos Característicos de Diseño a partir de las relaciones entre entidades, son aspectos destacables en el método que presentan.

Su principal desventaja reside, precisamente, en la obtención del conjunto de relaciones que define a cada Elemento Característico de Diseño, ya que no se tiene la certeza de cubrir todos los casos. Por otra parte, se establece una relación directa entre Elemento Característico de Diseño y de Mecanizado, cuando se sabe perfectamente que no la hay, salvo que se restrinjan los Elementos Característicos a utilizar.

Autores como Y. Lu et al., [Ref. 70], en su búsqueda de un conjunto de volúmenes que permita establecer un mallado hexaédrico de una pieza, también utilizan la relación de concavidad y convexidad entre las aristas de un ciclo, combinándolo con ciertos heurísticos para encontrar los volúmenes. En su trabajo de reconocimiento se apoyan en grafos sobre los que realizar las búsquedas. En este trabajo en concreto, se centran en el reconocimiento de elementos del tipo saliente o protusión. Para llevarlo a cabo realizan una clasificación del tipo de ciclos que da paso a cada uno de los salientes reconocidos, y de la relación espacial existente entre ellos. Aspecto interesante, pues muestra diversas geometrías en las que aparecen salientes y como identificarlas, buscando las superficies adecuadas sobre las que realizar un barrido para generar a uno o varios de estos salientes. Entre sus inconvenientes está la limitación a geometrías sólo del tipo saliente, descartando por completo a los huecos e intersecciones.

2.3. Métodos basados en incrementos en el eje Z

Son algunos los autores, que trabajando con volúmenes asociados a concavidades y huecos, o a salientes y protusiones, optan por realizar un análisis en planos separados por pequeños incrementos normales al eje ‘Z’ del sistema de coordenadas general del modelo de la pieza.

Lin y Lin, [Ref. 69], clasifican los Elementos Característicos de Diseño según sean preformas iniciales, volumen a eliminar, o volumen de material a aportar. El proceso de reconocimiento planteado consiste en obtener la cantidad de material a eliminar en el bruto inicial para alcanzar la pieza final. A continuación, este volumen (Delta-Volumen) es descompuesto en un conjunto de volúmenes 'rebanadas' (volúmenes de espesor constante), agrupando para ello a aquellos vértices del Delta-Volumen que poseen la misma profundidad en 'Z'. Los volúmenes 'rebanada' son fácilmente asociables a operaciones del tipo ranura (slot).

Para conseguir la asociación entre los volúmenes 'rebanada' y las ranuras, se realiza un tratamiento de las posibles islas de material que existan en cada volumen 'rebanada'. En este proceso se convierten cada una de las islas no rectangulares en rectangulares, y se asigna la diferencia de material de esta conversión a un Elemento Característico de Mecanizado independiente.

El eje 'Z' representa la orientación que tendrá el eje de la herramienta encargada del mecanizado, aunque no indican, como y con qué criterios lo seleccionan, o si se toma más de una opción.

La utilización de este método con caras no planas conlleva grandes inconvenientes, pues no obtienen volúmenes 'rebanada' asociables únicamente a ranuras. Con la incorporación de superficies no planas, o con la aparición de planos inclinados (no normales al eje 'Z'), se vuelve casi imposible establecer una agrupación coherente de vértices, quedando muchas superficies marcadas por el mecanizado al estar incluidas en varios volúmenes 'rebanada' a la vez.

En el trabajo presentado por Yang et al., [Ref. 115], se describe un proceso de extracción de Elementos Característicos de Mecanizado basado en una dirección preferente que marca la profundidad del mismo. Esta dirección es la que tomará la herramienta encargada del mecanizado. De hecho, todos los Elementos Característicos reconocidos pueden expresarse como una sección y una dirección de barrido con una profundidad final.

El método de Yang et al. ya comentado en trabajos anteriores, [Ref. 114], opera con superficies planas y cilíndricas, manejando sin excesivos problemas a geometrías con direcciones de "barrido" paralelas a los ejes coordenados (geometrías ortogonales). En el caso de no ser así, se procede a reconocer a aquel elemento ortogonal que casa en mayor medida con la geometría, dejando un "remanente" fruto de la no ortogonalidad.

Reconocen dos tipos de Elementos Característicos, los llamados "plantilla", que tienen una equivalencia directa y completa (a nivel de características y superficies que los forman) con unos conocidos, tipo, ranuras, ranuras en forma de 'T', cajeras regulares, etc., y los llamados "cajeras complejas", con o sin fondo.

En cualquiera de los casos, una de las primeras acciones es localizar o reconstruir el fondo del Elemento, pues marcará su principal parámetro y el punto de inicio para su identificación. Todos los razonamientos teóricos que guían los algoritmos de reconocimiento de Yang et al., están apoyados en las geometrías generables en un mecanizado de tres ejes, y utilizan criterios de vecindad (cóncavo/convexa).

Se eligen como direcciones de barrido las llamadas 'primarias', paralelas a la normal en la superficie fondo, y las 'secundarias', que son sus perpendiculares. Al ser

infinitas se discriminan en función del resto de las superficies de la región tratada. Las secundarias se toman ante Elementos Característicos sin fondo.

El método propuesto por Yang et al. contempla también las interacciones entre Elementos Característicos, cuya existencia provoca anomalías en las superficies de los Elementos "plantilla" reconocidos en un primer estadio. Esta circunstancia se tiene en cuenta para evaluar de nuevo al Elemento extraído, obteniendo en este caso múltiples interpretaciones. Estas interpretaciones serán aceptadas o rechazadas en fases posteriores de la Planificación de Procesos.

Entre sus limitaciones se encuentra su reducida aplicación, debido a las superficies contempladas y al tipo de Elementos Característicos de Mecanizado reconocidos. Se echan en falta, por ejemplo, aquellos afectados por la existencia de islas. Las direcciones tomadas obedecen a una lógica, aunque no se cubren todos los casos, ya que para el conjunto de superficies que define al Elemento podría obtenerse una dirección válida y no ortogonal. La propuesta de "ortogonalización" que se hace, buscando a aquel que cubra a la geometría en mayor medida, no parece aceptable, puesto que la geometría es partida en dos y hay un trozo que es rechazado, cuando puede no ser necesaria esa descomposición utilizando un eje con una orientación favorable.

Por otra parte, puede encontrarse la utilización de un método basado en incrementos dispuestos a lo largo del eje 'Z', aprovechando formatos para una fabricación basada en capas, como son los empleados en la obtención de prototipos, entre ellos la realización de prototipos por mecanizado CNC. Autores como Loh et al., [Ref. 113], se centran en la fabricación ortogonal por capas, para lo cual, utilizan el sistema de coordenadas adecuado y realizan una descomposición en volúmenes del modelo 3D de la pieza a fabricar. Pieza almacenada en formato STL.

Loh et al. obtienen los volúmenes a través de relaciones entre las capas, estableciendo un umbral en 'Z' para asociar las distintas entidades existentes en cada una. El tipo de Elementos Característicos extraídos son comparados con unos patrones.

3. Técnicas híbridas

Se tratan en este apartado aquellos métodos que no tienen una clara pertenencia a alguno de los anteriores. Una característica que puede encontrarse en las Técnicas híbridas es la utilización combinada de varias, para solucionar problemas que no quedan cubiertos por separado. Por ejemplo, en el reconocimiento de preformas para fundición sobre las que posteriormente se realizará un mecanizado, Kim y Wang, [Ref. 58], combinan el reconocimiento basado en patrones para Elementos Característicos de Mecanizado llamados "atómicos" (básicos, completamente definidos y en los que no existe interacción con otros), con la suma alternativa de volúmenes con partición para aquellos que si interaccionan (comentada en el punto referente a la descomposición por envueltas exteriores convexas, 'Convex Hull').

Otra utilización combinada de técnicas se encuentra en la propuesta de W. D. Li et al., [Ref. 64], en la cual se combina el manejo de grafos construidos a partir de superficies, aristas y atributos, con reglas que posibilitan la extracción de los

Elementos Característicos de Mecanizado. A su vez, incluyen el uso de una red neuronal que permite clasificar a los Elementos obtenidos de acuerdo a unos patrones predefinidos. Admiten variaciones respecto al patrón, y permiten entrenar a la red para incluir nuevas variaciones. El método contempla la interacción entre Elementos Característicos, aunque presenta dificultades de reconocimiento y clasificación ante geometrías complejas.

Pensando en una utilización conjunta en técnicas DFA (Design for Assembly) Coma et al., [Ref. 21], proponen un método mixto de reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado en modelos 3D. Inicialmente emplean un conjunto de reglas para realizar una clasificación, a nivel general, del tipo de Elemento Característico de Mecanizado sobre el que se está, para posteriormente aplicar un método específico sobre él, distinguiendo entre:

- Reconocimiento basado en ciclos interiores de aristas, para reconocer agujeros y cajeras.
- Método basado en el análisis de los vértices presentes en los ciclos que delimitan una superficie, encargado de reconocer escalones, ranuras y hendiduras.
- Análisis local de la topología guiada por reglas, para la detección de chaflanes y redondeos.

Como puede deducirse, todos los métodos tienen sus deficiencias, esto provoca el reconocimiento no satisfactorio de Elementos Característicos especiales o complejos, debido a intersecciones o geometrías comprometidas, por ejemplo, la inclusión de islas y salientes de material.

También se incluyen como Técnicas híbridas, aquellos métodos que se apoyan en Elementos Característicos de Diseño para establecer las zonas susceptibles a ser analizadas por un reconocedor de Elementos Característicos de Mecanizado, teniendo en consideración la secuencia de cambios seguida en el proceso de diseño y sin llegar a ser una simple operación de cambio o conversión, como el trabajo presentado por Zhengming et al., [Ref. 117]. Puede encontrarse más información, sobre la integración del diseño basado en Elementos Característicos y el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, en el trabajo de Venkataraman et al., "An investigation of integrating design by features and feature recognition", [Ref. 104].

A su vez, se ha preferido dejar en el apartado de Técnicas híbridas a los métodos de dudosa clasificación, bien porque el proceso de reconocimiento no tiene una clara pertenencia a las técnicas vistas, o simplemente porque tratan de resolver el problema por otros caminos y razonamientos.

En esta línea se encuentra la propuesta de Lim, [Ref. 67], que divide la geometría 3D (B-Rep) en unas superficies diferentes a las del propio modelo, llamadas "laminæ", lámina. En su método va eligiendo una a una las aristas de la pieza (a la arista elegida se le llama "semilla"), y apoyándose en su punto inicial y final genera dos planos normales a la arista. Estos planos representan los límites del volumen que va a construir, se trata del plano 'techo' y 'base' del volumen. Posteriormente, va creando cada una de las láminas correspondientes a las paredes del volumen. Para ello se apoya en las aristas presentes en los planos 'techo' y 'base', generando un

ciclo cerrado de aristas en cada plano y añadiendo, si es necesario, nuevas aristas necesarias para cerrar ciclo. Cada arista del ciclo en el plano 'techo' dará paso a una lámina 'pared', limitada a su vez por una arista del plano 'base'.

Las laminas coincidirán total o parcialmente con superficies existentes, aunque se generarán láminas vacías, (void laminae), correspondientes al cierre de huecos y cavidades entre superficies de la pieza. Las láminas vacías están directamente relacionadas con la inclusión de nuevas aristas en los planos 'techo' y 'base'. Las láminas resultado se guardan en un grafo de adyacencias direccionadas, esto es, cada nodo representa a una lámina y los arcos a la relación entre ellas respetando un sentido de recorrido. Posteriormente, este grafo es explorado para buscar ciclos de láminas teniendo en cuenta su sentido, que indicará si se trata de una depresión o una protusión. Estos ciclos constituyen el límite de los Elementos Característicos de Mecanizado.

La asociación de un ciclo a un Elemento Característico de Mecanizado se realiza a través de unas reglas que determinan el número y tipo de láminas que contiene el ciclo, así como otras características geométricas que ayudan a distinguir entre casos. Al calcular las láminas se están "dividiendo" todas las superficies en función de sus vértices, concretamente de los puntos inicial y final de la arista "semilla". De esta forma se evitan ciertos problemas relacionados con transiciones entre superficies y que impiden la asociación con una única operación de mecanizado.

Entre los inconvenientes destacables, se encuentran aquellos relacionados con el uso de un conjunto de reglas que identifican a un grupo finito de Elementos Característicos de Mecanizado. Otra situación a destacar, es la existencia de geometrías (provocadas por la intersección entre láminas) que impiden que el ciclo de láminas se cierre, no dejando actuar al proceso de reconocimiento.

Un aspecto interesante es la clasificación realizada, en la que destaca la no asociación directa del Elemento reconocido con una operación, puesto que un mismo volumen puede ser eliminado con operaciones diferentes. Llama 'neutrales' a las entidades propuestas, entre ellas aparece la entidad denominada, 'Area-Clearance', no obtenida durante el proceso de reconocimiento y cuya eliminación es necesaria para obtener la pieza final, ya que está formada por el resto de material no reconocido.

Ismail et al., [Ref. 50], recorren directamente el fichero en B-Rep, formado íntegramente por caras planas (piezas prismáticas). Para cada superficie primaria (la que caracteriza al Elemento Característico de Mecanizado, por ejemplo, en una cajera su fondo) examinan los ciclos de aristas que la delimitan, tanto interna como externamente. Utilizan unos puntos llamados de 'testeo' (relacionados con las aristas del ciclo), sobre ellos van obteniendo valores del tipo: 'se encuentra el punto dentro del modelo sólido de la pieza', 'sobre el modelo', o 'fuera del modelo sólido de la pieza', asignando un código numérico a cada uno.

La cadena ordenada según las aristas del ciclo, del resultado obtenido en los puntos de 'testeo', es comparada con la extraída sobre 'superficies primarias patrón' (superficies que dan acceso y definen al patrón). En esta comparación, puesto que se manejan codificaciones numéricas, se usan reglas (igualdades y relaciones mayor/menor) que ligan al número de aristas totales con los puntos de cada tipo obtenidos.

En el artículo referenciado se echa en falta una aclaración sobre la determinación de la 'superficie primaria' en geometrías complejas, o en caso de tomarse todas, el tipo de discriminación que se sigue ante el resultado que provocan las falsas 'primarias'.

En un trabajo posterior, [Ref. 51], amplían el tipo de superficies admitidas incluyendo a las cilíndricas, y por tanto el tipo de patrones reconocidos. El reconocimiento que Ismail et al. llevan a cabo se basa en la búsqueda de coincidencias, 'pattern matching', con todos los inconvenientes que esto conlleva.

Meeran y Zulkifli, [Ref. 75], parten del modelo 3D en B-Rep (sólo piezas prismáticas) para transformar los volúmenes en capas 2D, formadas por aristas y vértices. Para conseguirlo van generando secciones transversales al modelo, a lo largo del eje 'Z', eje supuesto para la herramienta que lo mecaniza. El contenido de estas capas se convierte en matrices numéricas, que sirven de entrada a una red neuronal encargada de realizar una agrupación de los vértices en la capa. Las agrupaciones se corresponden con los Elementos Característicos de Mecanizado. En esta asociación aplican ciertas reglas de agrupación (heurísticos) ligadas a las aristas, con el propósito de guiar al proceso y favorecer un mayor tamaño en los Elementos obtenidos. En caso de no ortogonalidad, utilizan previamente una segunda red neuronal que los descomponga en posibles elementos ortogonales, ligados a través de operaciones lógicas.

El método está especialmente concebido para solucionar problemas relacionados con la no ortogonalidad de los volúmenes que aparecen en la pieza. Durante su ejecución se apoyan en estructuras intermedias en forma de grafos, sobre las que almacenan la información. El método queda resumido en tres pasos:

- Orientar la pieza respecto a una dirección de acceso favorable en el mecanizado. No se indica el criterio que se sigue para este propósito.
- Descomponer en planos a lo largo de la dirección anterior, según los vértices existentes. Esta dirección pasa a ser la del eje 'Z'.
- Elegir, de dos en dos, los planos sobre los que extraer el área y los límites de ésta (paredes). Los resultados obtenidos son la entrada a una red neuronal que decide, en última instancia, los volúmenes existentes en la pieza.

Entre los inconvenientes que se encuentran al método, cabe destacar, la dificultad para trabajar con aristas curvas y por tanto con superficies no planas, la no admisión de paredes inclinadas, y la dificultad para garantizar el completo y correcto mecanizado del material sobrante, ya que esto dependerá de la agrupación de vértices realizada, y por tanto de las formas propuestas, algunas de ellas partidas para adaptarlas a los patrones previamente establecidos.

En un trabajo posterior Meeran, [Ref. 76], aplica métodos de reconocimiento en 2D sobre múltiples vistas para la reconstrucción de geometrías ocultas en el objeto 3D al que representan. Establece de esta forma, un enlace entre los procesos de inspección visual y la fabricación, utilizando como principio el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado comentado.

Capítulo 5. Reconocimiento automático en los procesos convencionales

Este capítulo representa el cuerpo principal de la Tesis, en el que haciendo uso de conceptos, definiciones y consideraciones expuestas en los capítulos anteriores, se expone el proceso propuesto, diseñado y desarrollado para el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado a partir del modelo 3D de la pieza en formato B-Rep.

El proceso de reconocimiento propuesto intenta seguir un razonamiento y forma de proceder similar a la llevada a cabo por un experto, en las primeras etapas de la realización de un Plan de Procesos. Para que el método propuesto posea una amplia generalidad y campo de actuación, se realiza en primer lugar una clasificación y caracterización de los procesos de mecanizado por arranque de material con herramienta de corte. Esta clasificación atiende a unos criterios relacionados con los movimientos permitidos en una máquina (proceso), y por tanto, con lo que mediante ellos se puede obtener.

A continuación se define y sitúa en el contexto de la Tesis, la principal entidad/concepto manejada, el Elemento Característico de Mecanizado. La definición de este concepto se acompaña con un modelo de información que permite estructurar y almacenar sus datos para una posterior utilización en el resto de etapas de la planificación. El método de reconocimiento propuesto no se centra en un único proceso de mecanizado, sino que revisa a todos los posibles.

Aunque inevitablemente la Planificación es un proceso cíclico, y hay que ir probando a todos los procesos, se ha prestado especial atención a dos aspectos:

- Evitar la selección de características pertenecientes al resto de etapas de la planificación, por ejemplo, el tipo de operación, la herramienta a emplear, etc., en favor de demostrar que la geometría propuesta es mecanizable bajo ciertas condiciones. Ya se seleccionarán con posterioridad en el resto de la Planificación.
- Determinar las causas que fuerzan a la eliminación de un volumen con más de una operación. Atendiendo a estas causas se establecerá una descomposición que permita aportar soluciones alternativas, ordenadas de más general a menos. Antes de poder afirmar, que no es posible generar la geometría asociada al volumen de mecanizado mediante un proceso de arranque de material con contacto, se analizarán todas las posibles alternativas.

Hacia el final del capítulo, aparece otra característica que en parte se ha ido fraguando en el resto de pasos y que aquí se hace más evidente: la necesidad de combinar las soluciones encontradas. Cualquier planificador, siempre que pueda, tratará de buscar combinaciones de operaciones para reducir su número, ganar tiempo, aprovechar herramientas, etc. La información que se guarda en los Elementos Característicos de Mecanizado permite buscar estas combinaciones.

Como podrá observarse a lo largo de los puntos en los que se ha dividido el capítulo, se hace referencia a los algoritmos desarrollados. Para validar el razonamiento teórico expuesto, se han implementado los algoritmos necesarios para el grupo de procesos (de la clasificación realizada) más genérico y que mayor complejidad de análisis comporta, ya que cubre casi todos los aspectos que se pueden encontrar en el resto, se trata del grupo que toma como proceso representante al 'Fresado'.

1. Clasificación de los procesos de mecanizado

El procedimiento propuesto para reconocer e identificar a los Elementos Característicos de Mecanizado, se basa en las geometrías que pueden generarse con una herramienta y unos movimientos determinados, propios del proceso implicado. Estas geometrías son el resultado de combinar unos movimientos de corte y de avance, en los que por una parte se encuentran los movimientos relativos entre pieza y herramienta (trayectorias lineales, circulares o combinación de éstas), y por otra, aquellos intrínsecos o propios de la pieza o herramienta, como es su capacidad de giro.

Para dotar a la metodología de una gran generalidad y amplio campo de trabajo, que permita su aplicación sobre los procesos de mecanizado más habituales, se han estudiado diversos procesos, como el torneado, limado, fresado, rectificando, taladrado, brochado, ..., observando las distintas geometrías que pueden obtenerse en ellos al arrancar material del bruto de partida, de acuerdo a una serie de operaciones y mediante unos movimientos de corte y avance característicos.

La conclusión de este estudio, ver Tabla 5-1, es que los movimientos implicados son los que marcan la geometría generada, no debiéndose seguir un razonamiento contrario, en el que a partir de una geometría dada se le buscan unos movimientos

que la generen y en consecuencia el proceso adecuado. Esto justifica que la clasificación de los procesos de corte realizada se centre en los movimientos, no en unas formas geométricas concretas, como se ha venido realizando hasta ahora.

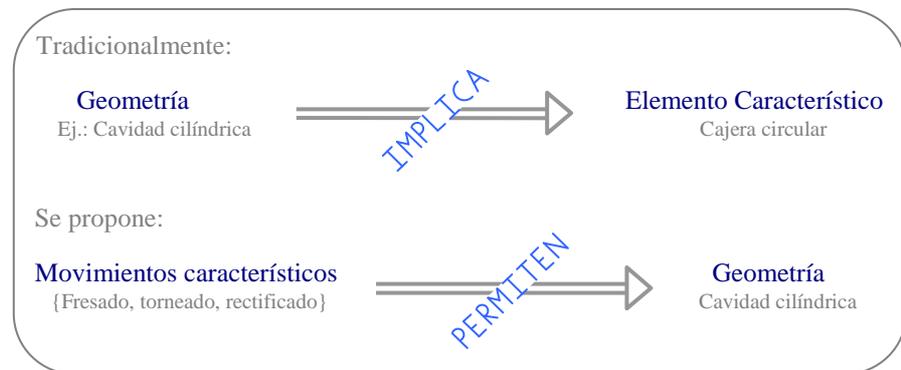


Tabla 5-1. Relación tradicional de la geometría en las clasificaciones, y propuesta.

Trabajando con una clasificación basada en movimientos, se cubren todas las posibilidades de generación de superficies, independientemente del proceso concreto. Olvidando la limitación que imponen las clasificaciones en base a geometrías tipificadas para un proceso específico.

Las geometrías obtenidas con un proceso de mecanizado concreto están directamente relacionadas con los movimientos relativos de corte y de avance, junto con el tipo de herramienta, con o sin movimiento de giro. Cada una de estas geometrías está caracterizada por unas formas tridimensionales, sin entrar de momento, en aspectos relacionados con las tolerancias o acabados superficiales. Estos aspectos son importantes, pues la selección del proceso a aplicar influye en ellos, pero su selección debe realizarse en etapas posteriores al reconocimiento, cuando entren en juego otros criterios tanto tecnológicos como económicos.

La validación de la geometría es un paso previo y determinante, ya que si la forma no puede obtenerse por mecanizado, con el proceso que sea, carecen de sentido el resto de consideraciones. Por lo tanto, en el proceso de reconocimiento inicial se necesita un planteamiento de tipo geométrico, que permita utilizar las características tecnológicas y asegurar la existencia de movimientos/operaciones para conseguir esas geometrías.

Puesto que el elemento clave es la obtención de la geometría con unos movimientos relativos entre pieza y herramienta, puede utilizarse un criterio similar al seguido en la norma UNE 116-001-88: "Control numérico de máquinas. Nomenclatura de ejes y movimientos", [Ref. 11], para realizar una primera agrupación de máquinas (procesos similares), donde lo único que cambia es el elemento ejecutor, no el resultado final.

La UNE 116-001-88 "Define un sistema de coordenadas y designa los diversos movimientos de una máquina, de tal forma que un programador pueda describir las operaciones de mecanizado sin tener que distinguir si la herramienta se aproxima a la pieza o al contrario". De hecho, lo que se persigue es que los programas sean

intercambiables entre máquinas de control numérico, independientemente de la configuración de la máquina dispuesta por el fabricante, y siempre que represente al mismo proceso. El caso que nos ocupa tiene una característica similar, ya que sólo interesa la capacidad para eliminar un volumen y generar una zona deseada. Esto permite considerar los movimientos en lugar de los procesos, realizando una primera agrupación de máquinas/procesos, capaces de generar las mismas geometrías.

Teniendo en cuenta los tipos de movimientos, se utilizan los siguientes criterios:

- Posibilidad de giro de la herramienta.
- Posibilidad de giro de la pieza.
- Avance de la herramienta exclusivamente rectilíneo.

Estos criterios llevan implícitos aspectos y características tecnológicas del proceso, del tipo: 'si se trata de una herramienta plana o de revolución', 'si el movimiento se lleva a cabo en el plano o en el espacio' y 'si se permiten movimientos de giro en el avance'.

Lo realmente importante es el resultado geométrico obtenido con el proceso de mecanizado, independientemente de la denominación concreta que se le asigne a la operación. Combinando los criterios comentados se propone la clasificación mostrada en la Tabla 5-2, en la que cada grupo tomará el nombre de un proceso representativo, seleccionado y situado en la última columna de la tabla, de forma que sea fácil identificar movimientos y geometrías.

Herramienta Gira	Pieza Gira	Movimiento relativo de la herramienta rectilíneo	Proceso representativo
SI	NO	No necesariamente	Fresado
SI	SI	No necesariamente	Rectificado por revolución
NO	NO	Si obligado	Limado
NO	SI	No necesariamente	Torneado

Tabla 5-2. Criterios y proceso representativo de la clasificación propuesta.

Es necesario recordar que en cualquier herramienta de corte suelen existir filos principales y secundarios, cuya consecuencia es el conformado con más de una zona de la herramienta. Esta situación queda recogida bajo el nombre de 'corte vinculado'.

A continuación se realiza una descripción de cada uno de los grupos propuestos.

- Proceso tipo 'Fresado'.

Los procesos pertenecientes a este grupo poseen movimiento circular de corte en la herramienta, herramienta de revolución, y cualquier movimiento de avance ligado a la pieza o a la herramienta, según la configuración de la máquina.

Entre los procesos más característicos se encuentran: el fresado frontal y periférico, taladrado, rectificado tangencial y periférico, mandrinado, etc.

Todos ellos ofrecen una gran variedad de formas geométricas, pudiendo generar cualquier tipo de superficie regular: superficies planas, cilíndricas, esféricas, tóricas, cónicas, ...

El proceso representativo queda ilustrado en la Figura 5-1, en este caso una fresadora vertical.

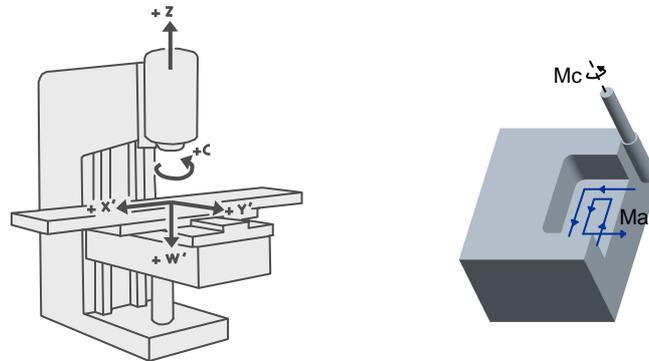


Figura 5-1. Máquina y geometría ejemplo para los procesos tipo 'Fresado'.

- Proceso tipo 'Rectificado por revolución'.

En este grupo el movimiento de corte es circular, y tanto la pieza como la herramienta se encuentran girando. El movimiento de corte y el de avance lo pueden llevar indistintamente la pieza y la herramienta.

Este grupo de procesos engloba, entre otros, a los siguientes: rectificadora con o sin centros, centro de torneado con herramienta motorizada, y centro de mecanizado con plato divisor, entre otros.

Estos procesos generan principalmente superficies por revolución. La generación de planos también puede realizarse en este tipo de procesos, con tan sólo realizar un barrido radial.

La Figura 5-2 muestra un boceto de la máquina para el proceso representativo, rectificadora cilíndrica.

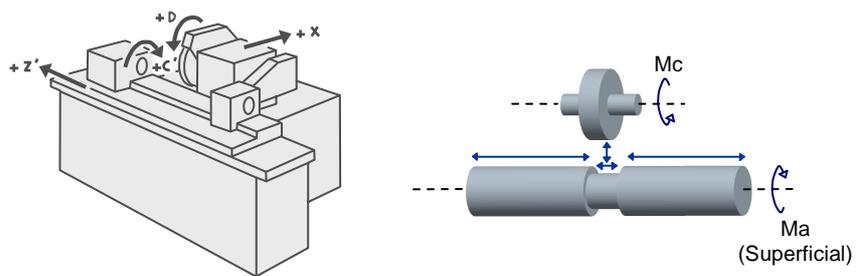


Figura 5-2. Máquina y geometría para 'Rectificado por revolución'.

El eje de la herramienta podrá tener cualquier orientación, tanto si la superficie sobre la que se trabaja es un plano, como si se trabaja el exterior o interior de cualquier superficie de revolución, no necesitando ser coaxial al eje de giro, aunque ésta sea una situación habitual.

Por otra parte, la herramienta posee dos zonas con las que generar las geometrías, una axial y una radial. Ambas zonas, junto con la trayectoria de corte, determinan la forma geométrica final.

- Proceso tipo 'Limado'.

En este grupo el movimiento de corte es lineal, llevándolo a cabo la pieza y/o la herramienta. La herramienta no es de revolución, más bien se trata de una herramienta plana, que realiza desplazamientos lineales durante el corte y avance.

Entre las máquinas que ejecutan los procesos más característicos de este grupo se encuentran: la limadora, cepilladora, mortajadora, brochadora, ...

Con los procesos del tipo 'Limado' se generan geometrías correspondientes a la traslación de un perfil a lo largo de una trayectoria. El solape entre las trayectorias y el perfil de la herramienta determinarán la forma final conseguida.

En estos procesos, el eje de la herramienta suele ser paralelo o perpendicular a la dirección de corte, pudiendo tomar el perfil de la herramienta una orientación distinta a la de su propio eje.

En la Figura 5-3 se reproduce a la máquina, limadora, que desarrolla el proceso representativo, con la designación de ejes y movimientos acordes a la UNE.

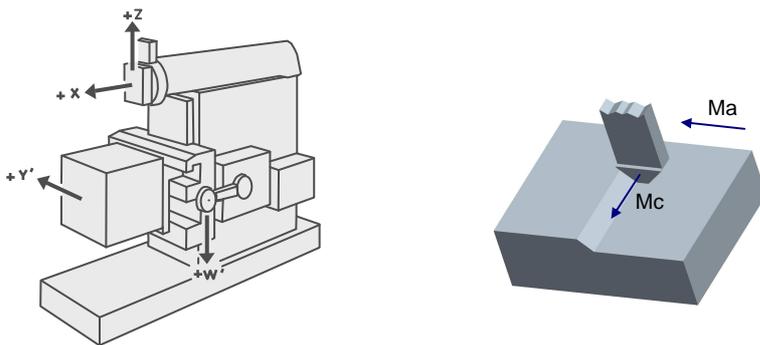


Figura 5-3. Máquina y geometría ejemplo para los procesos tipo 'Limado'.

- Proceso tipo 'Torneado'.

En este tipo de procesos el movimiento de corte es circular y lo lleva la pieza, mientras que la herramienta realiza el movimiento de avance. La herramienta puede definirse en un plano.

Dentro del grupo encontramos procesos como el torneado y sus variantes, como es el caso de los copiadores. En definitiva, todos aquellos procesos que mantiene la pieza en revolución y la herramienta no. En la Figura 5-4 se muestra la máquina representativa, el torno.

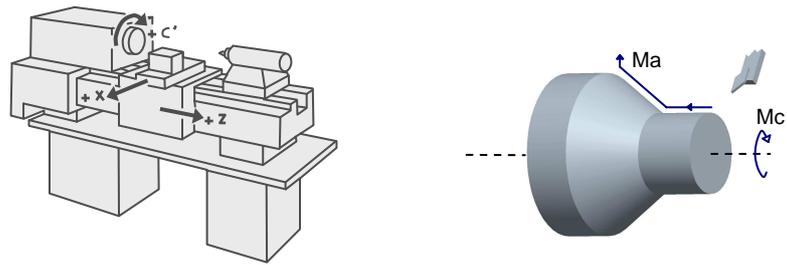


Figura 5-4. Máquina y geometría ejemplo para los procesos tipo 'Torneado'.

Las geometrías generadas con un proceso tipo 'Torneado' son todas de revolución, como, ranuras circulares, cilindros, conos, esferas y combinaciones de estas, entre otras. Quedan incluidas en este grupo las superficies planas, pues también se puede generar un plano por revolución mediante un refrentado.

2. Elementos Característicos de Mecanizado en el contexto de la Tesis

Recordando las definiciones que en el Capítulo 3 se han establecido sobre Zona, Volumen y Elemento Característico de Mecanizado, puede afirmarse que a las zonas a trabajar para obtener la pieza acabada, se las denomina Zonas de Mecanizado y están formadas por superficies/caras de la pieza. Al Volumen de material a eliminar en la preforma o bruto de partida para generar estas caras, y por tanto completar la Zona de Mecanizado, se le llama Volumen de Mecanizado. A su vez se emplea el término Elemento Característico de Mecanizado sobre cada uno de estos Volúmenes, cuando cumplen una serie de requisitos que los validan como operación de mecanizado, entre los que se encuentran: una herramienta válida, un acceso a la zona de trabajo, etc. Por lo tanto, se denomina Elemento Característico de Mecanizado a un Volumen de Mecanizado que cumple con unas condiciones tecnológicas.

Como podrá observarse en la redacción posterior, en ocasiones se utiliza indistintamente Volumen de Mecanizado y Elemento Característico de Mecanizado, pues todo Elemento Característico lleva asociado un Volumen. Es en el momento de introducir/comprobar las condiciones tecnológicas cuando aparece la distinción entre ellos, por ejemplo, que el Volumen asociado al Elemento Característico de Mecanizado se elimine a través de un proceso tipo 'Torneado' y con una herramienta de cilindrar/refrentar a exteriores. En cualquier caso, el objetivo no es buscar un Elemento Característico específico, sino comprobar que es posible una eliminación real.

A diferencia de otros métodos de reconocimiento, en la propuesta que se hace en la Tesis, los Volúmenes se establecen y se descomponen atendiendo a criterios geométricos y tecnológicos, sin forzar inicialmente una correspondencia directa con una operación conocida. Por lo tanto, no se realiza una clasificación y definición de los Elementos Característicos de Mecanizado equiparándolos a operaciones, como suele

ser habitual en las soluciones planteadas por otros autores.

Realizar el reconocimiento de esta forma permite no cerrar la solución y poder trabajar con alternativas también en los procesos. En el resto de la Planificación, y contando con una “descripción” de la pieza a partir de estos Elementos Característicos de Mecanizado válidos, ya se seleccionarán las máquinas/procesos y operaciones concretas en la secuencia más adecuada, tal como se trata en la propuesta de González y Rosado, [Ref. 37]. Esta selección se presenta como un abanico abierto de soluciones posibles, donde se han tenido en cuenta aspectos directamente relacionados con la máquina, y su capacidad. Según las operaciones seleccionadas se irán recortando parte de las propuestas de asignación de máquina, pero siempre desde un punto de vista razonado y basado en criterios tecnológicos, por ejemplo, el acabado superficial a alcanzar, la productividad, el coste, la reutilización de herramientas, etc.

El motivo de utilizar el tipo de clasificación propuesta y no realizar una selección de Elementos Característicos de Mecanizado directamente relacionados con operaciones, presenta las siguientes ventajas:

- No tratar las operaciones de cada proceso de mecanizado por separado, sino que se resuelven todos por igual, y por lo tanto, no se tendrá una clasificación que deba ser modificada cada vez que se desee incorporar un nuevo proceso. En el reconocimiento intervienen todos los procesos de mecanizado, es más, es el propio Elemento Característico de Mecanizado quien indica que proceso aplicar.
- No se restringen los tipos de Elementos Característicos de Mecanizado reconocidos, a un conjunto finito de patrones equivalentes a operaciones concretas, ya que esto supone una pérdida de universalidad. Siempre podrán encontrarse Volúmenes de Mecanizado con una difícil asociación a estas operaciones.

De hecho, en casi todas las clasificaciones de la bibliografía, y conscientes del carácter ilimitado de las formas geométricas presentes en las piezas, se han dispuesto entidades (Elementos Característicos de Mecanizado) lo suficientemente genéricas para cubrir las situaciones no contempladas. Sirva de ejemplo, la entidad Perfil_General (General_Profile) perteneciente a la clasificación de Kramer y referida al mecanizado con tres ejes, [Ref. 59].

Contemplar una entidad genérica para estos ‘Elementos’ de difícil identificación, suele ser la solución que se ofrece en las clasificaciones que trabajan directamente con operaciones, [Ref. 100], provocada por la incapacidad para reconocer ciertas zonas de la pieza. En la ‘clasificación’ propuesta en la Tesis no se presenta esta situación, ya que no se clasifican las innumerables formas geométricas, sino que se comprueba si se ajustan a unos movimientos de corte y avance disponibles.

- No se eligen indirectamente aspectos tecnológicos del tipo, ‘estrategia de corte’, ‘profundidad de pasada’, ‘acabado superficial’, etc., que vienen impuestos al asignar una operación. La elección deberá realizarse en etapas posteriores de la Planificación de Procesos, cuando se dispone de la información necesaria para decidirlo.

Por ejemplo, el Volumen en azul mostrado en la Figura 5–5, de acuerdo a la clasificación propuesta por Kramer, puede quedar definido con un Elemento Característico de Mecanizado de cualquiera de los siguientes tipos:

- Cajera rectangular sin islas (Rectangular_Pocketed_No_Islands), en este caso abierta, predisponiendo una eliminación del material por capas, con una trayectoria en 'espiral' de la herramienta.
- Ranura estándar (Standard_Groove), de sección rectangular, con una profundidad de pasada que puede no ser la total, y con una trayectoria de corte en línea recta y dirección única.
- Corte en borde/esquina (Edge_Cut), donde se realiza un barrido lineal a lo largo de un filo/canto de la pieza. La forma queda especificada por dos líneas unidas en un punto y extendidas hacia el infinito. La altura de la herramienta vendrá determinada por la profundidad del corte.

En la solución adoptada en la Tesis, aplicada sobre el ejemplo de la Figura 5-5, se generan varios Elementos Característicos de Mecanizado sobre ese mismo Volumen, en los que varía el tipo de proceso aplicable, de acuerdo a la clasificación realizada. En ningún momento se indica que se corresponde con un 'escalón', 'ranura', 'cajera', etc., es decir, no se decide explícitamente la operación.

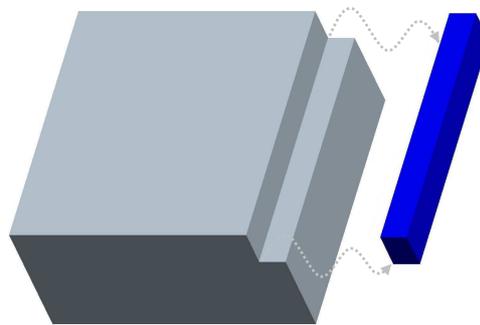


Figura 5-5. Pieza en gris con Volumen de Mecanizado en azul.

- No están influenciados por una secuencia preestablecida de mecanizado. Un Elemento Característico de Mecanizado, no lo es simplemente porque al eliminar cierto volumen de material se genere una Zona concreta. Deben contemplarse situaciones como la intersección de Volúmenes que provocan la desaparición de parte de las Zonas de Mecanizado y que dificultan el reconocimiento de los Elementos Característicos intersectantes, pero que no los anulan. Ante estas pérdidas algunas propuestas son incapaces de reconocerlos.

En resumen, el reconocedor objeto de la Tesis ofrece un completo abanico de Elementos Característicos de Mecanizado, con las correspondientes geometrías asociadas a ellos, contemplando todas las posibles opciones de mecanizado viables, para que, en función del resto de conocimientos tecnológicos, se descarten o elijan las más adecuadas. Lo normal es que existan múltiples soluciones, la óptima o simplemente la válida, deberá ser encontrada por el planificador o sistema de planificación de procesos asistido por ordenador (CAPP), en función de unos criterios externos al proceso de reconocimiento en sí.

2.1. Modelo de información

Para dar soporte al Elemento Característico de Mecanizado adoptado, se ha establecido una estructura general de datos que permitirá manejar los conceptos explicados: Zona, Volumen, acceso, herramienta, etc., para definir y comprobar la validez del Elemento Característico de Mecanizado.

Uno de los puntos clave es obtener Volúmenes de Mecanizado básicos, para los que se pueda establecer una relación real con una operación de mecanizado. Además, se facilita la agrupación de los Elementos Característicos de Mecanizado que los contienen para obtener otros mayores, así como la verificación de la validez de la agrupación, como a lo largo del capítulo se verá. Los Elementos Característicos de Mecanizado que se manejan en el reconocedor de la Tesis, quedan definidos por una estructura de datos como la mostrada en el modelo en EXPRESS-G de la Figura 5-6.

Esta información permitirá concretar aspectos como el tipo de operación a realizar, la herramienta concreta a utilizar, su posible agrupación en Elementos Característicos de Mecanizado más complejos, o incluso decantarse por un proceso de mecanizado u otro en función del resto de datos de la Planificación. Todo ello dependerá de otros datos, tales como, tipos y capacidades de máquinas, herramientas disponibles, configuraciones de amarre utilizables, acabados y tolerancias a conseguir, etc.

En la estructura propuesta, Figura 5-6, la entidad denominada 'Elemento Característico de Mecanizado' se encuentra caracterizada con unas propiedades y entidades que describen:

- El conjunto de superficies (Zona de Mecanizado) que lo delimitan. Está formada por una lista de caras/superficies de la pieza, que demarcan la geometría de la Zona.
- Las posibles orientaciones de la herramienta. Da paso a la entidad encargada de describir las variaciones admitidas para el eje de la herramienta.
- El perfil de la herramienta. Enlaza con la entidad 'perfil_hta', que posee la lista de aristas que componen el perfil de la herramienta.
- El Proceso Tipo a utilizar. Se indica que tipo de proceso de mecanizado se utiliza.

El modelo EXPRESS-G de la Figura 5-6, representa una simplificación del conjunto de estructuras de datos utilizadas durante el desarrollo, en la que se han suprimido ciertos campos (y estructuras) para facilitar su comprensión. Algunos de los datos manejados en cada estructura se describirán con más detalle a lo largo de este capítulo, mientras que otros menos relevantes y aquellos usados para operaciones y estados intermedios, no serán mostrados, quedarán únicamente en el ámbito de la programación.

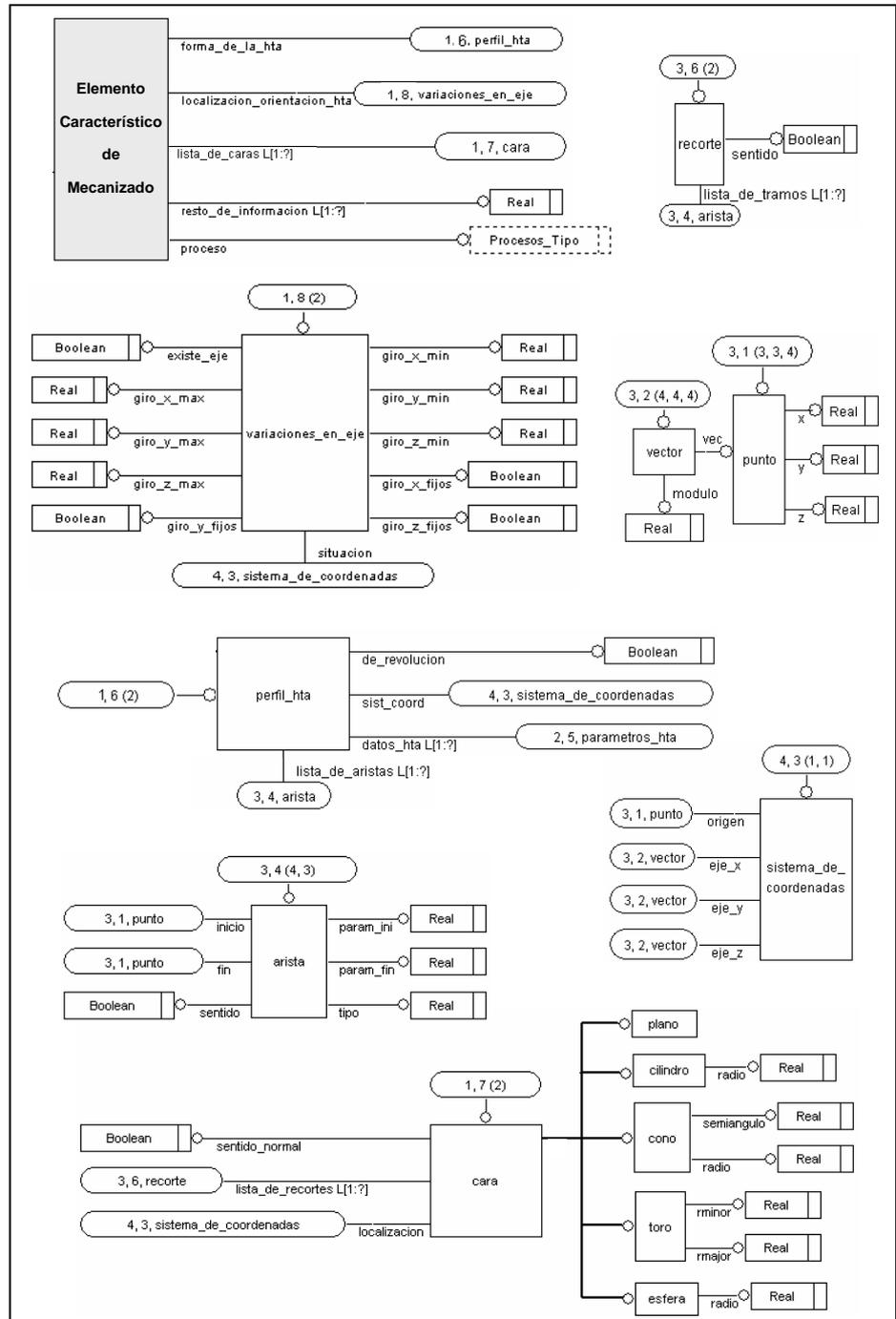


Figura 5-6. 'EXPRESS-G' para un Elemento Característico de Mecanizado.

En un último estadio, los Elementos Característicos de Mecanizado serán trasladados a entidades adecuadas, conformes a los estándares para el intercambio de información en Planificación de Procesos para productos metal-mecánicos, en el caso de torneado y fresado a través la Parte 224 de la ISO10303. Estas entidades se completarán con datos procedentes del resto de etapas de la Planificación, según las decisiones y acciones que se vayan tomando.

2.2. Irregularidades superficiales microgeométricas

Un concepto importante, presente en todas las operaciones de corte y que afecta al estado superficial, son las irregularidades microgeométricas, debidas a las huellas o marcas que quedan en una superficie tras su generación por mecanizado.

Los orígenes de las irregularidades microgeométricas que aparecen en una superficie pueden ser varios:

- Por ser la superficie sobre la que se lleva a cabo la trayectoria de corte. En función del proceso empleado y de la estrategia seguida, por ejemplo, longitudinal, transversal, radial, espiral, siguiendo un perfil, cortando en un sólo sentido, cortando en los dos sentidos, etc., se dejarán unas irregularidades o marcas, debidas al solapamiento de la herramienta entre las distintas pasadas de corte.
- Por el propio proceso y operación que se esté realizando, cuando sobre una superficie no se lleva a cabo la trayectoria de corte, quedando mecanizada con el, o los filos secundarios, 'corte vinculado'.
- Por no poderse mecanizar la superficie completamente con una operación. La unión debida a las distintas operaciones empleadas para completarla provocarán unas marcas en ella. Las superficies generadas de esta forma se denominarán: superficies 'partidas'.

Una superficie puede quedar marcada por cualquiera de los motivos anteriores. En cualquier caso, debe minimizarse el número de superficies afectadas por aquellos motivos que "peor" acabado superficial dejen. Estos son los correspondientes a superficies con las marcas provocadas por la 'trayectoria de corte' y por el hecho de 'partir' superficies.

Siempre que se realice una operación concreta bajo un proceso dado, se controla el "acabado", las marcas o irregularidades que se crean, ya que se conoce la estrategia de corte, la superficie que la soporta, y las superficies generadas mediante el corte vinculado. La operación queda definida con unos pocos parámetros como, la profundidad, origen, límites, centro, ..., obtenidos de forma discreta del conjunto de superficies de la Zona.

De todo lo anterior se desprende, que desde el punto de vista de las irregularidades superficiales un mecanizado 3D, también conocido como mecanizado escultural o de superficies esculpidas, representa la peor situación, ya que la trayectoria de corte se extiende a todas las superficies implicadas.

Como posteriormente se verá, para la generación de una Zona de Mecanizado puede optarse por realizar la trayectoria de corte sobre distintas superficies. En

cualquier caso, la elección de la superficie que soportará la trayectoria de corte deberá garantizar que se genera la Zona por completo, y que el efecto de las marcas es el menor posible.

En la Figura 5-7 se muestran las cuatro superficies integrantes de una Zona de Mecanizado. Si se elige la superficie 'S₄' para soportar la trayectoria de corte en un proceso del tipo 'Fresado', ésta se genera con la punta. El resto de superficies se mecanizarán con el cuerpo de la herramienta (corte vinculado), presentando un acabado diferente. Un ejemplo de posible trayectoria de corte es la que aparece marcada en azul en la figura. Notar, que a través de la superficie 'S₄', con la trayectoria de corte mostrada y con las dimensiones apropiadas de la herramienta, se puede completar el resto de superficies sin cambiar el Plano de Trabajo.

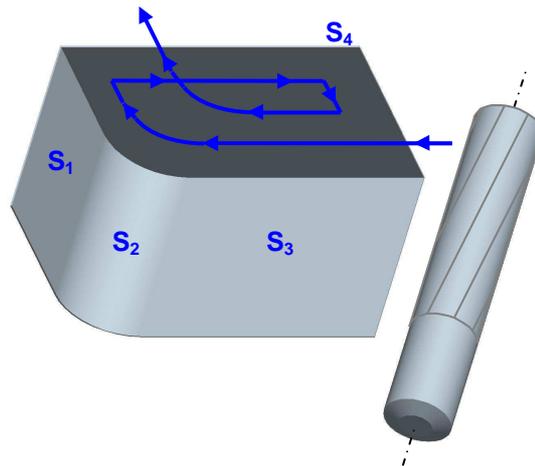


Figura 5-7. Zona y trayectoria de corte sobre una de sus superficies.

3. Visión general de funcionamiento del reconocedor

La Tesis establece una sistemática para obtener de forma automática los Elementos Característicos de Mecanizado que puedan existir en una pieza, de acuerdo al concepto de Elemento definido.

Cualquier técnica de reconocimiento empieza por definir y clasificar los Elementos Característicos de Mecanizado a manejar, pues de una forma u otra, se utilizan como patrones de búsqueda o como entidades de trabajo en el proceso de reconocimiento. Normalmente esta clasificación se realiza bajo un ámbito de aplicación específico, y está íntimamente relacionada con las operaciones de mecanizado a efectuar. Esta característica se encuentra, por ejemplo, en la clasificación de Elementos Característicos para tres ejes de H. K. Miao et al., [Ref. 77], la clasificación de M. W. Fu et al., [Ref. 30], o la clasificación presentada por Ibrahim y McCormack, [Ref. 49]. Para cumplir con el objetivo de incluir a todos los procesos, acordes a la clasificación realizada en la Tesis, y no tener que decidir sobre aspectos propios de la Planificación de Procesos que no correspondan a este nivel, se trabaja con los ya comentados

Elementos Característicos de Mecanizado que incluyen Volúmenes básicos.

En el diagrama de flujo de la Figura 5–8, puede verse la metodología general seguida para la interpretación geométrica y obtención de los Elementos Característicos de Mecanizado de una pieza. Al no hacer una clasificación de los Elementos Característicos de Mecanizado basada en operaciones concretas, éstos reflejarán los distintos Procesos Tipo aplicables para la eliminación de cada uno de los Volúmenes encontrados en la pieza.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de los pasos del diagrama. Descripción que será ampliada en el resto de puntos del capítulo.

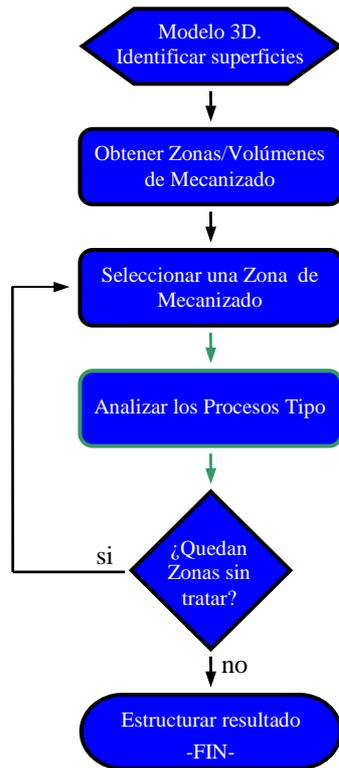


Figura 5–8. Metodología general seguida en el reconocimiento.

- *Modelo 3D. Identificar superficies.* El punto de partida es el modelo geométrico 3D de la pieza, acompañado del modelo 3D del material de partida o bruto, ambos en formato B-Rep. La comparación entre ellos permite determinar las superficies a generar en el bruto para obtener la pieza. Éstas serán todas aquellas presentes en el modelo final de la pieza, y que no se encuentran en el modelo del material de partida o bruto. Del análisis de la pieza se identifican aquellas superficies, que perteneciendo a una Zona/Volumen de Mecanizado, puedan con posterioridad traer problemas relacionados con la eliminación continua y completa de todo el Volumen.

- *Obtener Zonas/Volúmenes de Mecanizado.* A partir del conjunto de superficies a generar se obtendrán las distintas Zonas de Mecanizado. El criterio seguido está

basado en la concavidad/convexidad entre superficies vecinas. Cada Zona representa a un Volumen. Aquellos Volúmenes en los que se determine la existencia de problemas para su eliminación completa, serán descompuestos en Volúmenes básicos donde se eviten estos problemas.

- *Seleccionar una Zona de Mecanizado.* En cada ciclo se selecciona una Zona de Mecanizado (Volumen) a tratar. Se terminará cuando no queden más por seleccionar.

- *Analizar los Procesos Tipo.* Se comprueba si cada Zona es susceptible de ser generada con cada uno de los grupos de procesos de la clasificación realizada. Seguidamente se concretarán las acciones que se llevan a cabo en este paso.

- *Estructurar resultado.* Fin del reconocimiento. La solución final puede verse como una estructura en árbol con relaciones 'And/Or' entre sus ramas. Ramas que representan a los volúmenes 'padre' (iniciales) y sus descomposiciones. Sin repeticiones. La solución se corresponde con aquella que ofrece volúmenes válidos de mayor tamaño y menos superficies afectadas por 'marcas'.

Centrándose en el paso 'Analizar los Procesos Tipo', Figura 5–9, se distinguen los siguientes puntos:

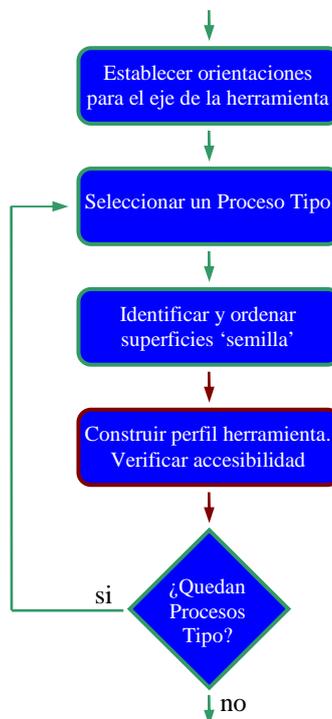


Figura 5–9. Detalle del paso 'Analizar los Procesos Tipo'.

- *Establecer orientaciones para el eje de la herramienta.* Según la disposición de las superficies del Volumen, se buscan las posibles orientaciones válidas para el eje de la herramienta de cara a un mecanizado completo del Volumen. Estas orientaciones se expresan en forma de rangos angulares, referidos a cada eje del

sistema de coordenadas global a la pieza.

- *Seleccionar un Proceso Tipo*. Se prueba con cada uno de los cuatro grupos de procesos establecidos. Debe tenerse en cuenta que una misma Zona de Mecanizado puede generarse con más de un Proceso Tipo diferente. Se elije cada vez a uno de ellos.

- *Identificar y ordenar superficies 'semilla'*. Para cada Volumen, se buscan y ordenan las posibles superficies 'semillas', aquellas sobre las que se puede realizar la trayectoria de corte. Se ordenan de forma favorable, desde el punto de vista del mecanizado, para dejar afectadas con 'marcas' al menor número posible de superficies de la Zona.

- *Construir perfil herramienta. Verificar accesibilidad*. Es de vital importancia garantizar la generación por mecanizado de la geometría relativa a la Zona, para ello debe encontrarse una herramienta y un acceso a la zona de trabajo que lo permitan. Seguidamente se comentarán las acciones a realizar en este paso.

- *¿Quedan Procesos Tipo?*. Cada Zona de Mecanizado debe ser analizada bajo las condiciones que impone cada grupo de procesos de la clasificación. Es importante recordar, que una misma Zona puede ser mecanizada con más de un Proceso Tipo diferente, y que también puede que no exista Proceso Tipo capaz de generarla. Sea la situación que sea, la comprobación debe ser hecha para todos los grupos de procesos.

El paso: 'Construir perfil herramienta. Verificar accesibilidad', Figura 5–10, está compuesto por los siguientes puntos:

- *Seleccionar 'semilla'. Construir perfil herramienta*. Una vez elegida la superficie 'semilla' (sobre la que se llevará a cabo la trayectoria de corte, Punto 5.4 de este capítulo), se recorren las superficies implicadas para determinar la forma genérica que debe tener la herramienta. Esta forma se dejará expresada mediante parámetros (dependientes del tipo de herramienta). No se están fijando valores, simplemente comprobando que geoméricamente el perfil es acorde a la Zona a generar (Volumen a eliminar), según los movimientos característicos del grupo de procesos en el que se esté.

- *¿Es un perfil válido?*. Se comprueba que el perfil de la herramienta no tienen ninguna inconsistencia física que impida su existencia real, tanto si se trata de un perfil para una herramienta de revolución, como para una plana. En caso de presentar inconsistencias no se comprueba el acceso, sino que se prueba con la siguiente superficie 'semilla'. Si es válido, se procede a verificar el acceso a la Zona.

- *Verificar acceso a la Zona de Mecanizado*. Únicamente en caso de disponer de un perfil adecuado, se comprueba la existencia del acceso necesario para desplazar la herramienta y mecanizar la zona completamente. En este paso interviene toda la geometría de la pieza, no sólo las superficies de la Zona de Mecanizado. Un Elemento Característico de Mecanizado no tiene sentido si en su consecución no se verifica por donde pasará la parte cortante y el mango de la herramienta.

- *¿Existe acceso válido?*. En caso de respuesta afirmativa se pasa al punto 'Guardar resultado', ya que se ha encontrado herramienta y acceso para eliminar el Volumen (generar la Zona de Mecanizado).

- *¿Quedan superficies 'semilla'?*. Se accede a este paso si no se ha encontrado perfil de herramienta válido o acceso posible, de tal manera, que para una misma Zona de Mecanizado y Proceso Tipo se probarán todas las superficies 'semilla', seleccionadas según el orden de almacenamiento hasta encontrar solución. En caso de no encontrar solución querrá decir que la Zona o Volumen de Mecanizado implicado no puede ser eliminado con ese Proceso Tipo. Se probará con los otros Procesos Tipo.

- *Guardar resultado*. Si existe herramienta y acceso posible para eliminar el Volumen, generando las superficies de la Zona de Mecanizado, se guarda la entidad 'Elemento Característico de Mecanizado' con la correspondiente información geométrica. Será esta información la que se maneje en el resto de etapas de la Planificación de Procesos.

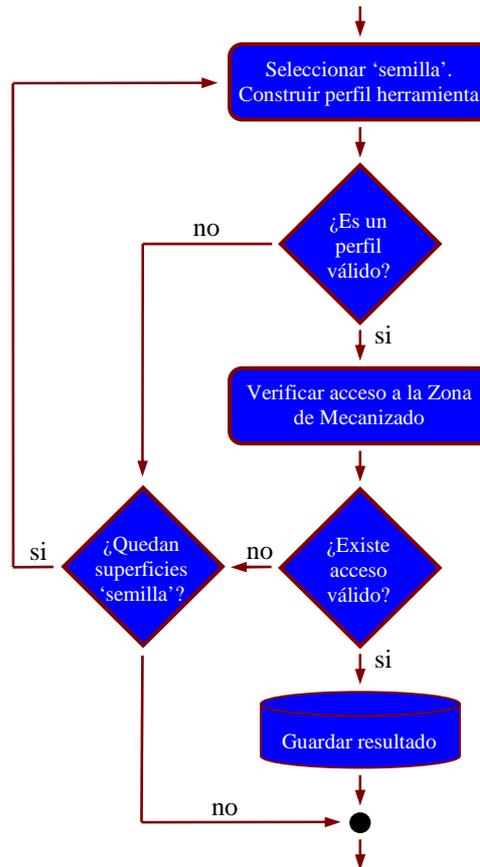


Figura 5-10. Detalle de 'Construir perfil herramienta. Verificar accesibilidad'.

En una etapa posterior, el conjunto de posibles soluciones puede trasladarse a una estructura acorde a la norma ISO10303/224, [Ref. 53], pues con este fin se han estructurado los datos e información que se maneja.

Aunque no aparezca reflejado directamente en los diagramas de flujo mostrados,

puede darse el caso de Zonas/Volúmenes de Mecanizado no realizables con ninguno de los Procesos Tipo de la agrupación, en estos casos no se genera Elemento Característico alguno, aunque si se marca al Volumen implicado como no satisfecho. Al final, se podrá afirmar que una pieza puede ser generada por mecanizado, si todos los Volúmenes a eliminar en ella encontrados están incluidos en al menos un Elemento Característico de Mecanizado. El hecho de aparecer más Elementos Característicos de Mecanizado que Volúmenes a eliminar, indica la existencia de distintas alternativas para el mecanizado de una pieza.

4. Relación de concavidad/convexidad

Cada una de las partes del material a mecanizar para obtener la pieza final viene representada por una Zona de Mecanizado (puede consultarse su definición y correspondencia directa con los Volúmenes de Mecanizado en el Capítulo 3. Punto 4). Estas Zonas se establecen a través del concepto de concavidad y convexidad entre caras/superficies de la pieza.

Cabe resaltar que lo importante es la obtención de la relación entre superficies, tomando como referencia a la arista que las une, arista en común. No se entra en el concepto de concavidad/convexidad propio, en una misma superficie, entendido éste como la clasificación que se puede hacer para cada superficie de forma individual, en función del tipo de trayectoria o desplazamiento que se realiza al recorrer una distancia entre dos puntos no coincidentes, tomando una referencia fija (punto de vista). Acorde a este desplazamiento se pueden clasificar las superficies como, intrínsecamente cóncavas, intrínsecamente convexas, o intrínsecamente cóncavas y convexas. En los dos primeros casos se encuentran las superficies cilíndricas, cónicas y esféricas teniendo en cuenta si el desplazamiento se realiza por la parte interna o la externa en la superficie, y no considerando aquellos desplazamientos en los que no se experimente variación alguna, llamados neutros. Las tóricas son intrínsecamente cóncavas y convexas, ya que independientemente de la zona por la que se realice la trayectoria, exterior o interior, y en función de la dirección seguida, será cóncava o convexa.

Una vez aclarado sobre que entidades se aplica la relación, determinar la concavidad o convexidad entre superficies de un modelo 3D en B-Rep, se reduce a un análisis vectorial en el que debe tenerse en cuenta la información topológica.

Tomando como ejemplo la pieza de la Figura 5–11, puede observarse que al seleccionar como referencia a la superficie 'S₅', el tipo de relación que mantiene con 'S₃' es de concavidad, mientras que con 'S₂' es de convexidad. A la superficie que se toma como referencia, para a partir de ella obtener al resto de superficies que en conjunto representan una Zona de Mecanizado, se la denominará 'superficie investigada', en el ejemplo de la Figura 5–11 la superficie investigada es 'S₅'.

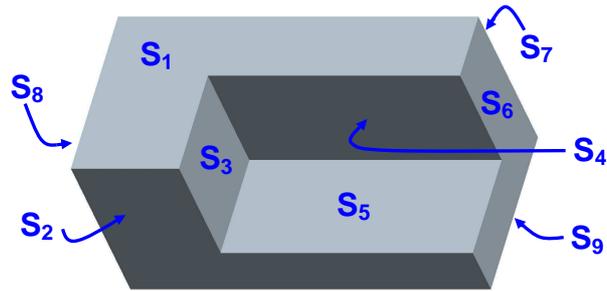


Figura 5-11. Concavidad/convexidad en pieza simple.

Para determinar el tipo de relación entre dos superficies consecutivas, 'S_i' y 'S_j', que comparten una arista en común, 'A_k', basta con realizar el producto vectorial de sus normales topológicas, ' \vec{NT}_i ' y ' \vec{NT}_j ', en un punto 'P_k' de su arista en común. El sentido del vector resultado, 'RES', se compara con el sentido topológico de la arista, 'A_k', extraído de la superficie cuya normal topológica sea el primer operando en el producto vectorial anterior. Para realizar la comparación bastará hacer el producto escalar entre 'RES' y el vector que representa a la arista 'A_k', con el sentido topológico apropiado en la superficie 'i', 'A_{ki}'.

Se tendrá el siguiente resultado:

$$\vec{RES} = \vec{NT}_i \times \vec{NT}_j; \text{ Sentido} = \vec{RES} \cdot \vec{A}_{ki}. \text{ La variable 'Sentido' puede ser:}$$

- Sentido < 1 se trata de superficies cóncavas entre si. Ver Figura 5-12.
- Sentido > 1 se trata de superficies convexas entre si. Ver Figura 5-13.
- Sentido = 0 son superficies tangentes entre si, debido a que es nulo RES.

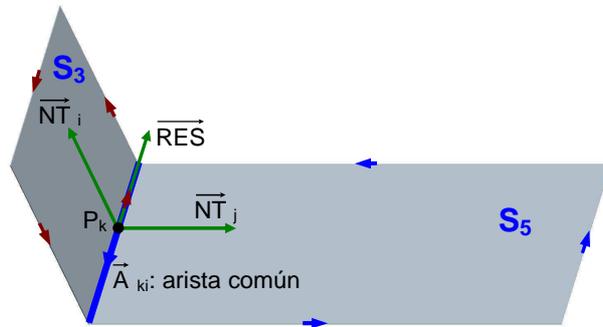


Figura 5-12. Superficies cóncavas, 'S₅' y 'S₃'.

En la Figura 5-12, las puntas de flecha en azul situadas en las aristas que delimitan a la superficie 'S₅', indican los sentidos topológicos. De forma idéntica se han señalado en granate los sentidos topológicos de las aristas para la superficie 'S₃'.

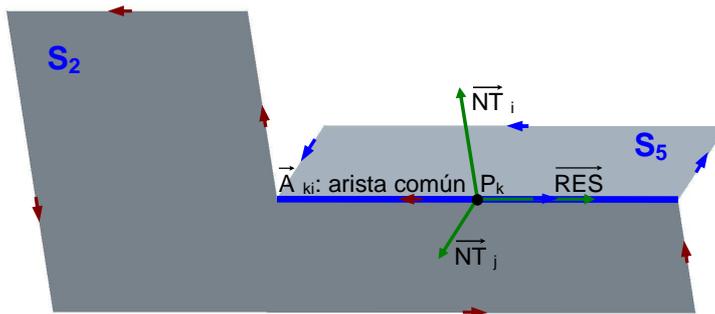


Figura 5-13. Superficies convexas, 'S5' y 'S2'.

Cuando el producto vectorial ' \overrightarrow{RES} ' es el vector nulo, y por tanto, las normales topológicas de las superficies tienen la misma dirección, indica que ambas superficies son tangentes entre sí. Ante esta situación, para averiguar la relación entre las superficies deberán calcularse de nuevo las normales topológicas en dos puntos cercanos a la arista en común, ligeramente desplazados hacia el interior de cada superficie. De esta forma, las normales topológicas a ambas superficies no tendrán la misma dirección, obteniéndose un producto vectorial no nulo y, por tanto, un valor en el producto escalar distinto de cero. Debe recordarse, que aunque la relación que mantienen ambas superficies a través de la arista en común es de tangencia, lo que interesa es la disposición de las superficies en su conjunto. Si esta relación es de concavidad, forman una cavidad en la Zona de Mecanizado, y en caso contrario un saliente.

En principio se pueden determinar las superficies pertenecientes a una Zona de Mecanizado utilizando la relación de concavidad entre ellas. Esta solución servirá para detectar ciertos Elementos Característicos de Mecanizado de carácter simple, como es el caso de taladros, cajas sin islas y escalones sencillos, [Ref. 12] y [Ref. 45], presentando serios problemas ante aquellos con formas geométricas complejas.

4.1. Concavidad/convexidad en superficies tangentes

La situación de tangencia entre superficies se presenta con bastante frecuencia, y es habitual cuando existen redondeos de aristas y transiciones con radios de acuerdo, por citar las más comunes. Realizar un pequeño desplazamiento hacia el interior de cada superficie para lograr un producto vectorial no nulo, aunque aporta una solución presenta otros inconvenientes, como por ejemplo, establecer la dirección sobre la superficie en la que se realiza el desplazamiento, determinar la distancia de separación, etc. Esta distancia de separación estará influenciada por aspectos como, el tamaño mínimo de superficies aceptable, el valor de la 'precisión' de cálculo utilizada en el modelo, etc.

Conscientes de estos problemas algunos autores, [Ref. 62] y [Ref. 95], en sus clasificaciones introducen elementos del tipo 'smooth edge' que permiten tener en cuenta y tratar estas transiciones suaves entre superficies, que son en definitiva transiciones tangentes. Otros autores, [Ref. 119], optan por suprimir las transiciones

tangentes para facilitar el reconocimiento de los Elementos Característicos de Mecanizado, guardando la información necesaria para tenerlas en cuenta más adelante.

Lo que si parece claro, es la necesidad de disponer de un procedimiento, que sin ser dependiente de un valor numérico, permita determinar la relación entre superficies que son tangentes entre si. Cuando dos superficies no son tangentes el problema no se presenta, ya que, independientemente de cómo sea cada superficie se puede establecer la relación entre ambas a través de la arista "no tangente" que las une.

Relacionado con la condición de tangencia entre superficies existe un tipo de superficies, las tóricas, que dificultan aún más la obtención del tipo de relación que mantienen con sus vecinas. Esto se debe a que son superficies que se pueden denominar intrínsecamente cóncavas y convexas, ya que en función de la dirección del desplazamiento que se realice sobre ellas se comportarán de una forma u otra.

Así mismo, se habla de superficie intrínsecamente cóncava o convexa, cuando al pasar entre dos puntos de la misma, tanto por su parte exterior como por la interior, se realiza un recorrido siempre cóncavo o siempre convexo. Un ejemplo se tiene al recorrer un cilindro por la parte exterior, situación que indicará que la superficie es intrínsecamente convexa, mientras que al hacerlo por el interior, la superficie es intrínsecamente cóncava. Hay que advertir, que pueden obtenerse desplazamientos neutros, en línea recta, pero nunca se mezclan los cóncavos y convexas una vez se está situado en el interior o exterior de la misma. Sin embargo, en una superficie tórica, tanto en su parte exterior como en la interior, en función de la dirección del desplazamiento, seguirá una trayectoria cóncava o convexa.

En la Figura 5-14, se muestran ejemplos de las situaciones comentadas ante tangencia con una superficie tórica. En la Figura 5-14 (a), si se comprueba la relación de la superficie 'S₁' con 'S₂' en el punto 'P₁', es de concavidad, pero si los cálculos se llevan a cabo en 'P₂', la relación es de convexidad. Del mismo modo, se encuentran disposiciones con superficies de revolución tangentes entre si, en las que se puede seguir una trayectoria inicialmente cóncava que termina siendo convexa, Figura 5-14 (b).

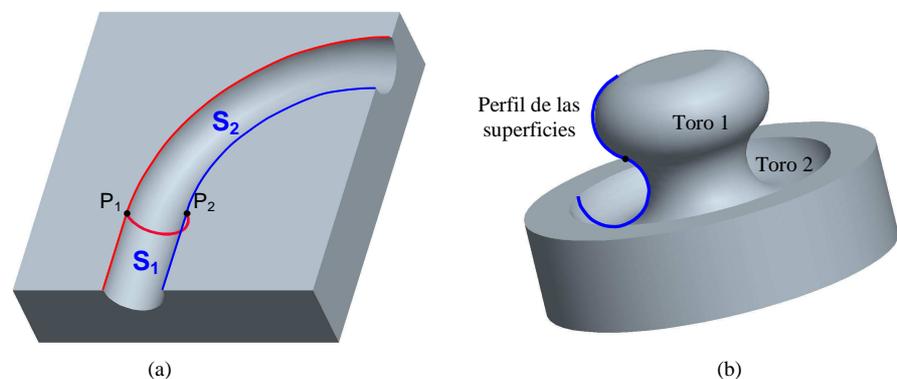


Figura 5-14. Concavidad/convexidad entre dos puntos de una misma superficie.

Para determinar la relación de concavidad/convexidad entre superficies tangentes, máxime si hay superficies tóricas implicadas, debe realizarse un estudio geométrico de las disposiciones que pueden tomar, utilizando criterios topológicos que ayuden a su discriminación.

La solución que a continuación se expone para determinar la relación de concavidad/convexidad, se ha planteado teniendo en cuenta la operativa seguida en la Tesis en el proceso de reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, en la que se buscan soluciones genéricas, prefiriendo una separación de las Zonas de Mecanizado debido a una convexidad que evite particularizaciones. En etapas posteriores, la sistemática de reconocimiento seguida permite la unión de soluciones finales en busca de Elementos Característicos mayores

4.1.1. Relación entre superficies iguales

Cuando las dos superficies con una relación de tangencia son iguales, es decir, son del mismo tipo y poseen las mismas características (valores de los radios coincidentes, mismo eje, igual ángulo, etc.), deben considerarse como una sola superficie. Aunque esta situación no es habitual, B-Rep permite la representación de una misma superficie con entidades separadas. Ante esta circunstancia las superficies deben considerarse en conjunto, independientemente de que interese el interior o el exterior de las mismas, no imponiendo una relación de concavidad y/o convexidad entre ellas.

En la Figura 5–15 se muestran varios ejemplos de superficies del mismo tipo y características que deben considerarse a todos los efectos como una sola, como es el caso de los dos cilindros tangentes coaxiales y de igual radio (Figura 5–15 (a)), los dos toros tangentes coaxiales y de radios mayor y menor coincidentes (Figura 5–15 (b)), y las dos esferas tangentes con el mismo centro y radio (Figura 5–15 (c)).

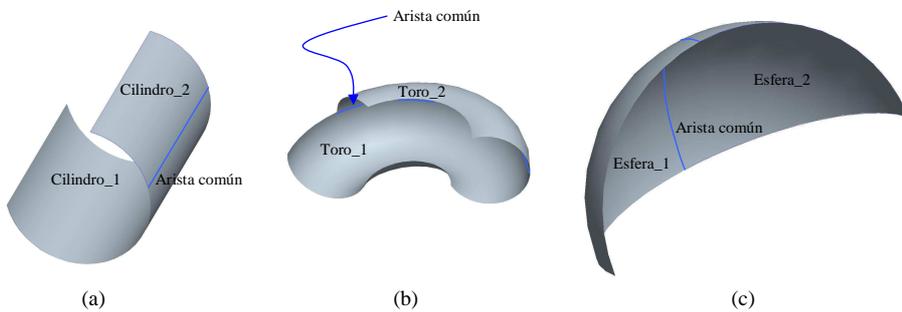


Figura 5–15. Superficies que deben tratarse como una sola entidad.

Esta situación también incluye a los planos. Dos planos tangentes definidos de forma independiente y con el mismo sentido en sus normales topológicas deben tratarse conjuntamente, como si fuera uno sólo.

4.1.2. Relación entre superficies distintas

Para obtener el tipo de relación (concavo/convexa) que mantienen dos superficies tangentes, se ha realizado el análisis de sus posibles combinaciones, formas geométricas resultado. A su vez, se han establecido una serie de recomendaciones a tener en cuenta, como:

- Al relacionar dos superficies bajo el criterio de concavidad se está indicando, de forma indirecta, que ambas van a ser generadas a la vez. Debe garantizarse (tratándolo a nivel local) que dos superficies cóncavas permiten su generación conjunta, independientemente del tamaño o forma de las superficies. En caso de no ser así, no deberían agruparse. Por ejemplo, cuando una de ellas es tórica y la zona en ella representada fuerza a la agrupación a pasar de una relación de concavidad (“hueco”) a convexidad (“saliente”), situación en la que en ocasiones no es posible una eliminación conjunta.
- La obtención de un criterio lo más general posible, evitando entrar en particularizaciones según la casuística.
- Tener presente que la relación de concavidad/convexidad es entre superficies, en conjunto, viendo la unión de las dos como la formación de un “hueco” o un “saliente”.
- No optar por soluciones numéricas que puedan verse afectadas por la ‘precisión’ en los datos manejados, como se ha comentado anteriormente.
- Favorecer la obtención de Zonas de Mecanizado con el mayor número de superficies. Zonas de las que se forma parte por concavidad entre superficies.
- Ser conscientes de la existencia de superficies (las tóricas) que poseen la doble condición de concavidad y convexidad. Situación que afecta a la unión con cualquier otra, ya que el conjunto representado por ambas superficies se comportará, en parte como hueco, y en parte como saliente.
- Contemplar en una relación de tangencia, la existencia de una superficie plana, otorgándole a ésta un carácter de neutralidad. Será la otra superficie la que determine si en conjunto representa un “hueco” o un “saliente”, indicando concavidad o convexidad respectivamente.

El criterio adoptado, para decidir si dos superficies unidas por tangencia mantienen una relación de concavidad o de convexidad, es considerarlas cóncavas siempre que la zona/parte relevante sea su interior y convexas en cualquier otro caso. Debe entenderse como “zona/parte relevante” de una pieza, el lado a considerar en cada una de las superficies que integran la “piel” de la pieza, y que le confieren la apariencia deseada. Por ejemplo, en la Figura 5–16 (a) se ve un cilindro donde su “zona/parte” relevante es el interior, ya que es ese lado de la superficie cilíndrica el empleado para darle la forma a la pieza, “piel”, sin embargo, en la Figura 5–16 (b) se usa el lado externo del cilindro para delimitar el exterior de la pieza, siendo ésta la parte relevante de la superficie cilíndrica empleada.

En una superficie de revolución se distinguirá entre interior y exterior utilizando su normal geométrica (\vec{NG}) y su normal topológica (\vec{NT}), de forma que si mantienen sentidos opuestos ($\vec{NG} = -\vec{NT}$) se trata del interior de la superficie y si son iguales del exterior ($\vec{NG} = \vec{NT}$).

Por lo tanto, ante dos superficies 'Sa' y 'Sb' podrán presentarse los casos indicados en la Tabla 5-3.

$\vec{NG}(Sa) = -\vec{NT}(Sa)$ y $\vec{NG}(Sb) = -\vec{NT}(Sb)$	\Rightarrow cóncavas
$\vec{NG}(Sa) = -\vec{NT}(Sa)$ o $\vec{NG}(Sb) = -\vec{NT}(Sb)$	\Rightarrow convexas
$\vec{NG}(Sa) = \vec{NT}(Sa)$ y $\vec{NG}(Sb) = \vec{NT}(Sb)$	\Rightarrow convexas

Tabla 5-3. Concavidad/convexidad en función de las normales a las superficies.

Cuando una de las dos superficies es plana (neutra), la relación de concavidad/convexidad queda exclusivamente en manos de la otra superficie implicada, como se muestra en la Figura 5-16. Si interesa el interior de la superficie no plana, la relación es de concavidad y en caso contrario de convexidad.

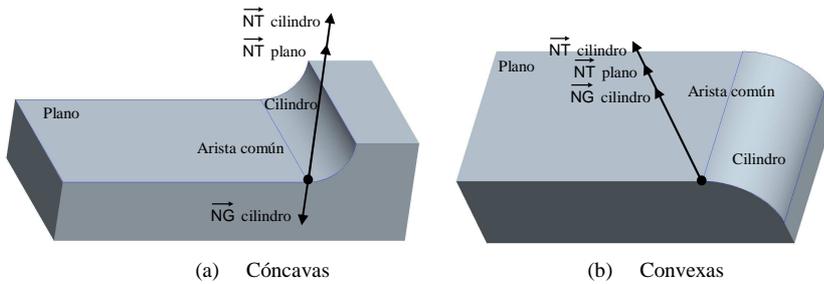


Figura 5-16. Concavida/convexidad entre un plano y un cilindro tangentes.

En el caso de dos superficies tóricas, no se admitirán situaciones en las que no se garantice un Plano de Trabajo en común (Figura 5-17 (a)), o en las que aparezcan geometrías no manejadas en la Tesis, por ejemplo 'splines', ver Figura 5-17 (a) y (b).

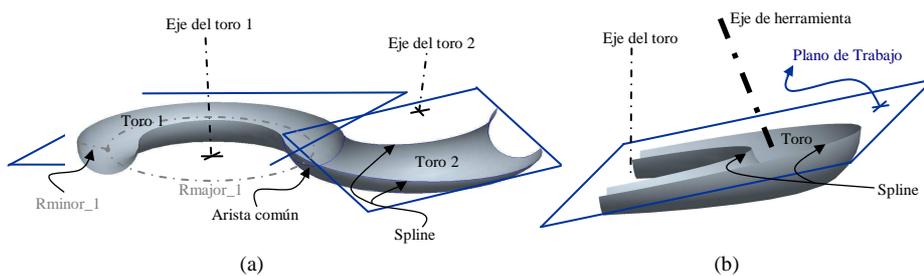


Figura 5-17. Superficies tóricas con presencia de aristas tipo 'splines'.

En el resto de geometrías, resultado de la unión tangente entre dos superficies tóricas, sigue siendo válido el criterio adoptado para determinar la concavidad o convexidad entre superficies, Figura 5-18.

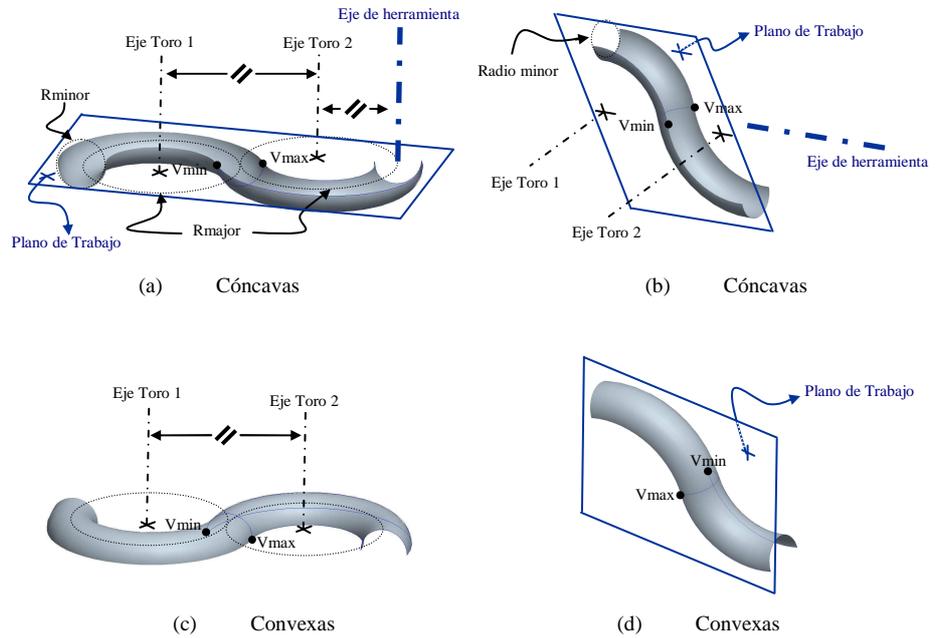


Figura 5-18. Superficies tóricas tangentes unidas por una arista 'Rminor'.

En la Figura 5-18 (a) y (b) se aprecia una relación de concavidad, la normal topológica tiene sentido contrario a la geométrica en ambas superficies. Mientras que en (c) y (d) se aprecian dos casos de convexidad, las normales topológicas y geométricas mantienen el mismo sentido en ambas. En la Figura 5-19 se muestran otros casos donde los ejes de los toros son paralelos entre si para evitar uniones tipo 'spline'.

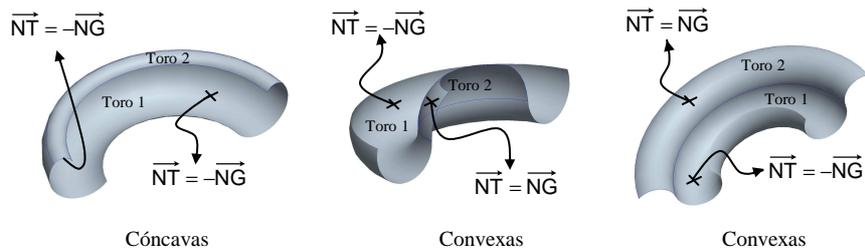


Figura 5-19. Tóricas unidas por una arista circular de valor distinto a 'Rminor'.

En la Figura 5-20 se ven otros ejemplos de unión entre toros en los que, sin mantener ejes paralelos, tampoco aparecen aristas 'spline'.

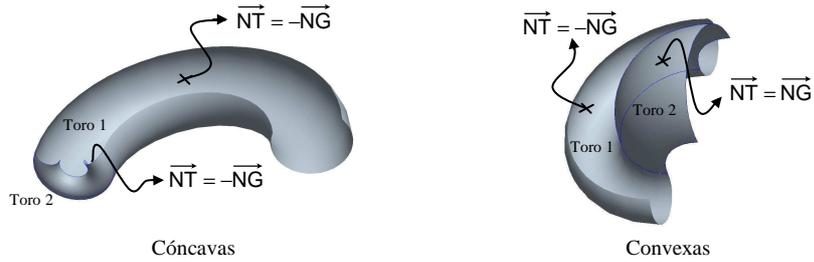


Figura 5-20. Superficies tóricas tangentes unidas, una por su arista 'Rminor'.

Al relacionar una superficie tórica con una cilíndrica o una cónica, se pueden presentar dos disposiciones interesantes, en las que sigue cumpliéndose el criterio de concavidad/convexidad: “Si en ambas superficies interesa el interior de ellas ($\vec{NT} = -\vec{NG}$, en ambas) mantienen relación de concavidad. En cualquier otro caso se trata de convexidad”. En la Figura 5-21 se muestra una superficie tórica y una cilíndrica con ejes paralelos que mantienen una relación de concavidad, mientras que la relación es de convexidad en los casos de la Figura 5-22. El razonamiento para una superficie cónica, en lugar de la cilíndrica mostrada en los ejemplos, es el mismo.

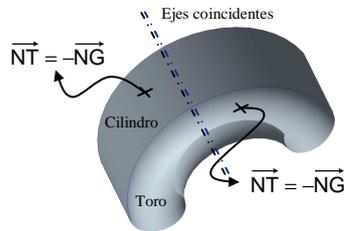


Figura 5-21. Tórica y cilíndrica con ejes paralelos, cóncavas.

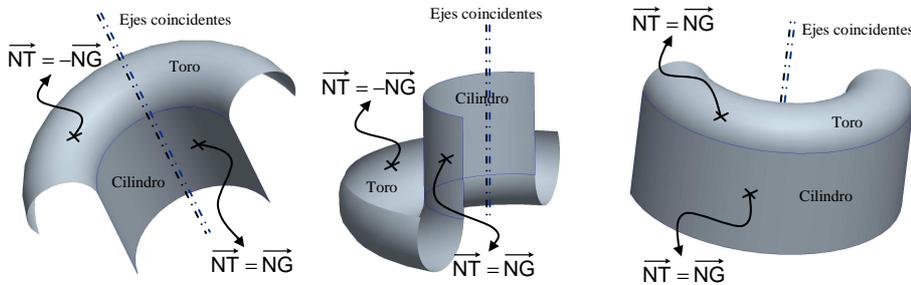


Figura 5-22. Tórica y cilíndrica con ejes paralelos, convexas.

Cuando las superficies no tienen los ejes paralelos entre si, debe mantenerse el Plano de Trabajo entre ambas, y aplicar el criterio general. En la Figura 5-23 mantienen un mismo plano horizontal, siendo en (a) cóncavas y en (b) convexas. En

la Figura 5–24 el plano es vertical manteniendo una relación de concavidad, mientras que en la Figura 5–25 la relación es de convexidad.

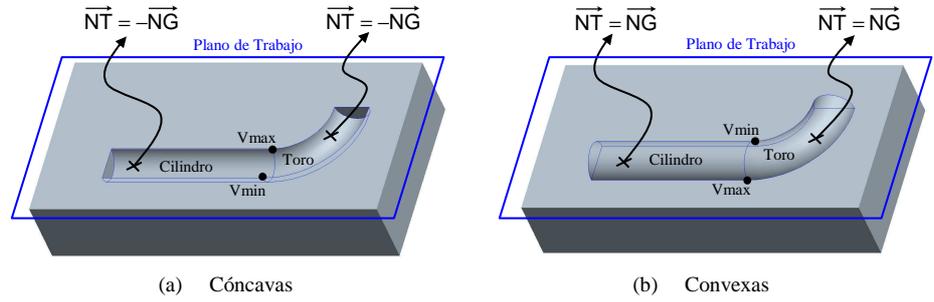


Figura 5–23. Tórica y cilíndrica con Plano de Trabajo horizontal.

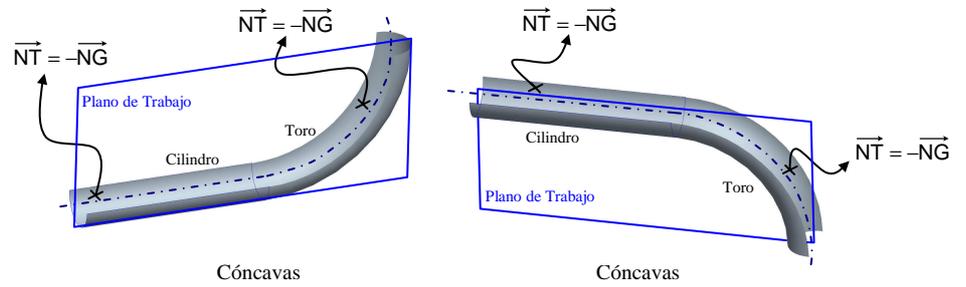


Figura 5–24. Tórica y cilíndrica cóncavas con Plano de Trabajo vertical.

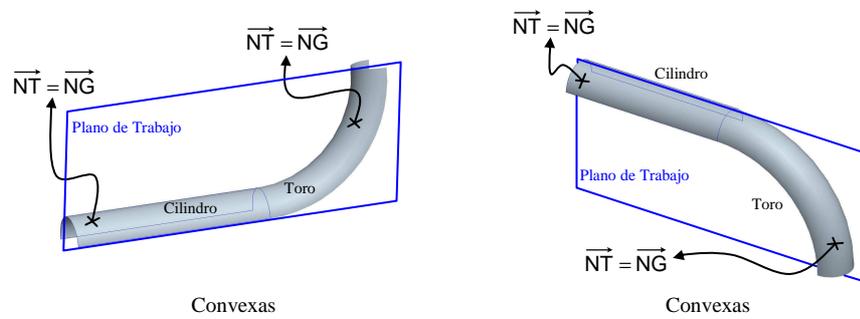


Figura 5–25. Tórica y cilíndrica convexas con Plano de Trabajo vertical.

En la Figura 5–26 y Figura 5–27 se muestran casos entre una superficie tórica y una esférica, la situación es similar a cuando ésta era cilíndrica, debe garantizarse un Plano de Trabajo común.

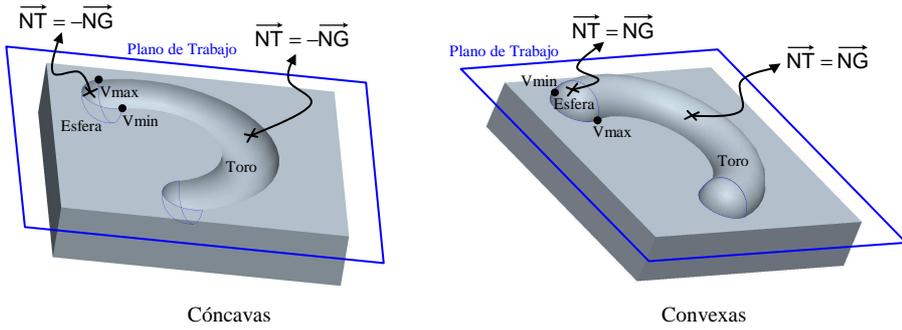


Figura 5-26. Superficies tórica y esférica con Plano de Trabajo horizontal.

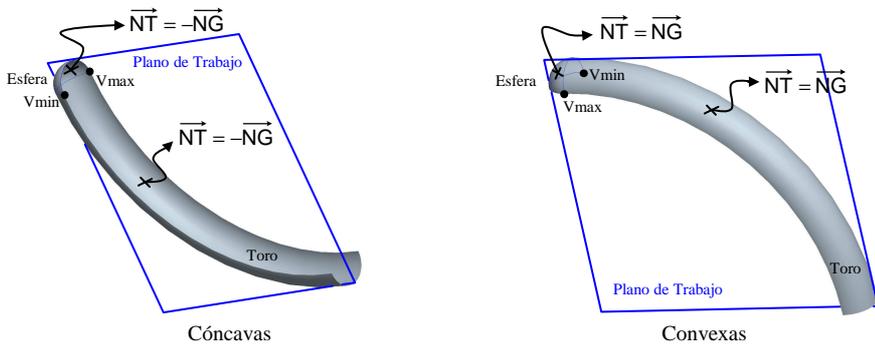


Figura 5-27. Tórica y esférica con Plano de Trabajo vertical.

Con cualquier otra combinación de superficies sigue aplicándose el mismo criterio, sólo cuando la parte a considerar es el interior ($\vec{NT} = -\vec{NG}$) en ambas superficies se estará ante una relación de concavidad, Figura 5-28.

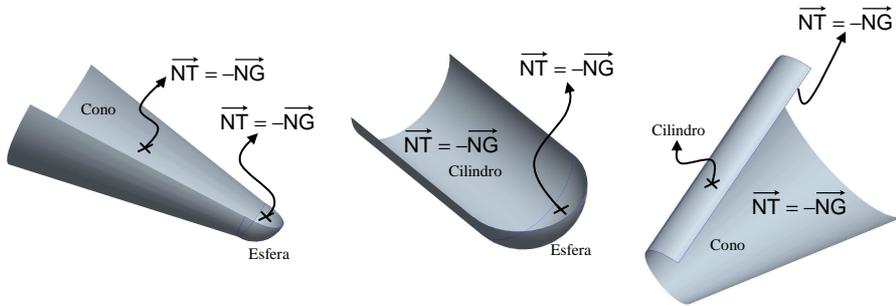


Figura 5-28. Ejemplos de concavidad entre superficie esférica, cilíndrica y cónica.

Cuando es la parte exterior de las superficies la que interesa ($\vec{NT} = \vec{NG}$), en una o en las dos, la relación entre ellas será de convexidad, Figura 5-29.

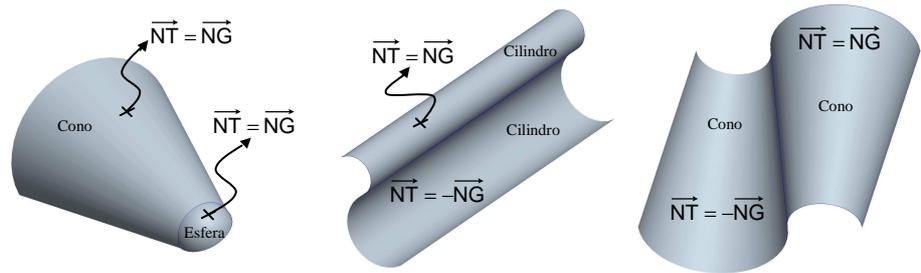


Figura 5-29. Relación de convexidad entre superficies.

Debe recordarse que ambas superficies pueden ser del mismo tipo, cilíndrica-cilíndrica o cónica-cónica, y no tener las mismas características (por ejemplo, tener distinto radio, distinto ángulo de conicidad, etc.), pues de lo contrario se tratan las dos superficies como si fueran una sola. En la Figura 5-30 (a) se muestran dos superficies cilíndricas con distinto radio que mantienen una relación de concavidad (interesa el interior de ellas). En la Figura 5-30 (b) se distinguen dos conos con distintos radio, con ejes paralelos y mismo semiángulo, que mantienen una relación de convexidad, al ser el exterior de las superficies la parte relevante.

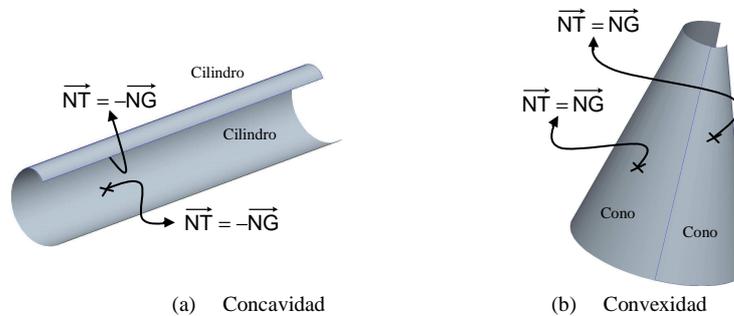


Figura 5-30. Superficies del mismo tipo pero de distintas características.

4.2. Concavidad/convexidad entre aristas

Otro concepto importante para la metodología presentada, es la relación de concavidad/convexidad entre las aristas consecutivas que delimitan o recortan una superficie, tanto externa como internamente. Esta relación permite realizar un primer análisis de las superficies procedentes del modelo B-Rep de la pieza. Con él se identifican las superficies potencialmente problemáticas, que serán aquellas que pueden impedir la utilización de una única operación de mecanizado para generar la Zona que las contiene.

En la Figura 5-31 (a) se muestra un ejemplo sobre el que se apoyarán el resto de explicaciones. Aunque en el ejemplo la superficie es una cara plana, la sistemática seguida es aplicable a cualquier tipo de superficie regular. Para facilitar el tratamiento de las superficies no planas, se trabaja con el plano definido por sus parámetros 'U' y 'V'.

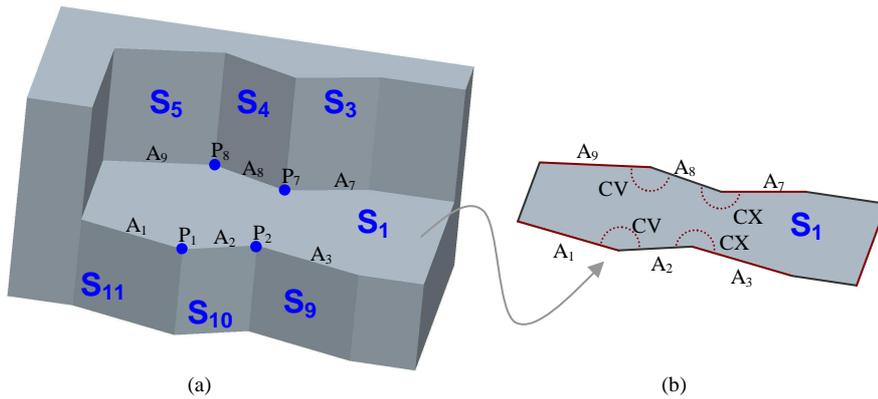


Figura 5-31. Relación de concavidad/convexidad entre aristas.

En la Figura 5-31 (b), aparece representada la superficie 'S₁', en cuyo ciclo exterior de aristas se aprecia una relación de convexidad entre las aristas 'A₇' y 'A₈', y entre las aristas 'A₂' y 'A₃', mientras que se da una relación de concavidad entre las aristas 'A₈' y 'A₉', y las aristas 'A₁' y 'A₂', entre otras.

Ante estas situaciones se observan dos comportamientos, uno con una correspondencia directa en la relación entre las aristas y las superficies, y otro con una correspondencia cruzada:

- Correspondencia directa. Si se observan las superficies ligadas a las aristas 'A₇' y 'A₈', concretamente 'S₃' y 'S₄', se comprueba que la relación entre ambas superficies también es de convexidad. La misma consideración puede hacerse con las superficies 'S₄' y 'S₅', ligadas a las aristas 'A₈' y 'A₉', que mantienen una relación de concavidad.
- Correspondencia cruzada. Sin embargo, si se observan las aristas 'A₁' y 'A₂', que poseen una relación de concavidad, las superficies ligadas a ellas, 'S₁₁' y 'S₁₀', son convexas entre si. También se observa un comportamiento cruzado al considerar las aristas 'A₂' y 'A₃', convexas entre si, ya que las superficies a ellas ligadas, 'S₁₀' y 'S₉', son cóncavas.

Se puede establecer una correspondencia entre la concavidad/convexidad en aristas consecutivas, y la relación de concavidad/convexidad entre las superficies a ellas ligadas. Para ello se introduce la relación de concavidad/convexidad entre la superficie, a cuyo ciclo pertenecen las aristas tratadas ('S₁' en los ejemplos), y el resto de superficies consideradas. Con ello se observa que en la 'correspondencia directa' las superficies ligadas a las aristas 'S₃', 'S₄' y 'S₅', son todas cóncavas con la superficie 'S₁'. Por el contrario, en la 'correspondencia cruzada' las superficies ligadas a las aristas 'S₉', 'S₁₀' y 'S₁₁', son todas convexas con la superficie 'S₁'.

El razonamiento expuesto se cumple siempre que al punto de unión entre las aristas consideradas, lleguen sólo tres aristas, como se observa en los puntos 'P₇' y 'P₈' de la Figura 5-31 (a). Pueden existir geometrías, como la mostrada en la Figura 5-32, en las que convergen cuatro o más aristas en un mismo punto, no existiendo

una relación de vecindad directa entre las superficies ligadas a las aristas implicadas, 'S₃' y 'S₄' en ejemplo.

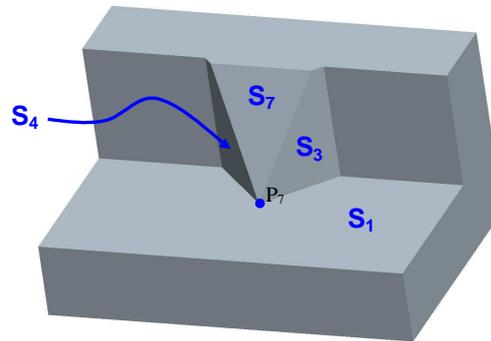


Figura 5-32. Convergencia en un mismo vértice de más de tres aristas.

Las situaciones, como las mostradas en la Figura 5-32, no resultan problemáticas, ya que:

- Inicialmente se obtendría una la relación de convexidad a través de las aristas de 'S₁' que confluyen en el punto 'P₇', relacionando a 'S₃' y 'S₄', cuando no deberían estar relacionadas, ya que por el medio se encuentra 'S₇'. Pero, la obtención de la concavidad/convexidad a través de aristas sirve para realizar una primera clasificación de superficies con un criterio local, que deberá ratificarse con la obtención de la verdadera relación de concavidad/convexidad teniendo en cuenta a todas las superficies de la pieza, en cuyo caso se detectarán y corregirán estas singularidades.
- Las superficies implicadas ('S₁', 'S₃', 'S₄' y 'S₇') no estarán en la misma Zona de Mecanizado, por lo tanto, serán tratadas por separado, como más adelante se podrá comprobar, una vez explicada la forma de obtener las Zonas/Volúmenes de Mecanizado.

En los ejemplos mostrados se manejan ciclos con aristas tipo 'línea', pero también se aplica el criterio a las aristas tipo 'curva', y por supuesto, a las combinaciones, sin excluir la tangencia entre aristas, que indicará la existencia a su vez de tangencia entre las superficies a ellas ligadas. La relación de concavidad/convexidad obtenida a través de las aristas, debe coincidir con la obtenida a través de las superficies vecinas ligadas a ellas, sin descartar relaciones de tangencia entre superficies.

De forma similar a lo que ocurre con las superficies, se encuentran ciertos problemas para distinguir concavidad/convexidad entre aristas cuando existe una relación de tangencia.

4.2.1. Concavidad/convexidad entre aristas no tangentes

Pertencen a este caso cualquier par de aristas (de igual o distinto tipo), que no sean tangentes entre si y con un punto en común. Para generalizar el criterio y tratar

de la misma forma a las aristas tipo línea y tipo círculo, se trabajará con las tangentes topológicas a las aristas, calculadas en su punto en común.

Tomando como referencia a la tangente topológica de la primera de las dos aristas, $\overrightarrow{TT1}$, según el sentido de recorrido del ciclo, se calcula mediante el producto escalar ($\overrightarrow{TT1} \cdot \overrightarrow{TT2}$) el ángulo (α) entre ella, y la tangente topológica de la segunda arista, si:

- $0^\circ < \alpha < 180^\circ$, mantienen una relación de concavidad.
- $180^\circ < \alpha < 360^\circ$, mantienen una relación de convexidad.

Notar que los intervalos están acotados con menores estrictos, ya que los valores de 180° y 360° sólo se presentan cuando las aristas son tangentes.

Pueden verse unos ejemplos en la Figura 5-33, donde se han representado las aristas (azul), su sentido topológico (verde), y sus tangentes topológicas (rojo). La zona rallada indica la parte interior de la superficie que contiene a las aristas, y a la que éstas delimitan. Como se puede observar, para interpretar la relación entre las aristas el observador debe situarse en la zona rayada.

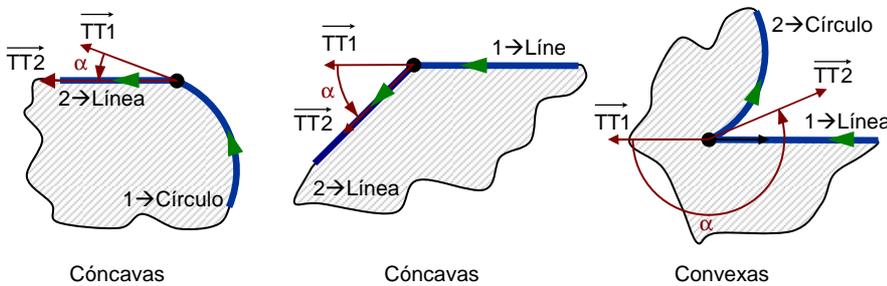


Figura 5-33. Concavidad/convexidad entre aristas no tangentes entre si.

4.2.2. Concavidad/convexidad entre aristas tangentes

Cuando las dos aristas son tangentes, el razonamiento es similar al seguido en las superficies, con la particularidad de contar, en este caso, con dos tipos de aristas: líneas y círculos (arcos de circunferencia).

Al igual que con las superficies, también pueden presentarse situaciones en las que se tengan dos líneas tangentes o dos círculos tangentes con el mismo radio. En estos casos se trata de la misma entidad, una única línea o un único círculo respectivamente, que deben tomarse como una sola entidad geométrica, comprobándose la relación de concavidad/convexidad con las otras aristas vecinas, no entre ellas.

El criterio a seguir es:

- Si una de las dos aristas es curva, bastará con comparar en ella el sentido de las normales. Si la normal topológica (\overrightarrow{NT}) tiene distinto

sentido a la geométrica (\overrightarrow{NG}) se trata de aristas cóncavas, si tienen el mismo sentido, son convexas. Ver Figura 5–34.

- Si ambas aristas son curvas, serán cóncavas cuando se cumple, en cada una de ellas por separado, que la normal topológica (\overrightarrow{NT}) tiene sentido contrario a la normal geométrica (\overrightarrow{NG}). En cualquier otro caso, serán convexas. Ver Figura 5–35.

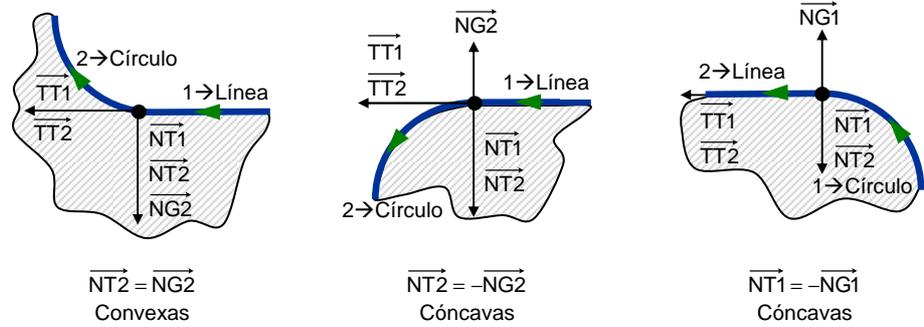


Figura 5–34 Concavidad/convexidad entre aristas tangentes de distinto tipo.

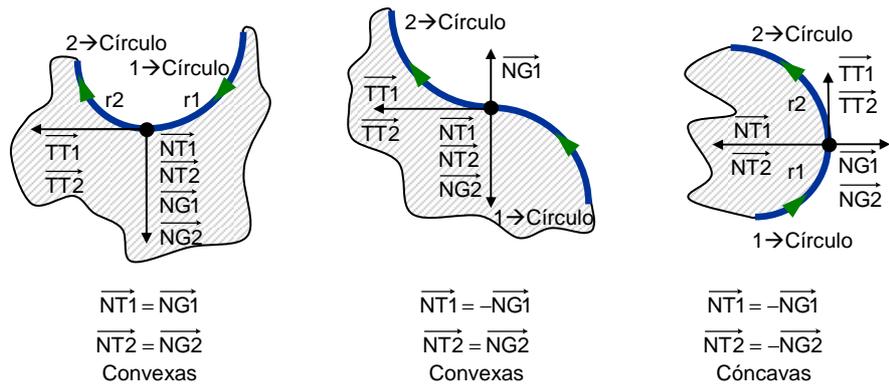


Figura 5–35. Concavidad/convexidad en aristas curvas tangentes.

4.3. Concepto de ‘vecindad cóncava’ entre superficies

Vista la relación de concavidad/convexidad entre superficies con una arista o tramo en común, se dice que dos superficies, la superficie investigada y una segunda superficie, son vecinas cóncavas si es ésta la relación existente entre ellas. También

se relacionan por concavidad, sin tener tramo en común, cuando a partir de cualquiera de ellas se alcanza a la otra a través de relaciones de concavidad con superficies intermedias, con las que si existe arista en común. Por tanto, tomando una superficie como investigada ('semilla'), cualquier otra superficie cóncava con ella será:

- *Vecina cóncava de primer orden.* Si tiene un tramo en común con la superficie investigada y es cóncava con ella.

- *Vecina cóncava de n-orden.* Si tiene un tramo en común con alguna vecina cóncava de (n-1) orden y mantiene concavidad con ella. Es decir, a través de relaciones de concavidad se alcanza a una vecina cóncava de primer orden.

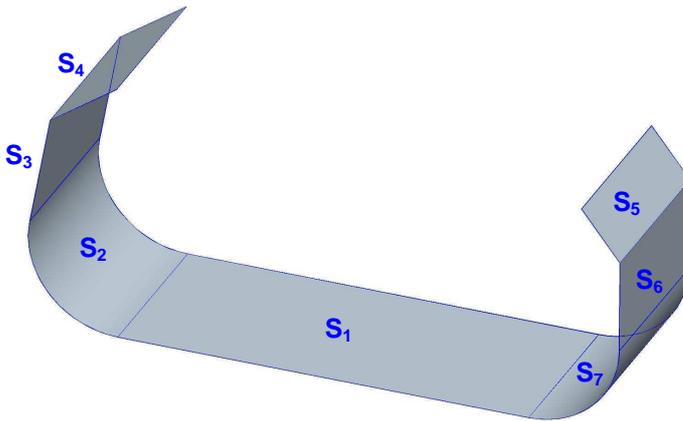


Figura 5-36. Conjunto de vecinas cóncavas entre si.

En la Figura 5-36, si se toma a 'S₁' como superficie investigada, las vecinas cóncavas de primer orden serán, 'S₂' y 'S₇', mientras que las cóncavas de n-orden serán, 'S₃', 'S₄', 'S₅' y 'S₆'.

5. Proceso de obtención de los Volúmenes de Mecanizado

Tal como se definió, un Volumen de Mecanizado se corresponde con el material que debe eliminarse con una operación de mecanizado para generar unas determinadas superficies de la pieza. La unión de todos los Volúmenes de Mecanizado que se encuentren en una pieza forma el Delta-Volumen. Normalmente los Volúmenes de Mecanizado coinciden con las cavidades o huecos existentes en la pieza, como es el caso de los Volúmenes de menor tamaño de la Figura 5-37, pero también se encontrarán aquellos que representan cantidades de material a eliminar al bruto para obtener el exterior de la pieza, como los dos Volúmenes rectangulares de mayor tamaño (Figura 5-37).

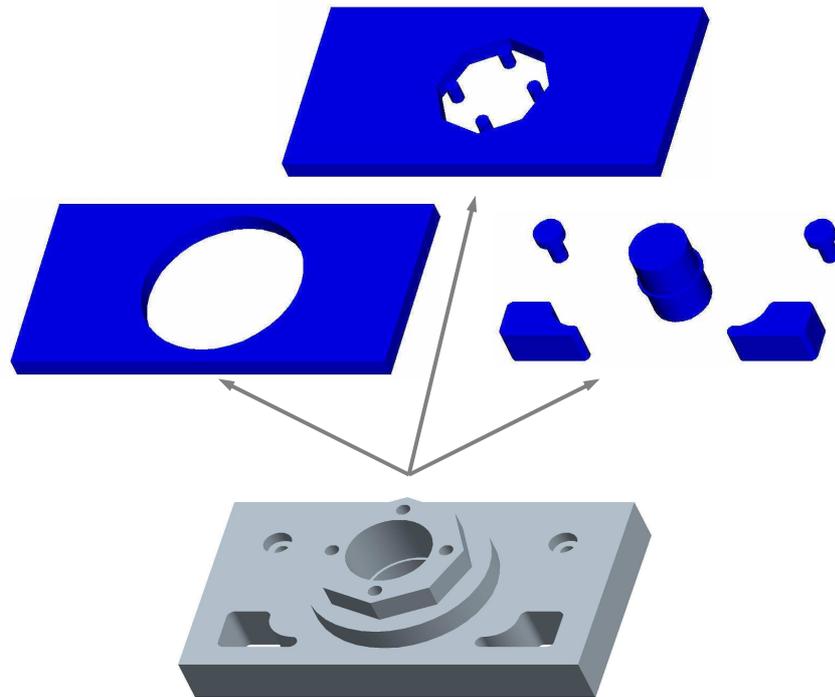


Figura 5-37. Volúmenes de Mecanizado para la pieza 'Demo08'.

Es importante volver a remarcar que las Zonas de Mecanizado se extraen directamente de la pieza. Estas Zonas tienen una relación directa con los Volúmenes de Mecanizado a ellas asociados. Uno de los criterios básicos para determinar las Zona/Volúmenes a eliminar por mecanizado, es la concavidad/convexidad. Así, aquellas superficies de la pieza que mantienen una relación de concavidad forman parte de una misma Zona/Volumen, pues serán generadas con la misma operación de mecanizado.

Atendiendo a este criterio, y a partir del modelo 3D de la pieza, las Zonas/Volúmenes de Mecanizado pueden obtenerse siguiendo un proceso sencillo, como a continuación se expone.

Se toma como 'primera integrante' (investigada) de un Volumen, a una de las superficies del modelo de la pieza que va a ser mecanizada. El resto de superficies del Volumen serán las vecinas cóncavas de la superficie investigada, de primer y enésimo orden. El proceso de obtención de los Volúmenes terminará cuando no queden superficies en la pieza (de las que van a mecanizarse) por incluir en algún Volumen.

Debe recordarse, que las superficies de la pieza que delimitan una Zona de Mecanizado nunca lo cierran por completo, sólo lo definen en parte. Un ejemplo claro, es el de una superficie a mecanizar sin vecinas cóncavas, en cuyo caso, el Volumen al que se asocia la Zona de Mecanizado sólo la contendrá a ella.

Finalizado el proceso de extracción de Volúmenes, se tiene un conjunto de Volúmenes de Mecanizado, tal que, cualquier superficie a mecanizar de la pieza no aparece en más de uno. Además, independientemente de las superficies tomadas como investigadas o 'primeras integrantes', se obtendrá el mismo resultado (solución única).

Sin embargo, el procedimiento empleado no garantiza que todas las superficies pertenecientes a una misma Zona de Mecanizado mantengan exclusivamente relaciones de concavidad, apareciendo superficies convexas dentro de la misma Zona. Esta situación provoca que en ocasiones sea imposible asociar el Volumen a eliminar a una única operación de mecanizado. Para tratar y evitar esta situación se pueden seguir dos caminos:

- Excluir las superficies que sean convexas a cualquiera de las integrantes de la Zona/Volumen. En este caso la solución dejará de ser única, y en función de las superficies de inicio se obtendrá una solución u otra, ya que dependiendo del orden de inclusión se admitirán o rechazarán el resto de superficies. Además, existirán superficies incluidas en más de un Volumen a la vez, ya que al haber excluido a las superficies convexas, éstas entrarán a formar parte de otros Volúmenes, y será precisamente a partir de ellas cuando se vuelvan a alcanzar por concavidad superficies pertenecientes al Volumen inicial.
- Mantener estas superficies convexas en la Zona/Volumen. En este caso se deberá descomponer a la Zona/Volumen inicial, que se denomina 'padre', en Zonas/Volúmenes básicos, en los que se pueda establecer una asociación con una operación. Para ello, se tendrán que identificar ciertas convexidades en el interior de las Zonas/Volúmenes que permitan descomponerlos en subvolúmenes, donde éstas no aparezcan.

La segunda opción es la elegida para determinar las Zonas de Mecanizado. Para resolver el problema comentado (la imposibilidad de asociar el Volumen a una única operación de mecanizado) y establecer cuando el Volumen padre debe descomponerse en Volúmenes básicos, se han estudiado distintas geometrías, observando que el origen del problema se encuentra en la presencia de salientes de material, 'protusiones'.

Una 'protusión' es un saliente (sólido) de material, formado por un conjunto de superficies que se encuentran incluidas en una Zona/Volumen de Mecanizado. El saliente puede encontrarse directamente en un recorte interno de una de las superficies de la Zona, o estar formado por la unión de dos o más superficies de la Zona con transición convexa. En cualquiera de los casos, el saliente (protrusión) está incluido en la Zona de Mecanizado.

5.1. Tipos de salientes de material contenidos en una Zona de Mecanizado

Desde un punto de vista geométrico, un saliente o 'protusión' se presenta cuando existe convexidad en los tramos/aristas del recorte en una superficie, que son a su vez enlace con superficies vecinas cóncavas a la superficie del recorte. Esta

disposición provoca que las superficies implicadas formen un saliente de material con respecto al resto de superficies que contiene el recorte, situado en el interior de un Volumen/Zona de Mecanizado.

Atendiendo a la definición geométrica dada, se distinguen los siguientes tipos de protusión: una 'Protusión no compartida', que afecta exclusivamente a un recorte (externo o interno) de una superficie, y una 'Protusión compartida', en la que el saliente de material relaciona a dos o más superficies. A continuación se detalla cada uno de los tipos.

'Protusión no compartida'. Se distinguen dos tipos, según su situación:

1.- En un recorte interior a la superficie (Figura 5-38 (a)). Esta situación permite encontrar correspondencia entre el Volumen y una operación de mecanizado.

2.- En el recorte exterior de la superficie (Figura 5-38 (b)). Ante esta situación lo normal es encontrar una correspondencia entre el Volumen de Mecanizado y una operación conocida, aunque existen situaciones en las que no es posible.

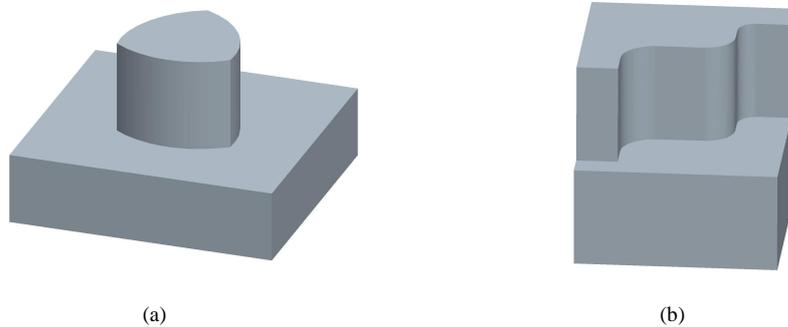


Figura 5-38. Ejemplo de 'protusiones no compartidas'.

'Protusión' compartida'. Según las superficies que la comparten se diferencia entre:

1.- Compartida entre superficies sin relación de vecindad directa y que, por tanto, sólo son alcanzables entre sí a través de la 'protusión' que comparten (Figura 5-39 (a)). En ocasiones es posible encontrar correspondencia entre Volumen y operación conocida.

2.- Compartida entre superficies vecinas cóncavas (Figura 5-39 (b)) ó entre superficies sin relación de vecindad directa y alcanzables entre sí a través de otras superficies, distintas a las de la 'protusión' que comparten (Figura 5-39 (c)). En esta situación nunca se encontrará una operación de mecanizado capaz de eliminar el Volumen por completo, ya que existe una unión entre ellas sólo evitable con un cambio en el Plano de Trabajo.

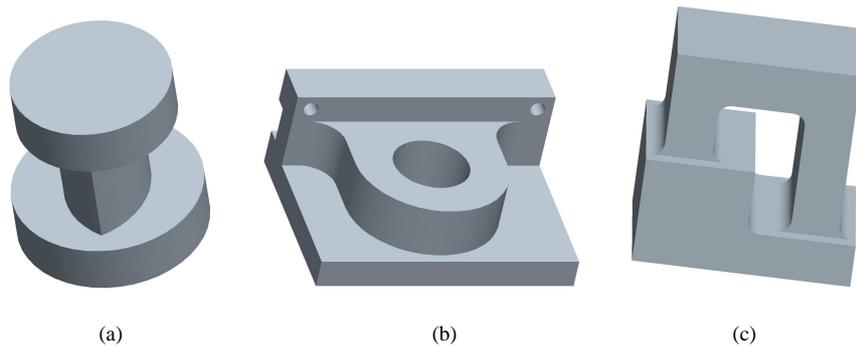


Figura 5–39. Ejemplo de 'protusiones compartidas'.

Para los ejemplos de la Figura 5–38 y la Figura 5–39, se han elegido geometrías sencillas donde se muestra, casi exclusivamente, el tipo de protusión tratado. De forma general, en las piezas aparecen protusiones con geometrías más complejas, pero en cualquier caso, según el tipo de relación entre las superficies de la protusión y el resto de la Zona de Mecanizado, pueden ser clasificadas en los casos explicados.

Debe tenerse en cuenta la existencia de variaciones que dificultan su clasificación, como es el caso de protusiones dentro de otras protusiones, combinaciones de protusiones, o particularizaciones de las existentes (por ejemplo una protusión que sea compartida entre 3, 4 ó más superficies). Este tipo de variaciones son poco frecuentes, ya que debe existir un camino que permita pasar de una superficie a otra a través de una relación de concavidad, sea en el orden que sea, sin dejar fuera a ninguna de las superficies del Volumen. En caso de no existir este camino, se estará ante más de un Volumen, repartiéndose las protusiones entre los distintos Volúmenes o incluso desapareciendo.

La existencia de protusiones puede dar lugar a la imposibilidad de mecanizar el Volumen con una sola operación, y por tanto de generar la Zona de Mecanizado de forma continua. Esto provocará que el Elemento Característico de Mecanizado que contenga a ese Volumen no sea viable. El motivo de esta imposibilidad es la existencia de convexidades entre sus superficies integrantes, sin embargo, si podrá encontrarse, en la mayoría de casos, un conjunto de operaciones que lo consigan. De ser cierto este último supuesto, alguna de las superficies quedará mecanizada a través de dos o más operaciones, presentando unas "marcas" finales, resultado de esa generación discontinua.

Para encontrar el conjunto de operaciones necesarias para un Volumen, éste deberá ser descompuesto en subvolúmenes, que permitan establecer la correspondencia "Subvolumen ↔ Operación de mecanizado". Los Volúmenes (subvolúmenes) resultado de esta descomposición se corresponden con los Volúmenes básicos. Un Volumen básico puede verse como un Volumen que, a falta de otras consideraciones (por ejemplo, asignar forma de herramienta y verificar acceso), puede eliminarse de una forma continua, con una única operación (sin cambiar de Plano de Trabajo, ni reorientar la herramienta).

5.2. Algoritmo propuesto para determinar los Volúmenes básicos

La existencia de 'protusiones' no siempre implica que el Volumen no pueda ser eliminado con una única operación de mecanizado. Aún así, ante una protusión incluida en un Volumen padre se procederá a descomponerlo en unos Volúmenes básicos, que dejen preparadas las distintas opciones. En pasos posteriores del reconocimiento de los Elementos Característicos de Mecanizado, se determinará si puede o no ser eliminado en una sola operación.

Debe recordarse que siempre es preferible aquel Volumen, que siendo asociable a una operación, posea el mayor número de superficies. Al descomponer los Volúmenes lo que se persigue es preparar las distintas opciones posibles de mecanizado. Para elegir la opción adecuada hará falta la información y comprobación del resto de pasos.

La descomposición en Volúmenes básicos se realiza a través de dos etapas. En ambas etapas se incluye una solución denominada de 'máxima descomposición', a ser tomada como último recurso cuando no es válido el resultado en ninguna de las anteriores. En la 'máxima descomposición' se construyen los Volúmenes sin recorrer a aquellas superficies que dan paso a cualquier tipo de protusión.

Las etapas son:

- Una primera, donde se buscan aquellos Volúmenes que contienen una 'protusión compartida entre superficies vecinas cóncavas', ya que éstos deben descomponerse en posibles soluciones o alternativas por no poderse asignar una única operación al Volumen inicial o padre. Las soluciones que en esta etapa se encuentren para cada Volumen padre son aditivas, es decir, se necesitan todas ellas para cubrir por completo al Volumen padre, exceptuando a la de 'máxima descomposición' que es excluyente y debe tomarse como último recurso. Viendo cada Volumen como los nodos de un árbol lógico, se necesitará una composición 'AND' con todos para completar al Volumen padre, salvo con la de 'máxima descomposición' cuya relación es de 'OR' con las anteriores.
- Una segunda etapa, donde se recorren todos los Volúmenes, los padres (iniciales) y los procedentes de la primera etapa, en busca de 'protusiones no compartidas' y 'protusiones compartidas' sólo del primer tipo, para realizar nuevas descomposiciones. En este caso las descomposiciones obtenidas serán excluyentes, se deberá optar por una u otra, ya que cada una de ellas cubre completamente al Volumen de comienzo (padre o procedente de la etapa anterior). En cualquier caso, sigue siendo excluyente la solución de 'máxima descomposición', que también completa al padre.

Antes de explicar con más detalle las descomposiciones propuestas, es necesario definir dos tipos de superficies que indican presencia de protusión:

Conflictivas Mayores. Son aquellas superficies que dan paso a una 'protusión compartida' del segundo tipo: "protusión compartida entre vecinas cóncavas o entre superficies sin relación de vecindad directa y alcanzables entre si a través de otras

superficies”.

Conflictivas Menores. Son aquellas superficies que dan paso a una ‘protusión no compartida’ o a una ‘protusión compartida’ del primer tipo: “compartida entre superficies sin relación de vecindad directa y que sólo son alcanzables entre sí a través de la ‘protusión’ que comparten”.

La clasificación en Conflictivas Mayores, Menores y resto de superficies, se realiza a partir de una primera etapa en la que, de forma local a cada superficie, se buscan convexidades entre las aristas de sus recortes. Las superficies que presentan convexidad en el recorte externo serán candidatas a ser clasificadas como Conflictivas Mayores, mientras que aquellas en las que la convexidad se presenta en un recorte interno lo serán como Conflictivas Menores.

Posteriormente se efectúa un análisis más exhaustivo, controlando las relaciones con, y entre, el resto de superficies de la Zona de Mecanizado, clasificándolas a medida que se comprueba si cumplen con la definición de cada tipo de protusión. Se presta especial atención a aquellas superficies con convexidades en un recorte interno y que pueden dar paso a una: ‘protusión compartida entre superficies sin relación de vecindad directa y alcanzables entre si a través de otras superficies’, ya que en estos casos se tratará de Conflictivas Mayores.

Puede darse el caso, que una superficie clasificada como candidata a conflictiva en la primera etapa, termine no siéndolo tras comprobar la relación con el resto de superficies. Lo que se está haciendo es ratificar o anular el resultado del análisis “local” llevado a cabo a través de las propias aristas de cada superficie, el que permitió establecer una primera separación de las superficies conflictivas.

En la Figura 5–40 puede verse el diagrama de flujo en el que se muestra la sistemática seguida. Como se ha comentado, se generan Volúmenes básicos a partir de la descomposición de los Volúmenes padre en dos etapas: ‘Primera descomposición’ y ‘Segunda descomposición’.

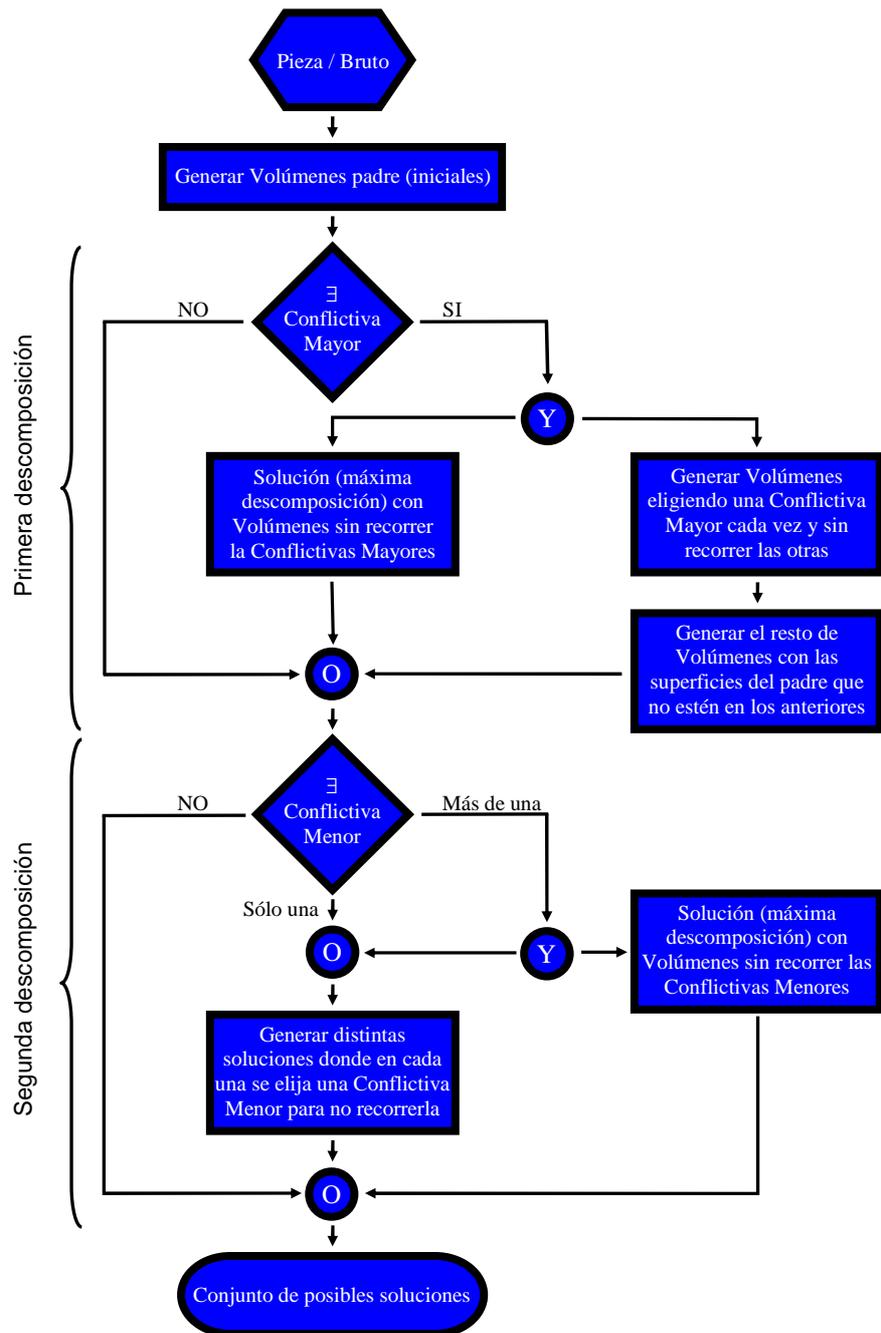


Figura 5-40. Algoritmo para la generación de Volúmenes básicos.

Primera descomposición.

Esta descomposición se va a llevar a cabo para todos y cada uno de los Volúmenes iniciales (padre).

Cada Volumen padre representa la primera solución teórica: 'un sólo Volumen'. Se comprueba si contiene superficies Conflictivas Mayores, de ser así, se descompondrá en distintos Volúmenes, uno por cada Conflictiva Mayor existente, descartando aquellos Volúmenes repetidos.

La descomposición realizada tras detectar Conflictivas Mayores, no es más que la construcción de nuevos Volúmenes siguiendo el principio de concavidad entre superficies. Se empieza con una de las Conflictivas Mayores, incluyendo también a las superficies vecinas cóncavas directas, así como, a cualquier otra superficie vecina cóncava de orden 'n'.

Se tratan de forma diferente las Conflictivas Mayores distintas a la que desencadenó el Volumen, que serán incluidas, pero no recorridas, en busca de vecinas cóncavas.

Generados los Volúmenes procedentes de las Conflictivas Mayores, posiblemente falte añadir algún Volumen más para completar al Volumen padre. Estos Volúmenes serán el resultado de aplicar el principio de concavidad entre las superficies del Volumen padre, que no se encuentran en ninguno de los Volúmenes procedentes de las Conflictivas Mayores. Se terminará la generación de Volúmenes cuando no quede ninguna superficie del padre por incluir.

Durante esta primera descomposición se añade una solución alternativa e independiente del resto, la de 'máxima descomposición', en la que se irán construyendo los distintos Volúmenes, tomando las superficies del Volumen padre y aplicando el principio de concavidad, sin recorrer, en busca de vecinas cóncavas a añadir al Volumen, a ninguna de las Conflictivas Mayores.

Segunda descomposición.

La segunda descomposición actúa sobre cualquier Volumen procedente de la primera descomposición que incluya a una 'protusión no compartida', a una 'protusión compartida' del primer tipo, y sobre cualquier Volumen padre que no se haya descompuesto anteriormente y que incluya a cualquiera de las otras 'protusiones'.

Un Volumen a descomponer dará lugar a distintas soluciones excluyentes entre sí, de hecho, cada solución cubre por sí sola al Volumen padre. Además cada solución está formada por más de un Volumen.

En cada solución por separado, se encuentran los Volúmenes resultado de aplicar el principio de concavidad entre las superficies del padre, pero sin recorrer a una de las Conflictivas Menores. Se termina cuando no queden superficies del Volumen padre por asignar. El proceso se repite hasta haber seleccionado, una a una, todas las superficies Conflictivas Menores.

Al igual que se hizo en la primera descomposición, se añade una solución alternativa, la de 'máxima descomposición'. En ella se construyen los distintos Volúmenes, tomando las superficies del Volumen padre y aplicando el principio de concavidad, sin recorrer en busca de vecinas cóncavas que añadir al Volumen, a ninguna de las Conflictivas Menores.

Debido al procedimiento seguido en la generación de las distintas soluciones, se advierte que pueden existir Volúmenes repetidos, lo cual es lógico, si se recuerda que las soluciones son excluyentes y deben cubrir al Volumen padre.

Terminadas las descomposiciones, lo normal es que las superficies Conflictivas Mayores o Menores que se encuentren en los Volúmenes deban partirse dejando un trozo en cada uno de los Volúmenes donde aparecen. La forma de partirlas no es única y será realizada durante la etapa de búsqueda/construcción de la herramienta válida para el Volumen. Un aspecto importante es comprobar que se ha mecanizado por completo cada una de las superficies partidas.

La diferencia entre la 'primera descomposición' y la 'segunda descomposición' obedece principalmente a una razón: *no cambiar de Plano de Trabajo para que pueda asociarse a una única operación.*

En la 'primera descomposición', la existencia de 'protusiones compartidas' entre vecinas cóncavas implica obligatoriamente un cambio en el Plano de Trabajo. Para evitar este cambio, en la descomposición en Volúmenes básicos se recorre cada vez una única Conflictiva Mayor en busca de vecinas cóncavas, debiéndose partir el resto de superficies Conflictivas Mayores.

El resto de protusiones tratadas en la 'Segunda descomposición', no implican necesariamente un cambio en el Plano de Trabajo, por lo tanto, la filosofía es distinta. Se van recorriendo todas las Conflictivas Menores menos una, intentando de esta forma, aislar aquella Conflictiva Menor causante de problemas, y favoreciendo la obtención de Volúmenes básicos con el mayor número posible de superficies (Volúmenes con el mayor tamaño posible).

Al trabajar según el algoritmo de la Figura 5-40, cuyas superficies decisivas son las Conflictivas Mayores y Conflictivas Menores, se tratan todas las protusiones que pudieran existir en un Volumen, independientemente de su complejidad geométrica y de como estén dispuestas.

5.3. Obtención de Volúmenes básicos, ejemplos

Las protusiones o salientes que pueden encontrarse en una pieza, van a tener diversas formas y tamaños. La característica común a todas ellas es el tipo de relación que establecen con las distintas superficies que forman parte del Volumen de Mecanizado, tal como se ha caracterizado y explicado.

Puesto que la complejidad geométrica de la pieza no influye en el resultado obtenido siguiendo el proceso de obtención de Volúmenes, ni en la descomposición en Volúmenes básicos, sólo influye en la cantidad total de Volúmenes obtenidos, se van a utilizar como ejemplos las piezas de la Figura 5-38 y Figura 5-39 donde aparece cada protusión de forma aislada.

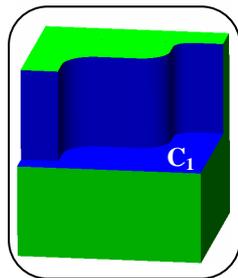
A continuación se muestran los ejemplos separándolos en función del tipo de protusión que contienen:

- Protusión no compartida, situada en el recorte exterior de una superficie.

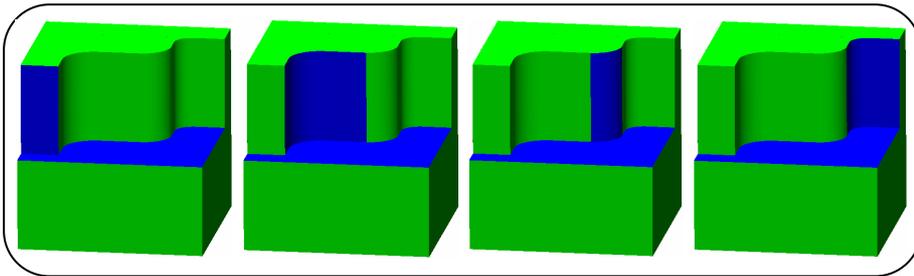
Normalmente, un Volumen que contenga una protusión de este tipo puede eliminarse con una única operación de mecanizado. Aún así, existen casos en los que

esto no se cumple. Ante cualquier situación, y siguiendo con la metodología planteada, se realiza la descomposición del Volumen preparando las distintas soluciones. Se optará por una u otra, según se detecte la imposibilidad de asociación a una única operación. Comprobar la asociación "Volumen <--> operación de mecanizado" se lleva a cabo en el resto de pasos del proceso de reconocimiento.

En la pieza de la Figura 5-41 (a), la superficie/cara etiquetada como 'C₁' contiene una protusión en su recorte exterior, provocada por una Conflictiva Menor. Ante una Conflictiva Menor, el algoritmo propuesto genera dos soluciones excluyentes entre si. Una primera formada por el Volumen padre, Figura 5-41 (a), y una segunda formada por cuatro Volúmenes, Figura 5-41 (b), donde se tendrá que buscar una operación de mecanizado para cada uno capaz de generar la superficie "pared", en azul, junto con la parte correspondiente de la superficie 'C₁'.



(a)



(b)

Figura 5-41. Descomposición ante protusión no compartida en el recorte exterior.

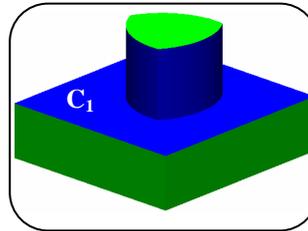
Suponiendo que el Volumen va a ser eliminado por fresado frontal, proceso tipo 'Fresado', tanto el Volumen padre como la descomposición propuesta tienen solución, utilizando una herramienta con el eje normal a 'C₁' y radio adecuado, siendo precisamente 'C₁' la superficie sobre la que se efectuará la trayectoria de corte.

Siempre se debe optar por la solución más global, es decir, aquella que implique menos Volúmenes. En este caso corresponde al Volumen padre, Figura 5-41 (a).

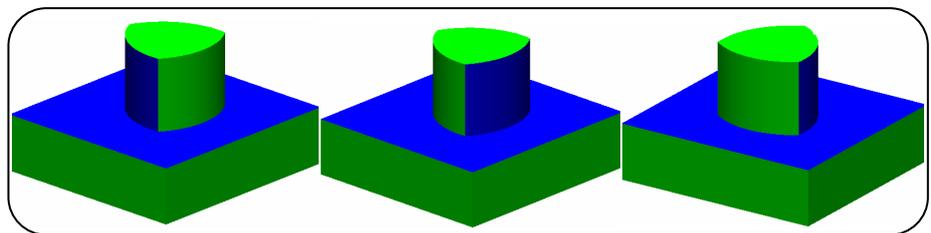
- Protusión no compartida, en el recorte interior de una superficie.

Al igual que en el caso anterior, suele encontrarse solución asociando el Volumen

padre, Figura 5–42 (a), a una única operación de mecanizado. En la Figura 5–42 (a) la cara Conflictiva Menor esta etiquetada como 'C₁'. Sólo hay una, por lo tanto, para la geometría mostrada el algoritmo propuesto realiza la 'máxima descomposición', donde no se recorre la Conflictiva Menor, el resultado se muestra en la Figura 5–42 (b). Se trata de soluciones excluyentes, la (a) o la (b).



(a)



(b)

Figura 5–42. Descomposición ante protusión no compartida en el recorte interior.

Si va a utilizarse un proceso de mecanizado en el que gira la herramienta y gira la pieza, tipo 'Rectificado por revolución', puede observarse que el Volumen padre, Figura 5–42 (a), no puede ser eliminado de una sola vez, ya que la "isla de material" (protusión) está formada por tres superficies cilíndricas con distinto eje. Sin embargo, la descomposición propuesta, Figura 5–42 (b), sí tiene solución bajo este Proceso Tipo, tomando como eje de giro en cada Volumen de la descomposición, al eje de la superficie cilíndrica a generar, marcada en azul en la "isla", y realizando tres operaciones distintas.

- Protusión compartida entre superficies vecinas cóncavas.

Encontrar este tipo de protusión en un Volumen siempre implica no poder asociarlo a una única operación de mecanizado, y es por tanto necesario optar por alguna de las soluciones que formula el algoritmo propuesto en la Figura 5–40.

Ante una protusión de este tipo, existen al menos dos caras que la comparten y que son vecinas cóncavas entre sí, 'C₁' y 'C₂' en el ejemplo mostrado. Estas caras, que pertenecen a las clasificadas como Conflictivas Mayores, obligan a una múltiple descomposición, tomando, en cada caso, a una de ellas como superficie a partir, que aparecerá en todos los Volúmenes de la solución generada.

En la Figura 5–43 (a) se muestra el Volumen padre, primera solución, con las dos

Conflictivas Mayores. Ante este Volumen se obtienen tres posibles soluciones, excluyentes entre si:

- La presentada en la Figura 5-43 (b), donde se obtienen dos Volúmenes, cuya eliminación completará al Volumen padre, debiéndose partir la cara 'C₂' presente en ambos.
- La mostrada en la Figura 5-43 (c), que consta también de dos Volúmenes, pero a diferencia de la solución anterior será la cara 'C₁' la que deberá partirse.
- La tercera solución, Figura 5-43 (d), representa la solución de 'máxima descomposición', donde deberán partirse las dos Conflictivas Mayores existentes.

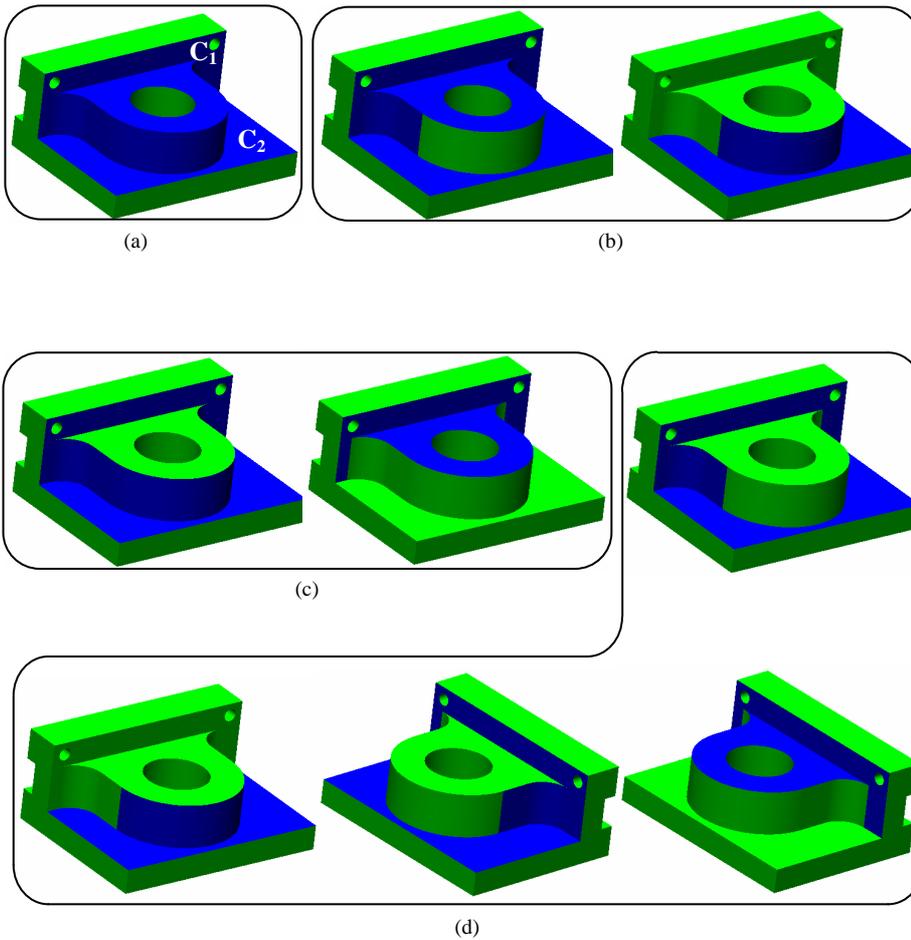


Figura 5-43. Descomposición ante protusión compartida entre vecinas cóncavas.

Por el tipo de geometría de la pieza mostrada en este ejemplo, su mecanizado sólo podrá realizarse con un proceso tipo 'Fresado'.

Al tratarse de una protusión compartida entre vecinas cóncavas, se necesita un cambio de Plano de Trabajo para su mecanizado completo, de ahí que no exista solución para el Volumen padre.

En los dos Volúmenes presentes en la primera descomposición, Figura 5-43 (b), se partirá la superficie 'C₂', siendo sobre la superficie 'C₁' donde se lleve a cabo la trayectoria de corte. En estas condiciones, las distintas transiciones entre las superficies en su primer Volumen (una a 90° y otra con un radio de acuerdo), provocan que no se encuentre una única herramienta que las genere.

La segunda descomposición, Figura 5-43 (c), permite que se eliminen ambos Volúmenes, con una herramienta cilíndrica de punta plana, con eje normal a 'C₂' y radio mínimo, el de la transición circular entre las paredes del primer Volumen. El segundo Volumen no tiene limitación alguna en el radio de la herramienta. La superficie 'C₁' se completa al eliminar los dos Volúmenes.

En la tercera descomposición, Figura 5-43 (d), se encuentra solución con una herramienta similar a la de la segunda descomposición, partiéndose ambas superficies 'C₁' y 'C₂'. Esta opción debe descartarse, ya que existe una válida con menos Volúmenes.

- Protusión compartida entre superficies sin relación de vecindad directa, alcanzables entre si a través de superficies distintas a las de la protusión que comparten, sin importar la existencia de relación de concavidad.

Este tipo de protusiones impide que exista una operación que elimine completamente al Volumen de Mecanizado padre, Figura 5-44 (a). Las descomposiciones propuestas, Figura 5-44 (b), (c) y (d), son excluyentes entre si.

Para el mecanizado de esta pieza puede emplearse un proceso tipo 'Fresado', por ejemplo. La eliminación de los Volúmenes de las descomposiciones, Figura 5-44 (b) y (c), necesita un cambio de Plano de Trabajo para un mecanizado completo de todas las superficies que cada uno incluye (a excepción de las Conflictivas Menores, 'C₁' y 'C₂'), por lo tanto, no se admite como solución.

En lo referente a la solución de 'máxima descomposición', Figura 5-44 (d), puede observarse que con herramientas cilíndricas de punta plana, diámetros adecuados, y eligiendo la orientación del eje de la herramienta apropiada en cada Volumen, si existe solución. Las superficies 'C₁' y 'C₂' quedarán completadas al finalizar todos los Volúmenes. La disposición del eje de la herramienta será paralelo o normal a las Conflictivas Menores, según corresponda.

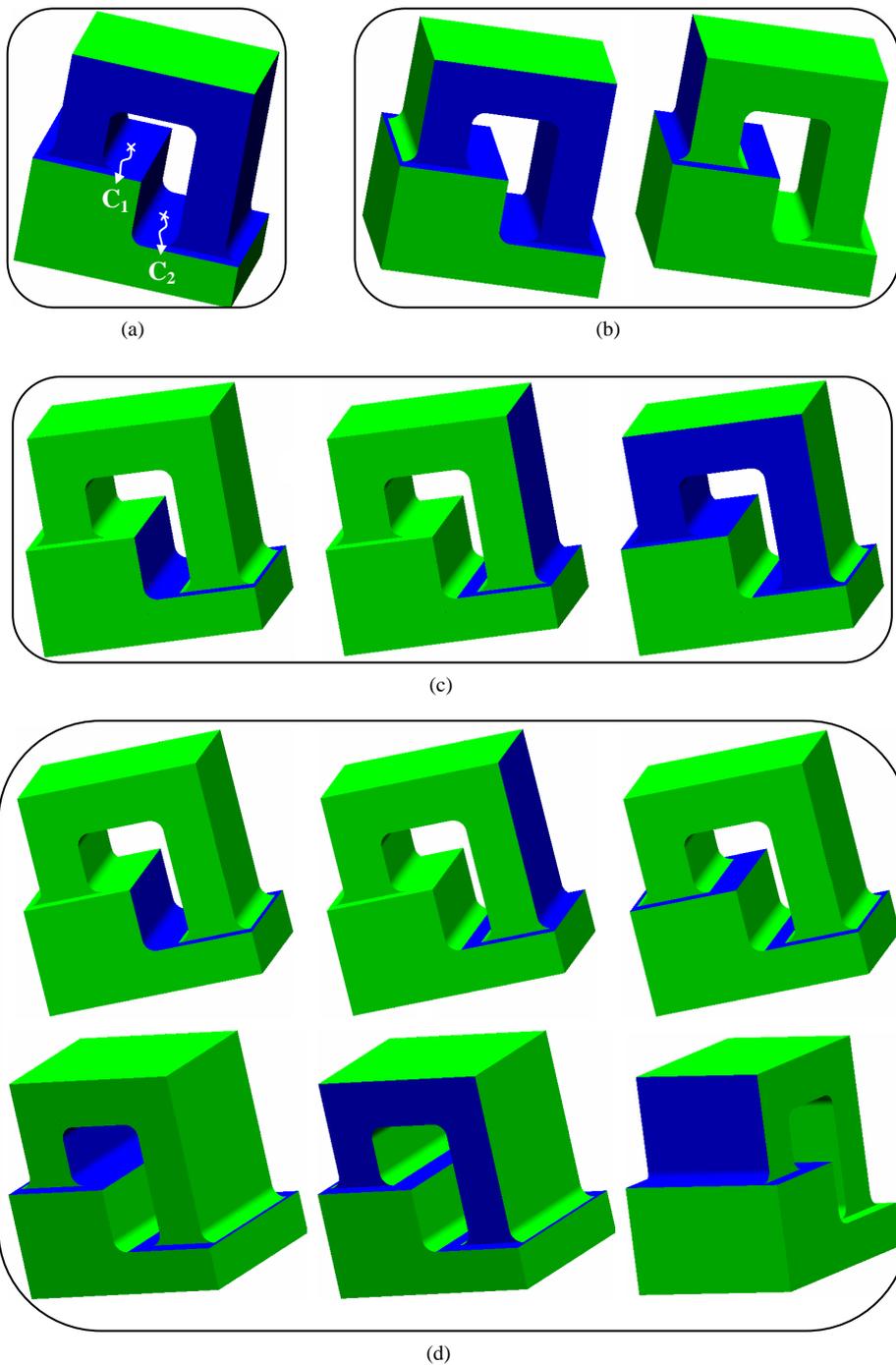


Figura 5-44. Descomposición ante protusión compartida sin vecindad (1^{er} tipo).

- Protusión compartida entre superficies sin relación de vecindad directa, sólo alcanzables entre si a través de la protusión que comparten.

Un Volumen que contenga una protusión con estas características, como el de la Figura 5-45 (a), en ocasiones podrá ser eliminado con una única operación de mecanizado. En caso contrario, las superficies Conflictivas Menores que en él se encuentren deberán partirse, 'C₁' y 'C₂' en el ejemplo.

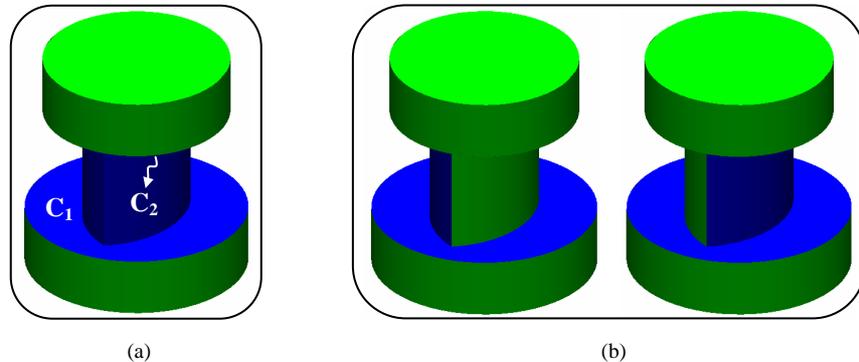


Figura 5-45. Descomposición ante protusión compartida sin vecindad (2º tipo).

Pensando en un mecanizado de la pieza ejemplo en el torno, perteneciente al grupo de procesos tipo 'Torneado', puede concluirse que se necesitarán dos operaciones de mecanizado distintas para eliminar al Volumen padre, Figura 5-45 (a), debido a la geometría de la protusión, formada por dos superficies cilíndricas con distinto eje. Por lo tanto, no habrá solución válida para el padre.

En la única descomposición que se genera, Figura 5-45 (b), si se encuentra solución, pues basta con cambiar el eje de revolución de la pieza para la eliminación de cada Volumen, haciéndolo coincidir con el de la superficie cilíndrica que incluye.

En todos los ejemplos mostrados, las distintas descomposiciones son excluyentes entre si. Esta situación cambia si en el Volumen inicial aparece más de una protusión, sean o no del mismo tipo, pues empieza a generarse un 'árbol' de soluciones donde deberá buscarse aquella que minimice el número de Volúmenes a eliminar. Por supuesto la solución puede no ser única, pudiendo aprovechar la estructura en 'árbol' generada y las consideraciones que se deseen, para escoger una u otra. Por ejemplo, consideraciones del tipo, número de superficies que se parten, superficies sobre las que se realiza la trayectoria de mecanizado, minimizar variaciones en la disposición del eje de la herramienta, etc.

5.4. Elección de superficies 'semilla'

Se denomina superficie 'semilla', a aquella superficie que va a ser tomada como base para construir el perfil de la herramienta capaz de eliminar al Volumen que la contiene. Para la construcción del perfil se recorrerán, uno a uno, todos los tramos que delimitan externa e internamente a la superficie 'semilla'.

A su vez, la superficie 'semilla' representa el área por la que se desplazará la herramienta para generar el resto de superficies del Volumen, con la dirección y sentido de la trayectoria elegida. Debido a esta circunstancia, la superficie 'semilla', después del mecanizado, quedará con las irregularidades (marcas) debidas a la trayectoria de corte.

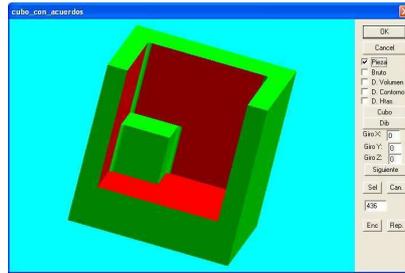
Debe recordarse que cualquier superficie que deba partirse, Conflictiva Mayor o Menor, también presentará unas marcas debidas a las líneas de partición, y de ahí que resulte importante que las 'semillas', en la medida de lo posible, coincidan con las superficies a partir. Lo que se pretende, es que el número de superficies con irregularidades superficiales o marcas sea el menor posible, estableciendo una clara separación entre un mecanizado basado en operaciones y un mecanizado 3D (en el que quedarían afectadas todas las superficies).

La elección de una superficie 'semilla' apropiada, ayuda a reducir el número de superficies dentro de la Zona de Mecanizado que quedarán afectadas. En su elección deberá tenerse en cuenta:

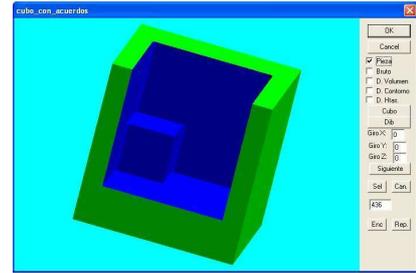
- Siempre que en el Volumen existan superficies a partir, éstas deberán tomarse como superficies 'semilla'. Con ello se minimizan el número de superficies marcadas en un Volumen, bien porque deban partirse, o porque sobre ellas se realice la trayectoria de corte.
- La superficie 'semilla' deberá garantizar que no se cambia de Plano de Trabajo durante la eliminación del Volumen.
- Su elección favorecerá la eliminación continua del resto de superficies de la Zona de Mecanizado.

A partir de los Volúmenes de Mecanizado, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, las superficies 'semilla' en cada Volumen se elegirán atendiendo al siguiente orden:

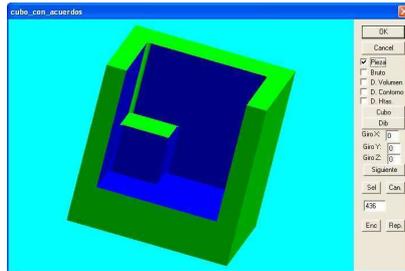
1. Cualquier Volumen que no posea superficies Conflictivas Mayores ni Menores, tendrá como 'semillas' a todas sus superficies.
2. Un Volumen padre con Conflictivas Mayores, independientemente de la existencia o no de Conflictivas Menores, no tendrá 'semillas', ya que no se puede establecer relación entre su eliminación y la utilización de una única operación de mecanizado. Las 'semillas' serán asignadas en los Volúmenes resultado de su descomposición.
3. En un Volumen que no sea padre (resultado de una descomposición) y que posea Conflictivas Mayores, ver Figura 5-46, serán 'semillas' las Conflictivas Mayores y sus vecinas cóncavas directas.
4. En un Volumen que sólo contenga Conflictivas Menores, ver Figura 5-47, serán 'semillas' las Conflictivas Menores y aquellas otras que sean vecinas cóncavas directas a todas las Conflictivas Menores existentes.



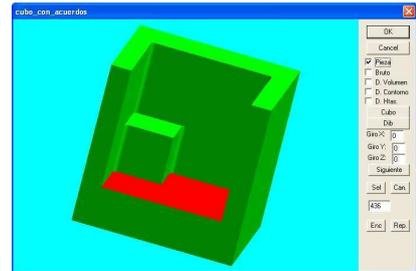
En rojo aparecen las tres Conflictivas Mayores en la pieza



En azul se muestra el Volumen padre 'V4'. Debe ser descompuesto

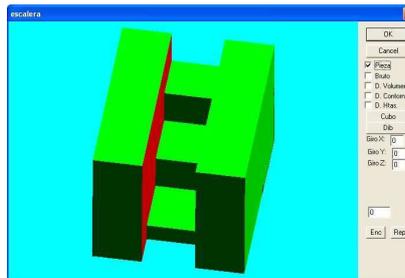


En azul el 'V7', uno de los volúmenes de la primera descomposición

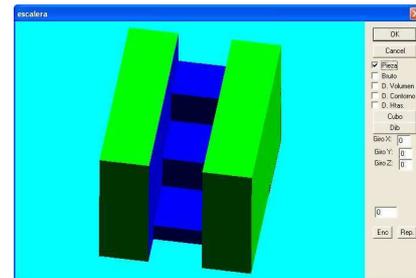


En rojo 'semilla' válida para 'V7', se trata de la Conflictiva Mayor que lo generó

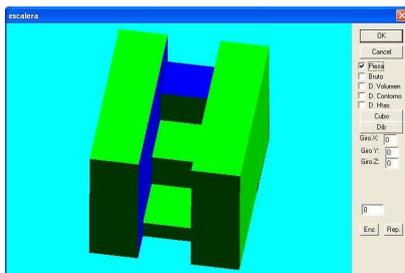
Figura 5-46. Parte de una descomposición ante Conflictivas Mayores.



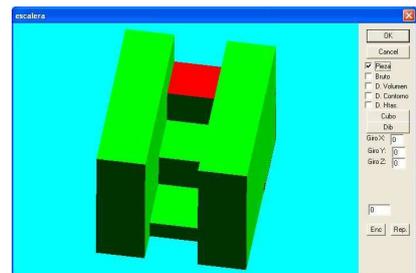
Dos Conflictivas Menores: la de rojo y su opuesta, no visible



En azul aparece todo el volumen padre 'V2'. Debe ser descompuesto



En azul 'V11', uno de los volúmenes de su descomposición. Las C. Menores se parten



En rojo la 'semilla' válida, vecina cóncava directa a las dos C. Menores en 'V11'

Figura 5-47. Descomposición ante Conflictivas Menores.

En la Figura 5-48, se muestra el algoritmo seguido para la elección de la superficie 'semilla'.

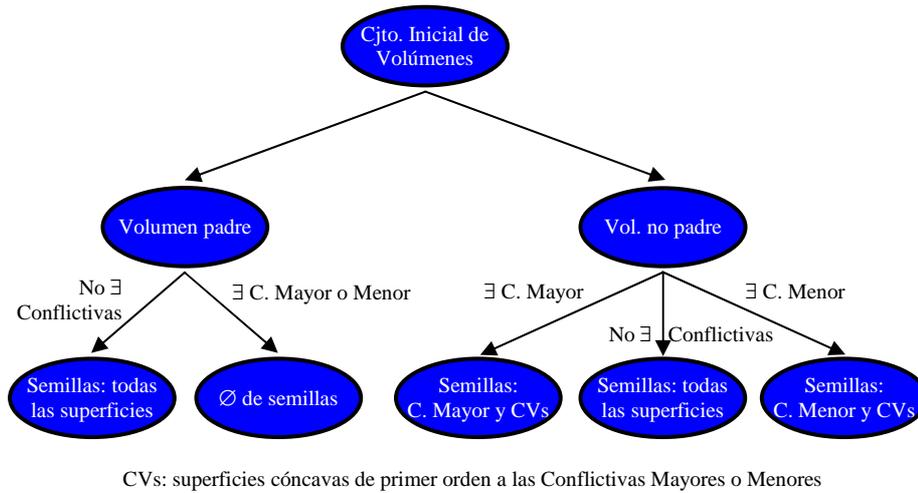


Figura 5-48. Secuencia de selección de la superficie 'semilla'.

6. Tipos de herramientas

Repasando la clasificación de procesos de mecanizado realizada en el Punto 1 de este Capítulo, se observa una característica importante en las herramientas de corte que permite clasificarlas: su posibilidad de giro o rotación. Esta característica se mantiene en función del grupo de procesos al que se pertenece. Los procesos tipo 'Rectificado por revolución' y 'Fresado' emplean herramientas rotativas, mientras que en los procesos tipo 'Torneado' y 'Limado' las herramientas no giran. Que sea de revolución, o no, influye a la hora de interpretar la información guardada, de cara a una completa representación de la herramienta.

Lo que se persigue al caracterizar una herramienta a través de unas pocas entidades geométricas y datos, es poder realizar todo tipo de comprobaciones y compatibilizaciones entre herramientas, para por ejemplo, agrupar a los Elementos Característicos de Mecanizado en una etapa final. Con el fin de abordar tareas de comparación entre herramientas, es necesario parametrizar y acotar sus formas a unas lo más genéricas posibles.

6.1. Herramientas de revolución

Se trata de herramientas que giran alrededor de un eje durante el proceso de arranque de material. Desde un punto de vista eficiente, quedan definidas por un perfil y el eje alrededor del cual giran. Para la extensión del corte se permiten unos movimientos de avance relativos entre la pieza y la herramienta, que en función de los grados de libertad de la máquina, describirán unas trayectorias continuas en cualquier dirección y sentido.

Se asume que una herramienta de revolución puede empezar a trabajar en macizo, sin entrar a discutir si existe filo radial que llega al eje de giro, o si hay un agujero previo en la pieza que lo permite. Ambos, son aspectos que no afectan a la consecución final de la geometría, pudiéndose elegir de forma independiente al proceso de reconocimiento. De hecho, un taladrado previo para una posterior entrada de la herramienta no afecta a la operación final de mecanizado en sí, y debe considerarse como una preparación. De igual manera, la existencia o no de un filo radial que llegue al eje puede decidirse con posterioridad, cuando se conozca el tipo de acceso.

Los datos que se almacenan sobre una herramienta son, única y exclusivamente, aquellos que impongan restricciones al perfil final. Este perfil debe entenderse como el necesario para que, al girar alrededor de un eje, se obtenga el modelo sólido de la herramienta.

En cualquier herramienta de revolución se puede distinguir entre la punta de la herramienta (zona radial/frontal), el cuerpo (zona axial) y la parte trasera de la misma (zona radial/frontal posterior). En el contexto de la Tesis, la superficie 'semilla' impone directamente las restricciones a la punta de la herramienta, el resto de superficies de la Zona de Mecanizado las imponen al cuerpo, y será en la etapa de comprobación del acceso, cuando se establezcan las restricciones en la parte trasera de la misma.

Para soportar variaciones en la herramienta, el perfil que la define se encuentra parametrizado. Se utiliza una estructura en la que se guardan los tramos del perfil, y las posiciones y localizaciones que cada uno ocupa respecto a un sistema de coordenadas. Las entidades geométricas que se usan siguen el formato 'Non-Manifold' B-Rep. En la Figura 5-49 (a), puede verse un ejemplo de las posiciones y dimensiones que ocupan los tramos de un perfil de herramienta.

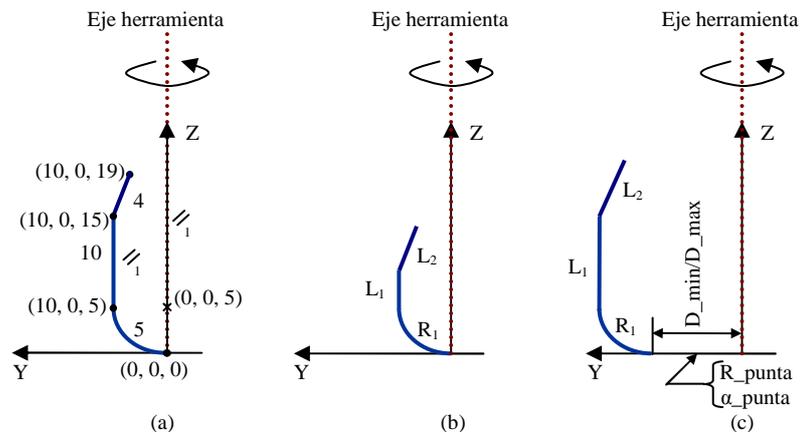


Figura 5-49. Perfil de una herramienta de revolución.

En la Figura 5-49 (b) y (c), se muestran variaciones admisibles para el perfil. No tener restricciones en la punta de la herramienta, 'R_punta' infinito y 'α_punta' sin valor asignado, indica que se trata de una superficie 'semilla' plana, una 'semilla' cilíndrica o esférica asignará valor a 'R_punta', mientras que una cónica lo hará al

ángulo, ' α_{punta} '. El ancho de la herramienta queda sin especificar, ya que ' D_{min} ' admite el valor "cero" y ' D_{max} ' puede ser en un principio infinito, como se aprecia en la Figura 5-49 (c). En ocasiones los parámetros de las aristas del perfil pueden tomar valor cero, depende de la forma geométrica de la Zona de Mecanizado y de lo que físicamente pueda admitirse, por ejemplo, dejar un mínimo para la anchura del mango.

Para una representación completa de la herramienta de revolución hace falta la siguiente información:

- Un sistema de coordenadas, donde el eje 'Z' se corresponda con el eje de la herramienta, midiéndose las distancias radiales en el eje 'Y'. Será en el plano 'YZ' donde se representará el perfil generatriz de la herramienta. Es, al revolucionar este perfil alrededor del eje 'Z' cuando se obtiene la forma completa de la misma. Esta situación hace que no sea necesario representar o considerar al eje 'X'.
- El perfil de la herramienta estará compuesto por aristas del tipo línea y círculo.
- Parámetros del tipo, diámetro máximo, mínimo, radio/ángulo de punta, ...

Al guardar la herramienta de forma acotada, tal como se ha descrito, y tener parametrizadas las variaciones que se le pueden aplicar, se hace abordable realizar comparaciones entre herramientas y búsquedas de formas comunes. Situación que puede ser usada para agrupar Elementos Característicos de Mecanizado o para cualquier otra acción dentro de la Planificación de Procesos, por ejemplo, reducir el número de cambios de herramienta entre operaciones aprovechando herramientas compatibles.

6.2. Herramientas planas

En este caso la herramienta no gira alrededor de ningún eje, aunque puede hablarse de eje de herramienta para indicar la línea a lo largo de la cual se extenderá el mango, necesario para sujetar la parte cortante y absorber los esfuerzos. Estas herramientas pueden definirse en un plano.

El mango puede tomar cualquier forma. En la generalización de la herramienta que se va a realizar quedará representado por una línea con una orientación y anchura dependiente de la zona cortante.

Las herramientas que no son de revolución se emplean en procesos tipo 'Torneado' y tipo 'Limado', entre los que se encuentra una diferencia fundamental que impide tener una representación común de la herramienta: el giro de la pieza para realizar el corte.

Atendiendo a esta diferencia, la geometría generada no siempre depende directamente del perfil/forma de la herramienta. En el caso de encontrarse girando la pieza, pueden aprovecharse los solapes de la herramienta durante el avance para generar formas no dependientes de su perfil. En la Figura 5-50 (a) se aprecia como la zona generada no depende del perfil o forma de la herramienta utilizada, es más, con cualquiera de las otras tres herramientas que se incluyen en la figura podría

generarse la misma zona.

Cuando se tiene limitado el movimiento de corte a uno lineal (la pieza no gira), la forma geométrica a obtener está relacionada con el perfil de la herramienta, Figura 5-50 (b), excepto para la superficie mecanizada con la punta, sobre la que se realiza el avance, donde sigue siendo aplicable el solape de la herramienta.

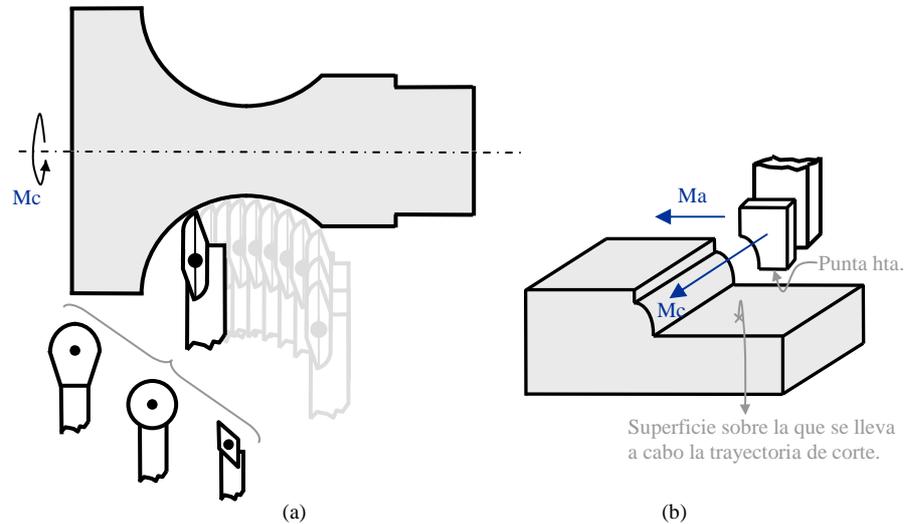


Figura 5-50. Perfil de una herramienta que no es de revolución.

La forma geométrica de la herramienta se guarda como un conjunto de aristas, del tipo 'Non-Manifold' B-Rep, respecto a un sistema de coordenadas local. No suele ser un conjunto de tramos cerrado.

Al contemplar la posible independencia, debido a los solapes, entre el perfil de la herramienta y la Zona de mecanizado, se advierte la necesidad de dos estructuras diferentes para almacenar los datos de una herramienta plana.

- Una donde se guarda un perfil específico, en forma de aristas, con variaciones en las mismas muy limitadas o inexistentes. Las aristas almacenadas van asociadas a un sistema de coordenadas cuyos ejes no representan al eje de la herramienta (entendiendo a éste como el mango, ya que la herramienta no gira). La disposición del mango de la herramienta puede ser cualquiera, será en el 'control de la accesibilidad' cuando se restrinja su posición y orientación. El almacenamiento de la herramienta de la Figura 5-50 (b) será de este tipo, de admitir variación en la longitud de algún tramo del perfil, será en la línea recta de la punta, ya que existirá solape entre pasadas.
- La segunda estructura si admite generalización en la representación de las herramientas. En ella se dispondrán una serie de aristas, curvas y/o rectas, predefinidas y parametrizadas, que son las mínimas exigibles para generar cualquier geometría en un proceso del tipo 'Torneado'. Se aprovecha el hecho de que la pieza se encuentra girando y se pueda

generar cualquier superficie desplazando y solapando la herramienta. Las aristas se almacenan respecto a un sistema de coordenadas, en cual queda también constancia de la orientación del mango y de su forma genérica, parcialmente parametrizada, y obtenida a partir de la zona cortante. En el mango se indica su ancho máximo admisible.

Admitiendo la posibilidad de solape, como no puede ser de otra manera, perfiles de herramienta muy diferentes pueden llegar a obtener formas geométricas iguales. Para acotar las formas de herramientas válidas, con vistas a una posterior búsqueda de herramientas comunes a más de un Elemento Característico de Mecanizado, deben reducirse las formas geométricas a una genérica, Figura 5–51, incluyendo rangos de variación en los tramos/aristas que la representan.

Entre las entidades de la Figura 5–51 que admiten variación, se encuentran las aristas tipo línea y tipo círculo. Para posicionarlas y orientarlas se utilizan los puntos que las limitan, añadiéndose además, el radio en los tramos curvos. La distancia entre puntos marcará la longitud, y la posición relativa entre ellos la orientación. Hay que señalar que los puntos inicial y final de cualquier entidad pueden coincidir, indicando que dicha entidad tiene longitud cero (no existe), además, una entidad circular puede tener radio “infinito”, informando que se trata de una línea. En la figura referenciada se ven ejemplos de herramientas obtenidas variando y/o anulando las aristas adecuadas.

Esta forma básica de herramienta, se ha creado con la intención de cubrir cualquier geometría de revolución cóncava, constituida por una sucesión de rectas y arcos de circunferencia en cualquier orden. Teniendo presente que habrá ciertas zonas que, en última instancia, sólo podrán mecanizarse con la punta de la herramienta, con la parte izquierda, o con la parte derecha de ésta. Además, estas zonas podrán ser rectas o curvas con cualquier orientación, de ahí la necesidad de contar con herramientas de punta circular (arco de circunferencia), de punta plana, y con posibilidad de disponer, tanto en la parte derecha como en la izquierda, de al menos un tramo curvo y/o recto que combinado con los solapes permita generar cualquier geometría.

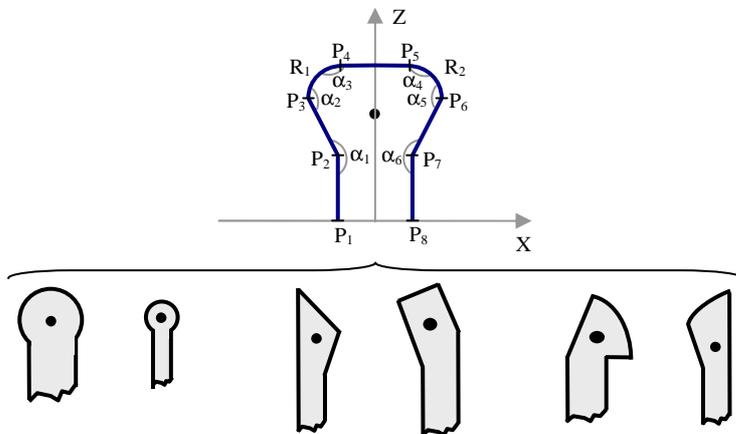


Figura 5–51. Formas genéricas y ejemplos de variaciones en ellas.

Evidentemente, de existir una herramienta genérica capaz de obtener una

geometría concreta, seguro se encuentran otras muchas formas no genéricas que consiguen lo mismo. Por el contrario, la no existencia de una forma genérica válida, que al fin y al cabo es una forma simplificada de la herramienta, si implica la no existencia de otra forma capaz de conseguir la geometría.

7. Cálculo de los rangos angulares válidos para el eje de la herramienta

Una vez conocidas las superficies que componen una Zona de Mecanizado pueden calcularse las orientaciones que puede tomar un eje/línea recta, que manteniendo el contacto por uno de sus extremos con una de las superficies, no interseccione con el resto. Si se supone que dicha superficie es la 'semilla', y que la línea es el eje de la herramienta necesaria para mecanizar la Zona, las orientaciones obtenidas representarán las posibles orientaciones espaciales permitidas para la herramienta.

Al hacer referencia al eje de herramienta, debe recordarse que en función del tipo de herramienta, éste será su eje de revolución o la línea de referencia a partir de la cual se construye su perfil plano. En este último caso, puede hacerse coincidir con el eje 'Z' del sistema de coordenadas sobre el que se construye el perfil, según lo visto en el punto anterior.

Las posibles orientaciones se expresan en función de los giros permitidos alrededor de los ejes de un sistema de coordenadas tomado como referencia. Estos giros, en general, quedan representados como rangos angulares, con un valor máximo y uno mínimo. El sistema de coordenadas de referencia puede ser cualquiera, por ejemplo, uno local a la superficie 'semilla' o uno global a la pieza. La elección vendrá en función de la facilidad de uso de la información obtenida, y ésta a su vez, depende de la utilización de los rangos angulares, aunque debe recordarse que el paso de los datos de un sistema de coordenadas a otro es automático y de fácil tratamiento informático.

Conocer los rangos angulares que expresan la posible variación en la orientación de la herramienta, tiene aplicación en las siguientes situaciones:

- En la etapa de agrupación de Elementos Característicos de Mecanizado, sobre todo en las partes relativas a la compatibilización de perfiles de herramienta, cuando se hace necesario cambiar la orientación de alguno de los ejes.
- Para detectar ciertas situaciones geométricas características. Por ejemplo, las cavidades pasantes.
- Conocer las variaciones posibles en el acceso a la zona de trabajo, para una disposición y forma válida del mango de una herramienta.
- Mejorar el tiempo de respuesta, consultando los rangos para validar un cambio de orientación del eje de la herramienta, antes de aplicarlo.
- Efectuar una primera aceptación o rechazo, ante variaciones para la herramienta durante la comprobación del acceso a la zona de trabajo,

cuando se tiene en cuenta al conjunto de superficies de la pieza.

- Permitir agrupaciones de Elementos Característicos de Mecanizado que pueden compartir herramienta.

La forma de obtener los rangos para la orientación del eje teórico, la "línea" en contacto con la 'semilla', es igual en todos los procesos de la clasificación realizada. Sin embargo, los datos obtenidos deberán interpretarse en función del Proceso Tipo que haga uso de ellos. Por ejemplo, en su utilización para orientar al eje de la herramienta en un proceso tipo 'Limado' o 'Torneado', no tiene sentido contemplar el giro alrededor del propio eje (son herramientas planas), o una vez conocido el Plano de Trabajo en un proceso tipo 'Torneado', deja de tener sentido una orientación que saque la herramienta de dicho plano. Lo que se debe hacer es modificar los rangos obtenidos según las restricciones propias de cada grupo de procesos.

7.1. Estructura de datos para el rango angular

Para almacenar la información necesaria sobre las posibles orientaciones que el eje de la herramienta puede tomar, se utilizan las siguientes variables aplicadas a un sistema de coordenadas local a la Zona de Mecanizado, ortogonal y dextrógiro, situado sobre la superficie 'semilla'.

- Valor del ángulo mínimo, válido para orientar el eje alrededor del eje 'X'.
- Valor del ángulo máximo, válido para orientar el eje alrededor del eje 'X'.
- Valor del ángulo mínimo, válido para orientar el eje alrededor del eje 'Y'.
- Valor del ángulo máximo, válido para orientar el eje alrededor del eje 'Y'.
- Valor del ángulo mínimo, válido para orientar el eje alrededor del eje 'Z'.
- Valor del ángulo máximo, válido para orientar el eje alrededor del eje 'Z'.
- Son fijos los valores de 'X'.
- Son fijos los valores de 'Y'.
- Son fijos los valores de 'Z'.

Las primeras seis variables informan de los rangos disponibles en la orientación del eje/línea. Inicialmente, como aún no existe restricción alguna, todos los valores se sitúan entre 0° y 360°.

Las tres últimas variables, una por giro alrededor de cada eje, indican si realmente es un rango angular o se trata de un valor fijo. Si se trata de un único valor angular válido, se rellenan las dos variables al mismo valor, aunque también podría tratarse de dos valores fijos, esta última situación se da ante una geometría que represente a un agujero pasante, donde se permiten dos entradas fijas y con sentido opuesto, por ejemplo, a 0° y a 180°. Inicialmente las tres últimas variables se rellenan indicando que los valores representan rangos admisibles, no valores fijos.

El sentido de giro que se sigue en los rangos angulares se apoya en el giro dextrógiro correspondiente a cada eje, "regla de la mano derecha", situando el pulgar en el eje alrededor del cual se quiere ver el giro, y el índice en aquel eje, de los otros

dos que quedan en el sistema de coordenadas local tomado como referencia, cuyo producto vectorial de cómo resultado al tercero de ellos.

Para mostrar los valores que se guardan en la estructura, se utilizan las piezas ejemplo de la Figura 5-52. En estas piezas, se han seleccionado como superficies 'semillas', aquellas en las que se apoya el sistema de coordenadas local que se tomará como referencia. Se ha marcado en azul a las superficies integrantes de cada Zona de Mecanizado. Los rangos angulares para cada una toman los valores mostrados en la Tabla 5-4.

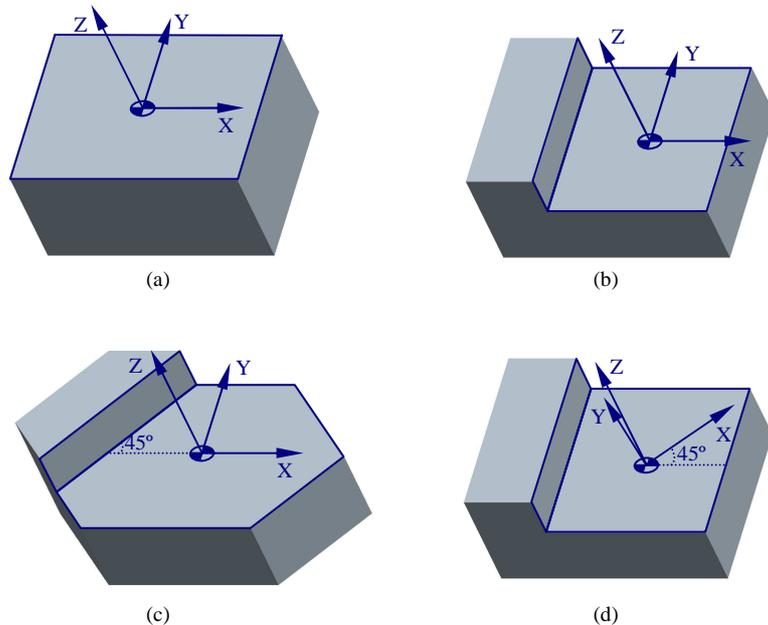


Figura 5-52. Piezas ejemplo para los rangos angulares.

Para una correcta interpretación de los datos de la Tabla 5-4, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Uno de los aspectos relevantes en la obtención del rango angular, es la dirección y sentido de la Normal Topológica de cada superficie implicada, ya que ésta indica hacia donde queda el material. Esta información, junto con el tipo y forma de la superficie, determinarán la inclinación que puede tomar el eje o línea. Según el sentido de la Normal Topológica, se trabajará directamente con las variaciones de los ángulos para el eje sobre la superficie, o con sus complementarios.
- Se trabaja con más de una vuelta, dejando el ángulo de menor valor en el mínimo, de forma que siempre se pase de mínimo a máximo. Se distingue de esta manera, para una superficie/cara dada, si la zona accesible queda a su derecha o a su izquierda. Por ejemplo, en la Figura 5-52 (c) el giro alrededor del eje Z va entre -135° y 45° indicando que la pared vertical del escalón deja sin material su parte derecha. De estar la pared vertical al otro lado, el rango iría entre 45° y 135° , dejando libre su

parte izquierda.

- Una variación en la disposición del sistema de coordenadas local, cambia los valores angulares almacenados, comparar la Figura 5-52 (b) y la (d). Sin embargo, no cambia el espacio total de orientación disponible en el eje/línea, obtenido éste a partir de las combinaciones entre los distintos giros admisibles alrededor de cada eje del sistema de coordenadas. El sistema de coordenadas es único para la Zona de Mecanizado, por lo tanto, su disposición no afecta al resultado.
- No debe confundirse el giro alrededor del eje 'Z' con el giro de la herramienta, en el caso de herramientas de revolución.

Figura 5-52 pieza (a):

ang_min_alrededor_X = 0°	ang_max_alrededor_X = 180°	Fijos_X = NO
ang_min_alrededor_Y = -90°	ang_max_alrededor_Y = 90°	Fijos_Y = NO
ang_min_alrededor_Z = 0°	ang_max_alrededor_Z = 360°	Fijos_Z = NO

Figura 5-52 pieza (b):

ang_min_alrededor_X = 0°	ang_max_alrededor_X = 180°	Fijos_X = NO
ang_min_alrededor_Y = 0°	ang_max_alrededor_Y = 90°	Fijos_Y = NO
ang_min_alrededor_Z = -90°	ang_max_alrededor_Z = 90°	Fijos_Z = NO

Figura 5-52 pieza (c):

ang_min_alrededor_X = 90°	ang_max_alrededor_X = 180°	Fijos_X = NO
ang_min_alrededor_Y = 0°	ang_max_alrededor_Y = 90°	Fijos_Y = NO
Ang_min_alrededor_Z = -135°	ang_max_alrededor_Z = 45°	Fijos_Z = NO

Figura 5-52 pieza (d):

Ang_min_alrededor_X = 90°	ang_max_alrededor_X = 180°	Fijos_X = NO
Ang_min_alrededor_Y = 90°	ang_max_alrededor_Y = 180°	Fijos_Y = NO
Ang_min_alrededor_Z = -135°	ang_max_alrededor_Z = 45°	Fijos_Z = NO

Tabla 5-4. Rangos angulares para las piezas ejemplo.

7.2. Algoritmo propuesto

En este punto se establece la sistemática necesaria para rellenar adecuadamente

la estructura propuesta en el punto anterior. La Figura 5–53 muestra los pasos principales del algoritmo desarrollado para la obtención del rango angular en cada Zona de Mecanizado.

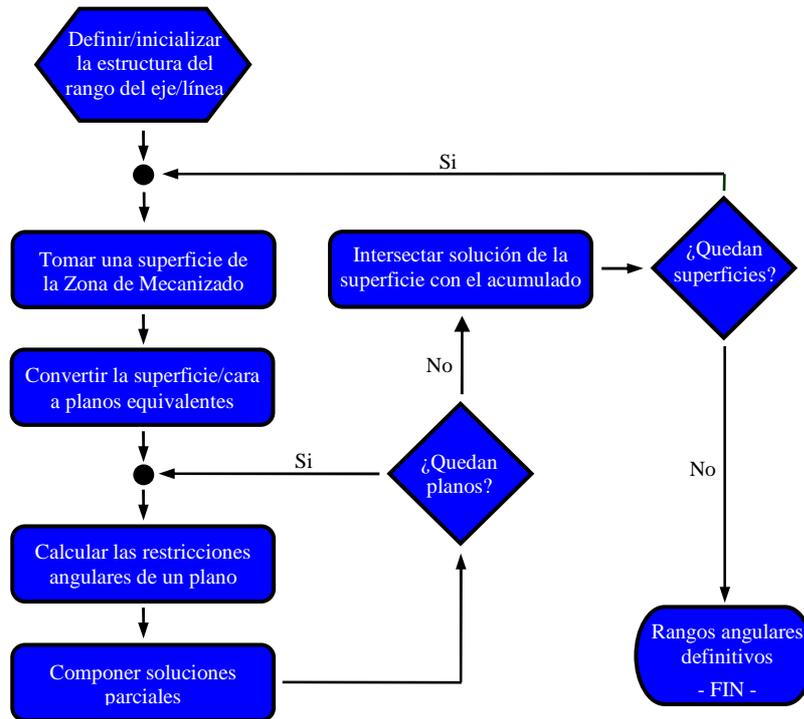


Figura 5–53. Diagrama de flujo para la obtención del rango angular.

A continuación se explica brevemente cada uno de los pasos del algoritmo:

- *Definir/inicializar la estructura de datos del rango del eje/línea.*

En un principio se define una variable denominada 'acumulados', donde se dejarán los rangos de giro válidos, correspondientes al eje/línea, alrededor de cada uno de los ejes del sistema de coordenadas tomado como referencia, normalmente local a la Zona de Mecanizado.

Inicialmente se parte de la estructura vista en el Punto 7.1 con los máximos giros admisibles, de 0° a 360° e indicando que los valores son rangos, no valores fijos.

- *Tomar una superficie de la Zona de Mecanizado. Convertir la superficie/cara a Planos Equivalentes.*

Para cada superficie de la Zona de Mecanizado se realiza una descomposición en Planos Equivalentes, sobre los que buscar las restricciones en la orientación del eje/línea considerado.

Los Planos Equivalentes se corresponden a un conjunto de planos unidos entre sí, que desde el punto de vista del cálculo del rango angular, se comportan igual que la

superficie inicial. Son explicados con detalle a continuación, Punto 7.3.

- *Calcular las restricciones angulares de un plano.*

En este punto se van tomando, uno a uno, los Planos Equivalentes. Sobre cada uno se calculan los rangos angulares permitidos respecto al sistema de coordenadas local, para la orientación del eje/línea apoyada en la superficie 'semilla' (supuesto eje de la herramienta).

- *Componer soluciones parciales.*

Si la superficie inicial es del tipo plana, el resultado quedará como definitivo, continuando con el paso siguiente. Con cualquier otra superficie, cuando no se trata del primer Plano Equivalente, se deben componer los resultados obtenidos con los que se tienen hasta el momento. Se harán tantas composiciones como Planos Equivalentes resultado de la conversión se tengan. Debe recordarse, que en función del tipo de superficie, de la normal topológica, y del eje considerado, se hará una unión o una intersección de los valores obtenidos para realizar la composición correcta.

- *Intersectar solución de la superficie con el acumulado.*

La variable 'acumulado' hace referencia a los rangos angulares disponibles, incluyendo a la superficie que acaba de tratarse.

Las distintas configuraciones de las superficies en la Zona de Mecanizado y su disposición geométrica, se traducen en distintas combinaciones alcanzables entre los valores de los rangos angulares parciales y los que se tengan en acumulados, como se muestra en la Tabla 5-5. Las "intersecciones" se realizarán para cada eje coordenado, aunque en ocasiones el resultado de un eje afecta a los otros.

Se ha dejado entre comillas la palabra intersecciones, ya que no son puras intersecciones, sino que se tratan también algunas particularidades.

Valores Acumulados	Valores Superficie Tratada	Resultados
Rango	Rango	Se intersectan los rangos angulares de cada eje coordenado. El resultado, normalmente será un rango, aunque puede quedar un único valor, siendo entonces fijo.
	Fijo	Si los fijos no están dentro del rango no existe orientación posible del eje. El resultado son valores fijos.
Fijo	Rango	El rango debe incluir al menos a uno de los dos fijos para existir orientación de eje. El resultado son valores fijos
	Fijo	Debe existir alguna coincidencia, en caso contrario no existe orientación para el eje/línea. El resultado son valores fijos.

Tabla 5-5. Valores de intersección y resultados.

En la disposición inicial, el eje o línea considerado se sitúa coincidente con el eje 'Z' del sistema de coordenadas local, pasando a comprobarse las orientaciones que puede tomar alrededor de dicho sistema. Debe recordarse, que la orientación del eje

viene determinada (limitada) por cada una de las superficies de la Zona. Si estas superficies no son normales a alguno de los ejes del sistema de coordenadas local, 'X' ó 'Y', la variación alrededor de uno influye en el otro. La dependencia entre los dos ejes se establece mediante la tangente del ángulo de giro alrededor del tercero, el eje 'Z', que es el que evita que el Plano Equivalente sea normal a algún eje coordenado.

La relación entre los rangos en 'X' y en 'Y', es a través de la tangente del ángulo alrededor de 'Z', debe ir comprobándose que los rangos alrededor de la 'X' y de la 'Y', que aporta un nuevo Plano Equivalente, son compatibles.

Otra situación que puede presentarse, es que exista relación entre el rango de las 'X' y de las 'Y', y en alguno de los dos se obtenga como solución a una intersección con acumulados unos 'valores fijos'. Ante esta situación el otro rango pasará también a contener valores fijos, resultado de aplicar la relación a través de la tangente del ángulo alrededor de 'Z'.

- *Rangos angulares definitivos.*

Indica si existe o no orientación posible de la línea o eje. De existir, entrega la estructura con los valores de los rangos angulares obtenidos.

La no existencia de rangos angulares válidos, tomándolos como las posibles orientaciones que puede tener el eje de la herramienta, no indica la imposible generación por mecanizado de la Zona. Un ejemplo de esto puede verse en la Figura 5-54, donde el apartado (a) muestra un corte de la Zona de Mecanizado, en él se aprecian dos tramos rectos inclinados y opuestos, procedentes de sendas superficies inclinadas (o cónicas) y opuestas. La inclinación de estas superficies, y el hecho de que una esté frente a la otra, darán como resultado la no existencia de compatibilidad en los rangos angulares para la orientación del eje de la herramienta. Aún así, mientras el resultado de la 'Construcción del perfil' no indique lo contrario, puede que el perfil de la herramienta absorba las restricciones que impide la orientación del mismo, como se observa en la Figura 5-54 (b), para la generación mediante un proceso tipo 'Rectificado por revolución' y 'Fresado'.

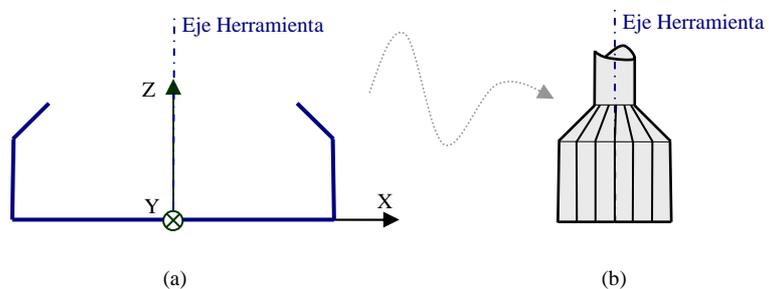


Figura 5-54. Perfil/hta. válido para una Zona sin rangos angulares compatibles.

7.3. Planos Equivalentes a una superficie

Para calcular el rango de validez en superficies de revolución, lo que se hace es

construir un conjunto de planos (Planos Equivalentes) asociados a la propia superficie, con un comportamiento equivalente respecto a las orientaciones que un eje o línea puede tomar sobre ella.

Para comprender la relación entre la superficie inicial y los Planos Equivalentes, debe considerarse a la superficie inicial como un recipiente, donde en un punto "central" de la cara, en el lado donde no hay material, se sitúa el sistema de coordenadas local. El eje 'Z' de este sistema de coordenadas representa al eje o línea implicada en el cálculo de los rangos angulares.

En una superficie de revolución, según la porción de superficie representada, concretamente lo abierta o cerrada que sea, se limitarán las posibles orientaciones que el eje/línea puede tomar. Los restricciones se deben a las propias paredes de la superficie tratada, como se muestra en el ejemplo de la Figura 5-55 (a).

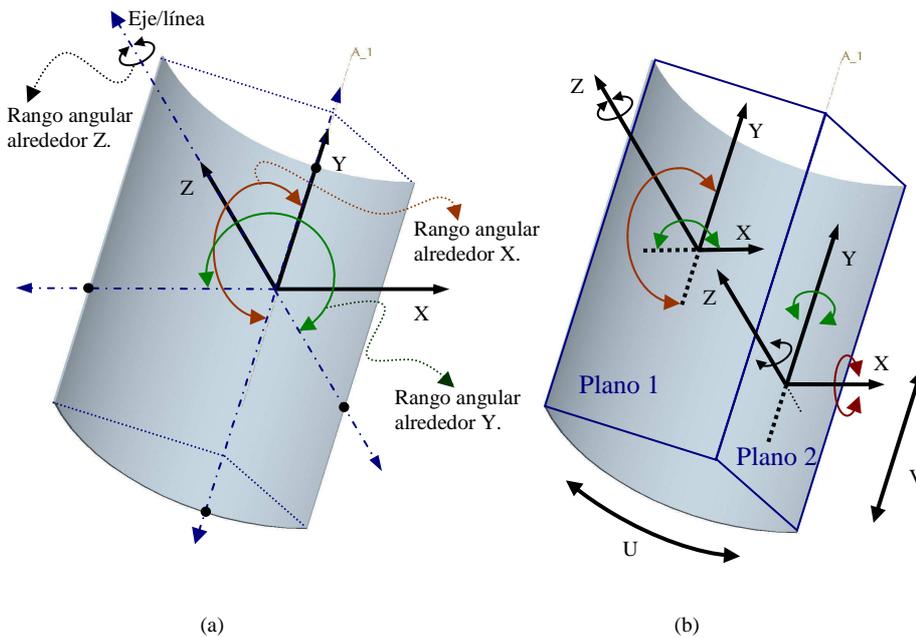


Figura 5-55. Restricciones angulares debidas al interior de un cilindro.

En las superficies cilíndricas (Figura 5-55), el sistema de coordenadas local tiene uno de sus ejes coaxial al eje de la superficie. Con una superficie de este tipo y con un eje/línea, inicialmente perpendicular al de la superficie, se le puede orientar girándolo alrededor del eje de la superficie, alrededor de su propio eje, de extremo a extremo respecto al eje de la superficie, o combinando los giros anteriores.

Para una superficie cilíndrica, el giro de extremo a extremo del eje no se ve impedido por el tamaño o el perfil exterior de la superficie, siempre se encuentra entre 0° y 180° , ya que la superficie está abierta en sus extremos. Sin embargo, el giro alrededor del eje de la superficie se encuentra limitado por la altura de las paredes laterales del trozo de cilindro al que representa. El giro alrededor del propio eje/línea

tampoco sufre limitaciones, y se sitúa entre 0° y 360° .

Teniendo en cuenta las particularidades de orientación comentadas, la superficie cilíndrica tendrá una equivalencia (desde el punto de vista de los giros permitidos a un eje/línea con un extremo sobre el eje del cilindro, tanto alrededor del eje, como alrededor de la normal al eje del cilindro), con dos planos unidos sobre el eje del cilindro y donde cada extremo libre apoya sobre un lateral de la superficie cilíndrica, como puede verse en 'Plano 1' y 'Plano 2' de la Figura 5-55 (b). La composición (unión) de los rangos aportados por ambos planos representa la solución final.

En el ejemplo mostrado, los laterales donde apoyan 'Plano 1' y 'Plano 2' son aristas rectas, continuas y paralelas al eje de la superficie. En caso de estar inclinadas, no ser rectas, o simplemente contener recortes (discontinuidades) en la superficie, la construcción de los Planos Equivalentes seguirá siendo igual, ya que se utilizan los puntos más alejados, correspondientes a las opciones más restrictivas.

Trabajando con superficies paramétricas (Capítulo 2. Punto 3.2.1), como es el caso, para obtener los puntos límite (más alejados) basta con buscar aquellos puntos que tienen el máximo y mínimo valor del parámetro 'U'. Aún así, existen particularidades que hay que tratar por separado y que restringen aún más la solución, por ejemplo, el caso de superficies cilíndricas en las que el 'U' máximo y mínimo coinciden. Ante esta situación los dos Planos Equivalentes son paralelos, no permitiendo orientación del eje/línea alrededor del eje de la superficie, lo cual es completamente normal, si se tiene en cuenta que esta situación se da ante un cilindro cerrado cuyo único eje admisible es el del propio cilindro.

Con el resto de superficies de revolución se realiza un razonamiento y conversión similar, como a continuación se expone. La forma de obtener los Planos Equivalentes se realiza a partir de puntos y vectores, manejando los máximos y mínimos de su representación paramétrica, en puntos situados en los ejes y aristas de las propias superficies.

En la explicación que se adjunta sobre la Figura 5-56, lo que se pretende es dar una idea sobre el razonamiento seguido, dejando fuera las particularidades y aspectos críticos relacionados con la solución algorítmica.

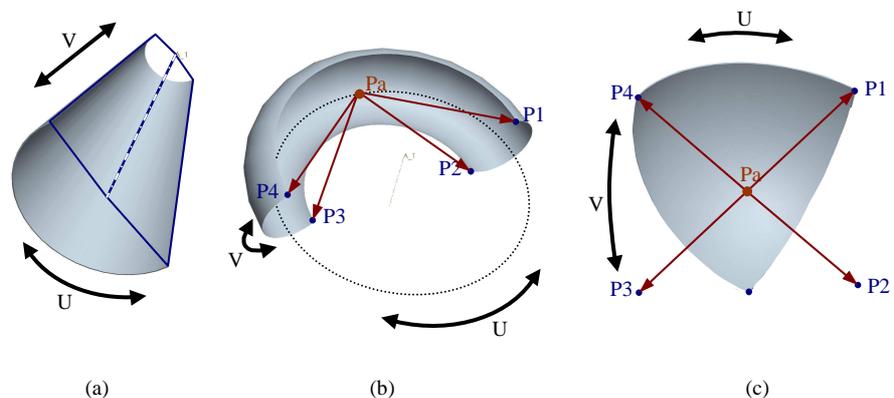


Figura 5-56. Puntos y vectores singulares usados para los Planos Equivalentes.

En la Figura 5–56 (a) puede verse una superficie cónica. Esta superficie recibe el mismo tratamiento que la cilíndrica.

En la Figura 5–56 (b) aparece representada una superficie tórica donde:

- 'P1': Punto en 'Umin', 'Vmin'.
- 'P2': Punto en 'Umin', 'Vmax'.
- 'P3': Punto en 'Umax', 'Vmin'.
- 'P4': Punto en 'Umax', 'Vmax'.
- 'Pa': Punto sobre la círculo de valor en radio 'radio_major', a mitad de camino entre 'Umin' y 'Umax'.

El sistema de coordenadas para el rango angular tendrá su origen en 'Pa', el eje 'Z' será la normal topológica a la superficie en ese punto, y el eje 'X' la tangente topológica a 'Pa' en el sentido incremental del parámetro 'U'.

La Figura 5–56 (c) muestra una superficie esférica, donde el cálculo de los cuatro planos se hace igual que en las tóricas. 'Pa' se sitúa en el centro de la esfera. Debido al recorte esférico mostrado en la figura, algunos de los puntos utilizados en la generación de los planos no quedan en su interior, como es el caso de P2 y P3. Situación que también puede presentarse en las tóricas, y que incluso podría afectar a los cuatro puntos, dependiendo de lo intrincado del recorte tratado.

Tomando como ejemplo a una superficie tórica, como la mostrada en la Figura 5–56 (b), los planos que caracterizan esta superficie, Planos Equivalentes (Figura 5–57), son:

- Plano 1°. Se calcula el punto con parámetros (Umin, Vmin), en el ejemplo coincide con 'P1', y el punto con los parámetros (Umin, Vmax), coincide con 'P2'. El 'Plano 1' será aquel que contenga a los vectores $\overrightarrow{P1Pa}$ y $\overrightarrow{P2Pa}$, ver Figura 5–57 (a)
- Plano 2°. Se calcula el punto con parámetros (Umax, Vmax), en el ejemplo coincide con 'P4', y el punto con los parámetros (Umax, Vmin), coincide con 'P3'. El 'Plano 2' será aquel que contenga a los vectores $\overrightarrow{P4Pa}$ y $\overrightarrow{P3Pa}$, Figura 5–57 (a)
- Plano 3°. Se calcula el punto con parámetros (Umin, Vmin), en el ejemplo coincide con 'P1', y el punto con los parámetros (Umax, Vmax), coincide con 'P4'. El 'Plano 3' será aquel que contenga a los vectores $\overrightarrow{P1Pa}$ y $\overrightarrow{P4Pa}$, Figura 5–57 (b).
- Plano 4°. Se calcula el punto con parámetros (Umin, Vmax), en el ejemplo coincide con 'P2', y el punto con los parámetros (Umax, Vmin), coincide con 'P3'. El 'Plano 4' será aquel que contenga a los vectores $\overrightarrow{P2Pa}$ y $\overrightarrow{P3Pa}$, Figura 5–57 (b).



Figura 5-57. Planos Equivalentes para un toro y ángulo entre ellos.

Es importante tener presente en la conversión a Planos Equivalentes que, en función de la porción de superficie manejada, pueden aparecer Planos Equivalentes repetidos. Por ejemplo, una superficie cilíndrica completa, donde los dos Planos Equivalentes coincidirán, ya que el punto con parámetros U_{max} y U_{min} es el mismo. La presencia de Planos Equivalentes repetidos no afecta a la operativa, ya que en la composición o intersección de rangos se tiene en cuenta el solape entre ellos, tanto si son coincidentes como si se encuentran enfrentados.

En los ejemplos mostrados, se toma como parte a mecanizar la cavidad o zona cóncava que encierra la superficie. Se ha seleccionado así porque es la parte en la que se sitúa el eje de la superficie, y resulta más fácil ver la construcción de los planos. Cuando la parte a mecanizar es el exterior de la superficie, parte convexa, la construcción de los Planos Equivalentes es idéntica, sólo cambian los valores de los rangos angulares que pasan a ser los complementarios.

7.4. Ejemplo de aplicación del algoritmo

Para mostrar un ejemplo de utilización de la metodología comentada, se ha seleccionado la pieza de la Figura 5-58. Los resultados mostrados son los obtenidos tras aplicar el software desarrollado acorde a la metodología explicada. Los identificadores, #221 y #234, hacen referencia a superficies planas, mientras que, #207 y #246, a cilíndricas. Todas pertenecen a una misma Zona de Mecanizado. El sistema de coordenadas local empleado aparece situado sobre la superficie '#221'.

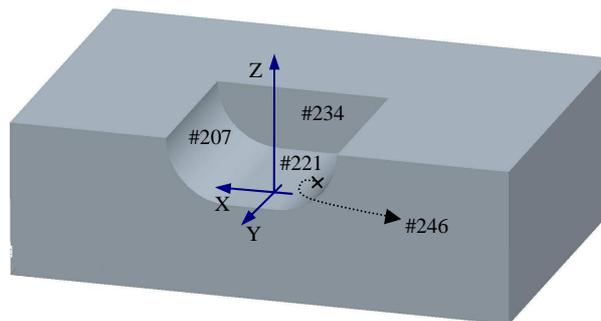


Figura 5-58. Pieza ejemplo para rango angular.

En la Tabla 5–6 pueden verse los valores angulares obtenidos, según se han ido tratando las distintas superficies de la Zona de Mecanizado. La superficie ‘semilla’ utilizada es la #221. Cuando la superficie es descompuesta en Planos Equivalentes, como es el caso de las superficies #207 y #246, aparecen los rangos angulares de cada Plano y el resultado una vez tratados los Planos Equivalentes. La última columna de la tabla representa la intersección de todas las restricciones impuestas por las superficies, realizanda progresivamente.

	#221	#207 Plano 1°	#207 Plano 2°	#207 resultado	#221 y #207	#234	#221, #207 y #234	#246 Plano 1°	#246 Plano 2°	#246 resultado	#221, #207, #234 y #246
Ang_min_alrededor_X	0	-180	0	0	0	-90	0	-180	0	0	0
Ang_max_alrededor_X	180	180	180	180	180	90	90	180	180	180	90
Ang_min_alrededor_Y	-90	-180	-90	-180	-90	-180	-90	0	-90	0	0
Ang_max_alrededor_Y	90	0	90	0	0	180	0	180	90	180	0
Ang_min_alrededor_Z	-180	90	-180	90	90	0	90	-90	-180	-90	90
Ang_max_alrededor_Z	180	270	180	270	270	180	180	90	180	90	90
Fijos_X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fijos_Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Fijos_Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabla 5–6. Valores de los rangos angulares para la Zona de Mecanizado.

A la vista de los resultados del ejemplo, reflejados en la última columna de la Tabla 5–6, se desprende que:

Alrededor de la ‘X’ se permite un movimiento del eje/línea dentro de la Zona, entre 0° y 90°, ya que la Zona de Mecanizado está abierta en una de sus caras. Alrededor del eje ‘Y’ se ofrece un valor fijo de 0° (mismo valor en el máximo y el mínimo, variable ‘Fijos_Y’ puesta a ‘1’), indicado que alrededor de este eje sólo se admite un eje/línea con esta orientación. Algo similar le ocurre a la rotación permitida alrededor del eje ‘Z’, obteniéndose un único valor fijo, 90°, que es justo la cota angular en la que no existe “pared” (impedimento alrededor del eje ‘Z’).

Es al analizar el resultado de la tabla bajo la perspectiva de un Proceso Tipo concreto y un objetivo específico, cuando los datos mostrados pueden interpretarse. Por ejemplo, en el caso de comprobar la orientación que puede tomar una herramienta de revolución con su eje de giro coincidente al eje ‘Z’ del sistema de coordenadas local empleado, la restricción mostrada en la tabla para ese eje, no lo es como tal, el giro es factible y los 90° indican que la Zona de Mecanizado no se cierra en esa cota angular.

Resulta interesante ver como Gian et al., [Ref. 35], resuelven el problema

relacionado con la orientación de la herramienta para el mecanizado de un volumen de material en una pieza, aunque se centren en el mecanizado de cinco ejes con una herramienta de punta esférica. En el trabajo recogido en el artículo, ofrecen relaciones matemáticas y consideraciones a contemplar para evitar interacciones con las superficies implicadas y poder acceder a todas, a partir de una orientación inicial, que posteriormente va siendo reorientada según entran en juego las distintas superficies implicadas.

En la propuesta desarrollada en la presente Tesis, la orientación de la herramienta se resuelve en dos etapas. Una primera en la que se dan unos rangos angulares debidos al tipo y forma de las superficies de la Zona de Mecanizado, y posteriormente una segunda etapa, donde se buscará, dentro de los rangos permitidos, una orientación del eje de la herramienta y un perfil de ésta capaz de generar las superficies implicadas. Para alcanzar la solución se deberá conocer el Proceso Tipo encargado del mecanizado, ya que es precisamente éste el que establece las restricciones en las geometrías a conseguir y las orientaciones admisibles. Esta segunda etapa se explica en el punto siguiente.

Durante la construcción del perfil de la herramienta, bajo un Proceso Tipo, puede que algunas de las restricciones mostradas en el rango angular sean absorbidas por el propio perfil/forma de la herramienta, permitiendo una mayor variación. Por ejemplo, en la geometría de la Figura 5-58, para un proceso tipo 'Fresado' puede aumentarse el rango angular alrededor de la 'Y', considerando que se trata de una herramienta de punta esférica (Figura 5-59). El resto del proceso de construcción del perfil terminará confirmando o rechazando esta posibilidad.

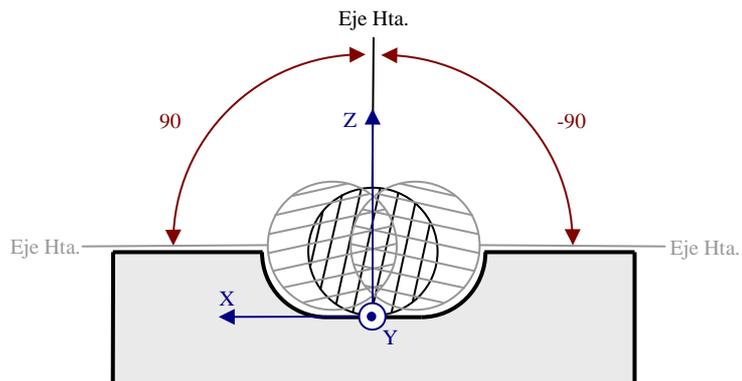


Figura 5-59. Orientaciones permitidas para una herramienta de punta esférica.

8. Construcción del perfil de la herramienta

La construcción del perfil de la herramienta se realiza en el contexto del conjunto de superficies que componen una Zona de Mecanizado. De hecho, el perfil válido debe ser capaz de eliminar el Volumen de Mecanizado asociado a la Zona, generando todas sus superficies.

En la construcción del perfil de la herramienta se toma como base una superficie a la que se denomina 'semilla', sobre la que se realiza la trayectoria de corte y que quedará afectada por las irregularidades debidas al propio movimiento de corte. El resto de superficies determinan el perfil/cuerpo de la herramienta. Para ello se recorre la superficie 'semilla' proyectando todas las superficies vecinas sobre un plano (Plano de Construcción). Estas proyecciones darán forma al perfil de la herramienta, contemplando las restricciones que cada nueva superficie aporta.

El proceso de construcción de la herramienta se ha diseñado para que realice una modificación dinámica en la orientación de su propio eje, y se adapte a las nuevas exigencias de cada superficie. Al final del proceso se dispondrá un perfil compatible con todas, o se estará ante una geometría que no admite un único perfil de herramienta. Esta última conclusión se alcanzará tras agotar todas las posibles orientaciones, o bien al encontrar inconsistencias físicas, por ejemplo, una bifurcación en el perfil generador de la herramienta.

Puede verse un ejemplo de cambio de orientación del eje, durante la construcción del perfil de la herramienta, para la Zona de Mecanizado mostrada en la Figura 5-60 (a), compuesta por las superficies 'S₁', 'S₂' y 'S₃'. Tomando como 'semilla' a 'S₁', y ante la inclusión de la superficie 'S₂', se obtendrá un perfil y disposición de eje como el mostrado en la Figura 5-60 (b), sin embargo, al contemplar a 'S₃' el eje anterior no será válido. En función de las dos superficies se puede orientar el eje de la herramienta obteniendo un perfil como el mostrado en la Figura 5-60 (c).

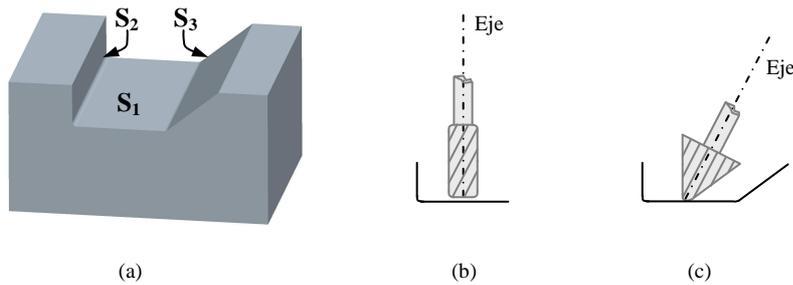


Figura 5-60. Reorientación del eje de herramienta.

En general, para cualquiera de los grupos de procesos establecidos, la construcción del perfil pasa por obtener, a partir de las superficies integrantes de una Zona de Mecanizado, los distintos tramos que lo conforman. Sin embargo, la interpretación de este perfil dependerá del Proceso Tipo considerado, obteniéndose el modelo sólido de la herramienta al revolucionar el perfil alrededor de un eje o al trasladarlo en una dirección determinada.

El perfil de herramienta obtenido debe ser lo más general posible. Atendiendo a este criterio, se distinguen dos grupos de perfiles de herramientas con claras diferencias:

- Un primer grupo, formado por aquellas herramientas en las que el perfil final se corresponde directamente con el obtenido, junto con unas

restricciones relativas a los tramos o aristas que lo integran. Pertenecen a este grupo las herramientas que se obtengan para los procesos tipo 'Fresado', 'Rectificado por revolución' y 'Limado'.

- Un segundo grupo, en el que el perfil obtenido directamente de la Zona de Mecanizado sufre una transformación para conseguir una verdadera generalización, ya que por características propias del proceso, en este caso los del grupo 'Torneado', existen herramientas con formas muy dispares capaces de obtener la misma geometría en la pieza. Por ello se busca una equivalente simplificada.

Como se tendrá ocasión de comprobar, cada nuevo tramo que forme parte del perfil deberá cumplir una serie de restricciones de carácter geométrico-físico (afectan a la geometría de la herramienta y está ligado con una interpretación física, real, de la misma), dependientes en parte del grupo de procesos. Los detalles y particularidades de la construcción del perfil de la herramienta para cada grupo de Procesos Tipo, se verán en los siguientes puntos de éste Capítulo.

Como se deduce, una de las bases de la sistemática es la superficie 'semilla', ya que en ella se apoya el proceso de construcción del perfil. Existen ciertas situaciones en las que la 'semilla' está formada por más de una superficie. En estos casos, al conjunto de superficies que integran a la "superficie" 'semilla' se las denominará superficies 'compatibles'. El comportamiento y la forma de proceder, es como si de una única superficie se tratara. A continuación se exponen las condiciones para agruparlas bajo esta calificación.

8.1. Superficies 'compatibles'

Dos o más superficies de revolución son 'compatibles', si son tangentes y cóncavas entre sí. Reciben este nombre porque su mecanizado, tomando a cualquiera de ellas como 'semilla', está estrechamente relacionado. De hecho, la transición entre ellas no quedará como "marca" de mecanizado. Esta transición es absorbida por la propia extensión del corte, ya que éste se llevará a cabo a lo largo de una trayectoria que discurre según los ejes/puntos de simetría (ejes de revolución, en el caso de una superficie cilíndrica o cónica, punto central, en el caso de una esférica, arco de la circunferencia de valor 'radio mayor' en el caso de una tórica).

Para extender el corte, tal como se ha comentado, la concavidad en las superficies cilíndricas y cónicas debe provenir de una arista curva común, en las tóricas de una arista curva de valor 'Rminor' en su radio, y en las esféricas de cualquier arista.

Puede advertirse que la trayectoria de corte, en función de la superficie 'semilla' implicada, sigue un camino que incluye elementos de simetría comunes, eje, punto o curva, de la definición de la propia entidad. Por ejemplo, una ranura formada por una superficie cilíndrica, una tórica y una esférica, cóncavas y tangentes entre sí, se mecanizará con una herramienta de punta esférica, siguiendo una trayectoria que transcurre a lo largo del eje de la superficie cilíndrica, del arco de la circunferencia de valor 'radio mayor' para la tórica, y que incluye al punto central en la esférica (Figura 5-61). Esta trayectoria de mecanizado representa a una línea (recta y/o curva) sólo con transiciones tangentes, de la cual equidistan todos los puntos de las superficies.

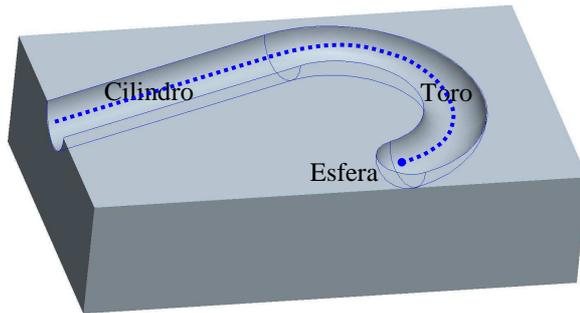


Figura 5-61. Ejemplo de superficies compatibles.

Evidentemente, en caso de ser dos superficies del mismo tipo y mismas características, 'superficies iguales' (ver Punto 4.1.1 de este capítulo), no es necesario el concepto 'compatible', ya que se toman como una única superficie.

Considerando que una de las superficies implicadas será tomada como 'semilla', pueden verse ejemplos de superficies 'compatibles' en las figuras mostradas con anterioridad en el Punto 4.1 de este Capítulo, por ejemplo, la Figura 5-18 (a) y (b), la Figura 5-23 (a), la Figura 5-24 (a) y (b), la Figura 5-26 (a), la Figura 5-27 (a), y la Figura 5-28 (a) y (b).

No deben confundirse como 'compatibles' aquellas superficies que, siendo tangentes y cóncavas, no cumplen con la posibilidad comentada para trazar una trayectoria de corte común. Algunos ejemplos de superficies no 'compatibles' por esta causa son, la Figura 5-19 (a), la Figura 5-20 (a), la Figura 5-21 (a) y (b), la Figura 5-28 (c), y la Figura 5-30 (a) y (b).

El hecho de agrupar superficies bajo la condición de 'compatibles' implica que serán consideradas como una única superficie, la 'semilla', sobre la que transcurre la trayectoria de corte. Esta situación afecta directamente al proceso de construcción de la herramienta, ya que para ello se recorrerán las aristas límite del conjunto de superficies 'compatibles'. A todos los efectos, las superficies compatibles deben transformarse en una sola, desapareciendo las aristas comunes, dejando sólo aquellas que establecen el límite exterior y por supuesto los recortes internos que posea cada una.

8.2. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Fresado'

La construcción del perfil de la herramienta se realiza para cada Zona de Mecanizado (Volumen de Mecanizado). Cualquier superficie de la Zona de Mecanizado puede tomarse como 'semilla', si bien es cierto que en la determinación de los Volúmenes se han establecido unas preferencias en la elección de las 'semillas', generando una lista ordenada que favorezca la obtención del menor número de superficies con marcas. Se trabaja directamente con esta lista de 'semillas', sin realizar ninguna reordenación en la misma a través de reglas o

heurísticos para favorecer una determinada solución. Lo que se pretende es demostrar que el Volumen se puede mecanizar, y por tanto, basta encontrar una solución factible para el perfil de la herramienta. Cualquier elección concreta, sobre el tipo o forma de la herramienta, deberá decidirse en el resto de etapas de la Planificación. En caso de no encontrar solución posible con esa superficie 'semilla' se selecciona la siguiente, y así sucesivamente hasta encontrar una solución (perfil de herramienta válido), o hasta agotar todas las superficies 'semilla' de la Zona de Mecanizado, pudiendo afirmar que no hay solución.

A continuación se muestran, de forma ordenada, los pasos a seguir para construir el perfil de la herramienta. Se deja para el final la explicación detallada de algunos aspectos importantes que en ellos aparecen.

- Seleccionar 'semilla' y crear Plano de Construcción.

Seleccionada una superficie 'semilla' se recorrerán todos sus recortes, externos e internos, respetando su sentido topológico, tratando, una a una, todas sus aristas. Para ello se empieza por el recorte exterior, y tras tomar una primera arista (no es relevante cual se elija en primer lugar), se procede como a continuación se detalla. El proceso se repetirá para todos los recortes de la 'semilla'.

Seguir el sentido topológico de los recortes facilita la construcción del perfil, ya que los resultados de las proyecciones quedarán en el mismo cuadrante del sistema de coordenadas empleado en la representación/construcción de la herramienta, denominado Plano de Construcción.

La localización del Plano de Construcción se establece al situar un sistema de coordenadas en el punto de inicio de la arista elegida, cuyo eje 'Z' es el eje de la herramienta. La única limitación en la orientación del eje de la herramienta viene impuesta por su pertenencia al rango de validez, calculado para esa Zona de Mecanizado. Por ejemplo, cuando la superficie 'semilla' es plana, se toma si se puede, su normal topológica, mientras que para una superficie de revolución, una cilíndrica por ejemplo, se toma su normal topológica, pero con la orientación que se obtendrá al calcularla sobre un punto que este situado a mitad del parámetro 'U' de la superficie.

Normal al eje 'Z' anterior, queda definido el plano que contiene a los ejes 'X' e 'Y'. El eje 'Y' se orientará siguiendo la dirección y sentido establecido por la normal topológica a la arista, que informa a que lado de la arista queda el material. El eje 'X', que se corresponde con el producto vectorial de los dos anteriores, sigue la dirección y sentido de la tangente topológica a la arista elegida.

Definido el sistema de coordenadas, con el eje 'Z' como eje de la herramienta, sólo falta indicar que el Plano de Construcción del perfil será el 'YZ' de este sistema de coordenadas.

- Proyección de las superficies ligadas a la arista tratada en este momento.

Situado el sistema de coordenadas anterior en el punto de inicio de la arista tratada, se comprueba si dentro de la Zona de Mecanizado existen superficies vecinas a la 'semilla', a través de esta arista.

Si no existen vecinas, se traslada el sistema de coordenadas al punto final de la arista, que coincide con el inicial de la siguiente, y se repite el proceso con la nueva arista. Es importante recordar que el eje 'Z' no habrá variado su orientación, pero si el

eje 'Y', que será la normal topológica a la nueva arista. Por lo tanto, el Plano de Construcción' se habrá orientado para adaptarse a la nueva arista.

Si existen vecinas asociadas a la arista que se está tratando, se ejecutará el 'Procedimiento de proyección', encargado de realizar la proyección de todas las superficies vecinas que se encuentren en la dirección y sentido positivo del eje 'Z' (eje de la herramienta). En breve se comentará con más detalle a qué superficies afecta y cuál es la sistemática de funcionamiento del 'procedimiento de proyección'.

- Proyección de las superficies ligadas al punto en común de dos aristas.

A medida que se vaya pasando por los puntos de inicio y final de las aristas (A_1, \dots, A_4 , en la Figura 5-62), y siempre que las dos aristas relacionadas a través de este punto mantengan una relación que no sea de tangencia, también deberá ejecutarse el 'Procedimiento de proyección', para contemplar posibles superficies relacionadas con la 'semilla' a través de un punto, sin mantener arista en común. En el caso de la Figura 5-62 las superficies S_3 y S_4 .

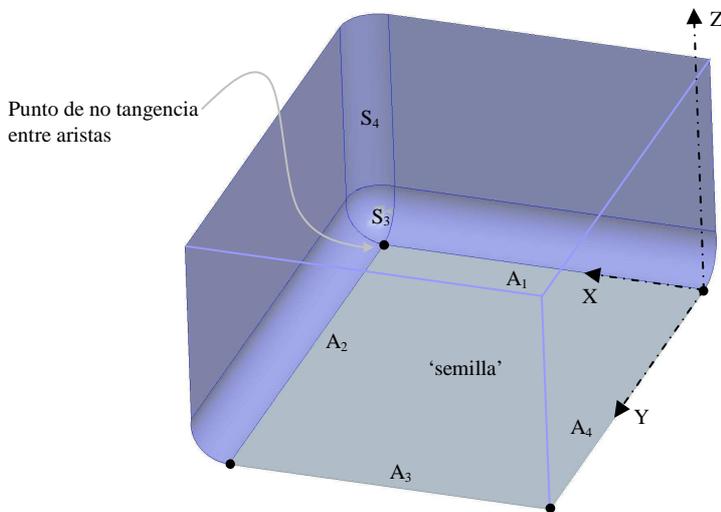


Figura 5-62. Superficies relacionadas con la 'semilla' a través de un sólo punto.

- Compatibilizar el resultado de la proyección con el perfil previo, el construido hasta el momento.

Aunque la compatibilización del perfil se realiza simultáneamente con la proyección, se ha decidido separarlo para facilitar su explicación. De hecho, según se van proyectando las superficies ligadas a una arista o punto, y teniendo en cuenta el ángulo entre ellas, se va comprobando la compatibilidad, de modo que, si es compatible se continúa y en caso contrario se termina.

Ante una incompatibilidad pueden darse dos casos:

- Que la incompatibilidad de perfiles pueda ser resuelta con una nueva orientación del eje de la herramienta. En este caso se reorienta el eje y se

vuelve al principio para repetir el proceso y comprobar la validez del nuevo eje.

- Que la incompatibilidad no se pueda resolver con una reorientación. Esto indica que no existe un perfil de herramienta capaz de generar esas superficies, y que deberá cambiarse de 'semilla' para probar otras configuraciones.

El resultado de proyectar una superficie sobre el Plano de Construcción (plano 'YZ' del sistema de coordenadas utilizado, teniendo en cuenta la variación en su orientación), van a ser unas aristas. A partir de las aristas ya proyectadas, y teniendo en cuenta que el perfil genera una herramienta de revolución, pueden detectarse dos situaciones que lo invalidan:

- A una misma altura respecto al eje de la herramienta, eje 'Z', no pueden existir dos perfiles distintos, Figura 5-63 (a), ya que la herramienta no tendrá sentido físico.
- Se encuentra una bifurcación en el perfil de la herramienta. No existirá solución con esa 'semilla' (Figura 5-63 (b), (e) y (f)), salvo que esté situado en el origen y las aristas implicadas sean del mismo tipo, y del mismo radio en caso de ser curvas, (Figura 5-63 (c) y (d)). En estos casos se podrá buscar una nueva orientación para el eje de la herramienta capaz de generar a las dos.

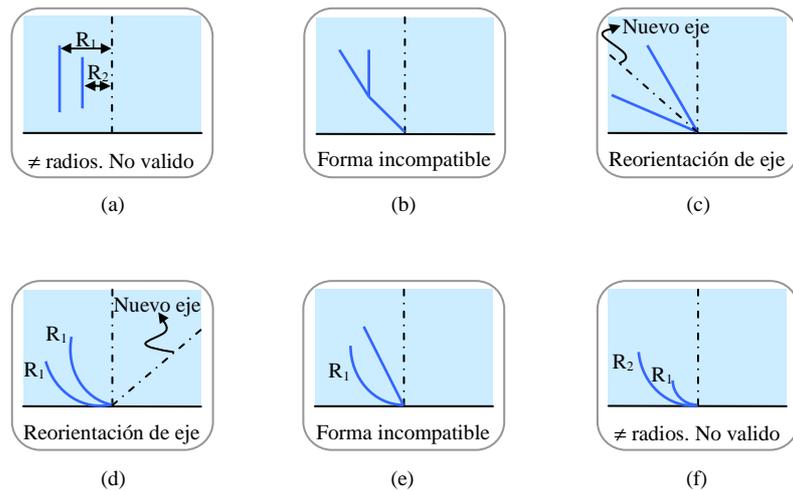


Figura 5-63. Compatibilidades e incompatibilidades en el perfil de la herramienta.

En la Figura 5-64 se muestra el diagrama a seguir para obtener el perfil válido, o para confirmar que no existe perfil capaz de generar la Zona, con una herramienta de revolución y con las restricciones que impone un proceso del tipo 'Fresado'.

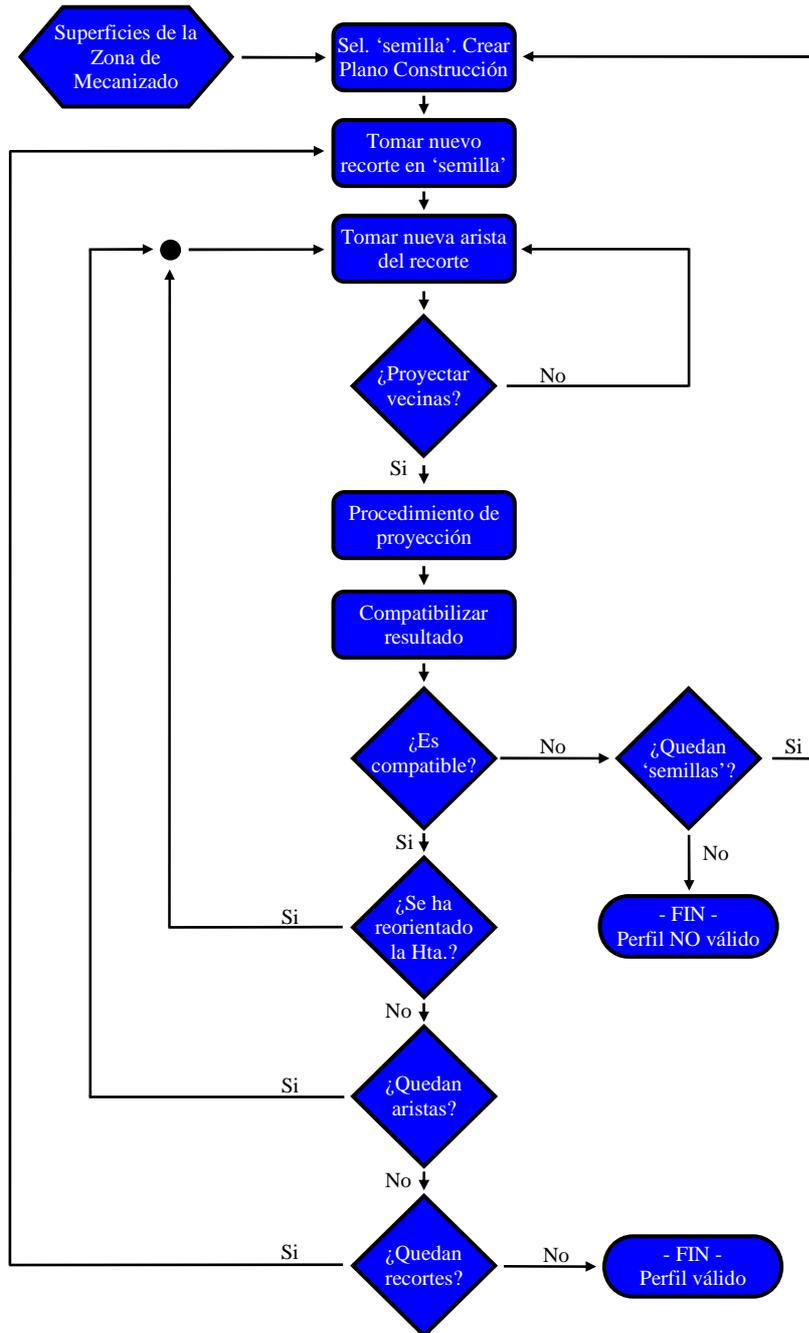


Figura 5-64. Algoritmo para la construcción del perfil de la herramienta.

8.2.1. Procedimiento de proyección

En la sistemática de construcción del perfil de la herramienta, proyectar una superficie debe entenderse como establecer la traza que dejan sus aristas al intersectar sobre el Plano de Construcción (plano 'YZ').

Antes de explicar en que consiste el 'Procedimiento de proyección' hay que recordar que se trabaja sólo con las superficies contenidas en una Zona de Mecanizado, de las cuales, una (o un conjunto de superficies compatibles) se ha tomado como 'semilla'. Además, para no proyectar superficies que ya han sido proyectadas se mantiene una lista de superficies proyectadas, cuya primer integrante es la superficie 'semilla', que no se proyecta.

En función de la arista de la superficie 'semilla' que originó la proyección, se distinguen dos tipos proyecciones:

- Lineal, si la arista en la superficie 'semilla' es una línea recta. En este caso las aristas que se proyecten lo harán con una proyección estándar, transportándolas al plano 'YZ' siguiendo la dirección de la arista de la superficie 'semilla', ver Figura 5-65.

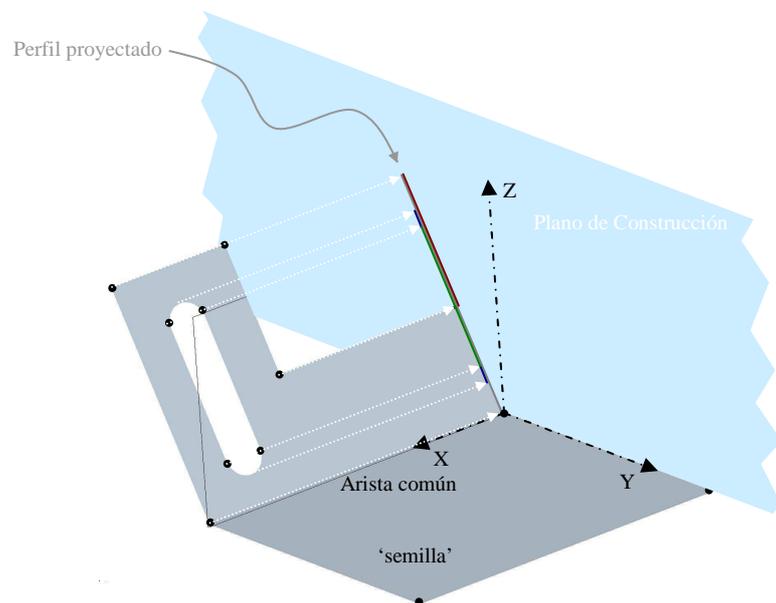


Figura 5-65. Proyección "lineal" de una superficie.

- Circular, cuando la arista de la 'semilla' es parte de un círculo. Las aristas a proyectar lo harán trasladándose con una trayectoria circular, respecto a un eje coincidente con el de la herramienta, pero situado en el centro de la curva correspondiente a la arista 'semilla', ver Figura 5-66. Este tipo de proyección se realiza también en aquellos puntos en los que no existe relación de tangencia entre las aristas que lo comparten, en este caso el eje alrededor del cual se gira, es el de la herramienta, situado en el propio punto del recorte de la 'semilla'.

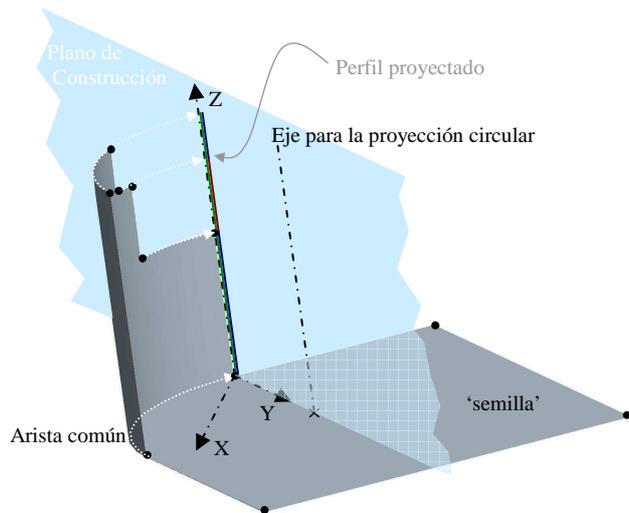


Figura 5-66. Proyección "circular" de una superficie.

Del conjunto de aristas proyectadas, en cualquiera de los casos (lineal o circular), se eliminan todas las repetidas y coincidentes, ofreciendo un perfil sin solapes.

Centrándose en la operativa del procedimiento, y disponiendo de una de las aristas del recorte de la superficie 'semilla' como arista a tratar, empieza un proceso recursivo, que se aplica sobre cada arista de la 'semilla'.

Se toma la superficie vecina a la 'semilla' con la que se comparte arista. Si existe superficie vecina se recogen todas sus aristas y se clasifican en cuatro grupos:

- Grupo 1º, en el que todas sus aristas experimentan una variación en 'Z' (eje de la herramienta).
- Grupo 2º, en el que se encuentran aquellas aristas que al recorrerlas, de inicio a fin, la cota en 'Z' permanece constante, no sufre variación.
- Grupo 3º, formado por aquellas aristas que conectan con la arista de inicio, la que desencadenó la llamada al procedimiento de proyección.
- Grupo 4º, que contendrá a aquellas aristas que no conectan con la arista de inicio.

Las aristas que pertenezcan a los grupos 1º y 3º, tienen variación en 'Z' y conectan con la original, serán proyectadas. Las aristas de los grupos 2º (no varían en 'Z') y 4º (no conectan con la original), son tomadas una a una, como nuevas aristas originales para repetir el proceso (alcanzar vecina, clasificar sus aristas en los cuatro grupos, proyectar, etc.). Este proceso se realiza recursivamente hasta que no quedan superficies vecinas por tratar.

Cada superficie a proyectar se recorta tomando como límites dos líneas con dirección y sentido coincidente con el eje de la herramienta, situadas en los puntos inicial y final de la arista tratada (de la superficie 'semilla'). Con ello, se evita tomar

superficies, o partes de superficies, que deberán ser alcanzadas con otras aristas de la superficie 'semilla', ya que entre otras cosas, estarán favorablemente orientadas a la nueva arista de la 'semilla'.

Cada vez que se proyectan los tramos de una superficie, ésta se guarda en la lista de las proyectadas, ya que si se vuelve a alcanzar no debe tratarse y proyectarse de nuevo.

8.2.2. Nueva orientación del eje de la herramienta

Existen incompatibilidades que pueden resolverse reorientando el eje de la herramienta. Para ello, los tramos implicados de los perfiles deben ser del mismo tipo y poseer un punto en común. Por ejemplo, dos tramos rectos, o curvos, con distinta orientación, como puede verse en los ejemplos de la Figura 5–63 (c) y (d).

Si las superficies no están enfrentadas (situadas a 180° una de otra), la orientación del eje no se realizará sobre el Plano de Construcción, necesitando para tal fin, la posición angular del nuevo tramo y del anterior, que definen dos planos. Por cada uno de estos planos es por donde se desplaza la herramienta. Debe tenerse en cuenta que al ser la herramienta de revolución, un cambio en su eje de giro implica un cambio en su forma (a una cónica), quedando a su vez restringidas las nuevas orientaciones que pueda tomar.

Teniendo en cuenta que se busca una reorientación de la herramienta, el caso más restrictivo sería encontrarse con tres planos con distinta orientación/inclinación por los que tiene que pasar la herramienta. Con ellos se puede establecer la orientación necesaria y el semiángulo de una herramienta cónica que satisfaga a los tres. En caso de existir más planos, estos deben ser compatibles a lo que se tiene, ya que no se podrán satisfacer nuevas restricciones. Sólo en caso de ser menos de tres, los planos implicados, quedarán variables por satisfacer, inclinación del eje (dos grados de libertad) o semiángulo de la herramienta cónica, permitiendo variabilidad en la disposición del eje de la herramienta.

Lo habitual, en el mecanizado con un proceso tipo 'Fresado' (operaciones comunes), es que los tramos rectos proyectados provengan de superficies situadas a 180° (superficies con normales topológicas opuestas, superficies enfrentadas). En estos casos, la compatibilidad pasa por orientar el eje de la herramienta a uno favorable a los dos, trazando la bisectriz entre los tramos directamente sobre el Plano de Construcción, ver ejemplo en la Figura 5–67 (a). Si se compatibiliza sólo a dos superficies entre sí, la orientación válida del eje no es única, ya que también se admiten orientaciones del eje en el plano normal al de proyección (plano bisector, si las superficies implicadas son planas). Se elige la obtenida sobre el Plano de Construcción.

Cuando los tramos implicados en el cambio de orientación son curvos, las restricciones físicas son mayores, admitiéndose sólo tramos con el mismo radio y la misma topología (parte cóncava o parte convexa). El resto recibe el mismo tratamiento que los tramos rectos, salvo que las reorientaciones se llevan a cabo trabajando con la bisectriz entre las normales topológicas de los dos tramos, calculadas en su punto de unión, Figura 5–67 (b) y (c).

Al tener que orientar el eje para satisfacer a los tramos curvos con distinta orientación, la herramienta ya no podrá ser de punta plana. Debe recordarse que el perfil en construcción limita al cuerpo de la herramienta, y salvo la incorporación de alguna restricción como la comentada, la punta de la herramienta viene determinada por la superficie 'semilla', por lo tanto, ante un solo tramo curvo en el perfil, tangente a una 'semilla' plana, la punta de la herramienta puede ser plana o esférica, se permiten ambas formas.

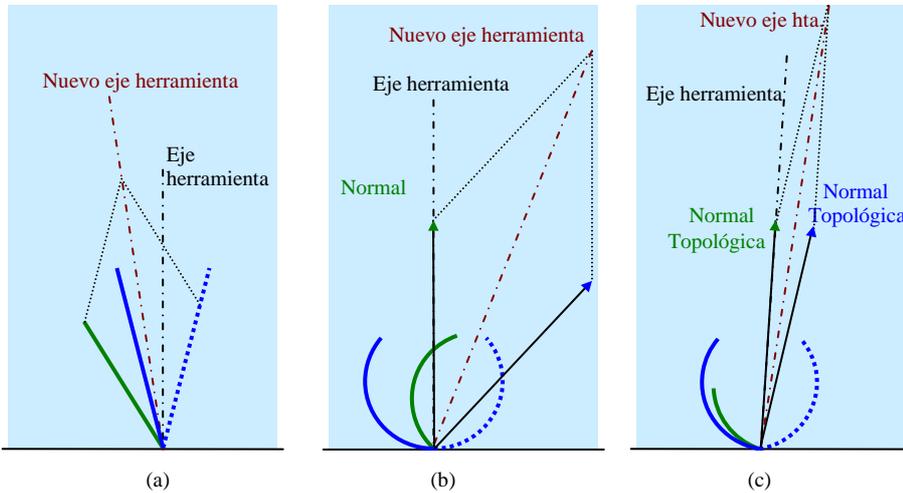


Figura 5-67. Cambio en las orientaciones del eje de la herramienta.

En la Figura 5-67, en cualquiera de las tres imágenes, (a), (b) y (c), el tramo en verde corresponde al perfil de la herramienta tras proyectar una primera superficie inclinada, el tramo en azul hace referencia a la proyección de una nueva superficie. Al estar situada (esta última superficie proyectada) a 180° de la anterior, el tramo debe situarse en el otro cuadrante, coincidente con el dibujado en discontinuo y en color azul. Las formas de las herramientas se obtienen al revolucionar alrededor del nuevo eje (representado en granate), al mayor de los dos tramos implicados, el verde o el azul discontinuo. La anchura de mango disponible coincide con la abertura que queda tras revolucionar el tramo.

8.2.3. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta

En este apartado se van a mostrar unos ejemplos donde se aprecia la sistemática explicada para la construcción del perfil de la herramienta, en Zonas de Mecanizado a ser generadas con procesos tipo 'Fresado'.

- En el ejemplo de la Figura 5-68 (a) se muestra una Zona de Mecanizado en la que al aplicar la sistemática, se llevan a cabo las siguientes acciones:
 - Tomando como superficie 'semilla' la indicada en la Figura 5-68 (a), se escoge una cualquiera de sus aristas, por ejemplo, la arista 'a_1' y su punto de inicio 'Pa'.

- Se construye el sistema de coordenadas en 'Pa', donde el eje 'Z' será el eje inicial de la herramienta, y en el Plano 'YZ' se construirá el perfil a través de la proyección de las aristas.
- Se aplica el 'Procedimiento de proyección', teniendo como arista a tratar a 'a_1'. A través de esta arista se accede a la superficie vecina 'S1'. Se procede a clasificar todas las aristas de 'S1' y a proyectar aquellas que sufren variación en 'Z' y que conectan con la original ('a_2' y 'a_4' en la Figura 5-68 (a)). El resultado de la proyección lineal puede verse en azul en la Figura 5-68 (b). Se eliminan las aristas repetidas y se añade 'S1' a la lista de proyectadas.
- Con las aristas que no varían en 'Z' y no conectan con la arista original, 'a_3' en este caso, se vuelve a aplicar el procedimiento. Después de clasificar las aristas de la superficie vecina a 'S1' a través de 'a_3', 'S2' en el ejemplo, se proyectan linealmente las aristas ('a_5' y 'a_6'). El resultado de la proyección es la línea azul inclinada de la Figura 5-68 (c), donde se muestra en verde el perfil anterior. Se añade 'S2' a la lista de proyectadas.

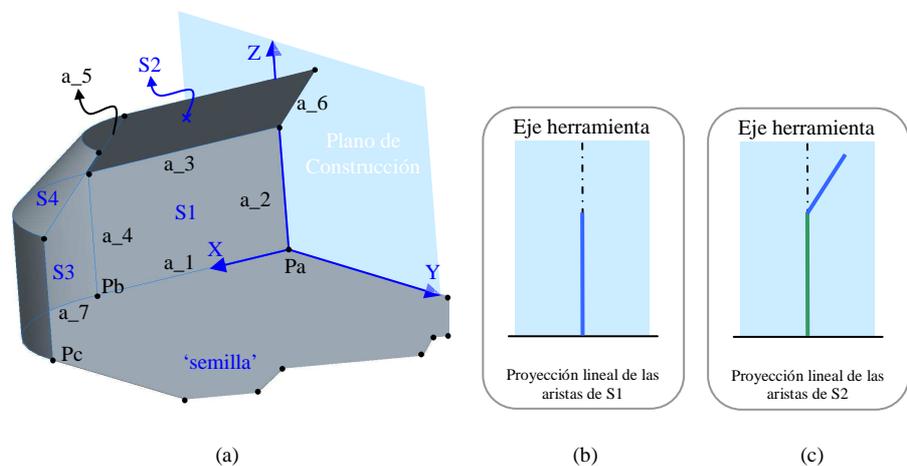


Figura 5-68. Construcción de perfil compatible, proyecciones en el punto 'Pa'.

- Puesto que no quedan más superficies por alcanzar y aristas por recorrer, se traslada el eje de la herramienta al próximo punto del recorte de la superficie 'semilla', 'Pb', Figura 5-69 (a).
- Las aristas, 'a_1' y 'a_7', tienen como punto común a 'Pb' y son tangentes entre si, por lo tanto, no se llama al 'Procedimiento de proyección' ante un "punto del recorte con relación de no tangencia entre las aristas que relaciona".
- Se aplica el procedimiento de proyección, tomando la siguiente arista en la 'semilla': 'a_7'. A través de la arista circular 'a_7' se tiene como vecina a la superficie cilíndrica 'S3', en la que después de clasificar sus aristas,

se proyectan circularmente 'a_4' y 'a_8'. El resultado de la proyección se muestra en azul en la Figura 5-69 (b).

- Se vuelve a aplicar el procedimiento con la única arista que no incrementa en 'Z' y no conecta con la original, 'a_9'. Se incorpora la superficie cónica 'S4', tras clasificar sus aristas, se proyecta circularmente a las aristas 'a_10' y 'a_11', Figura 5-69 (c). Al no encontrar más superficies vecinas a través de 'S4' termina el procedimiento de proyección.
- El resto de aristas de la superficie 'semilla', hasta alcanzar la tomada inicialmente, no poseen superficies vecinas, por lo tanto, el perfil compatible que se viene arrastrando no es modificado, quedando como perfil válido. Existe una herramienta de revolución con un perfil como el mostrado en verde en la Figura 5-69 (c), capaz de generar las superficies de la Zona de Mecanizado. Aún así, el algoritmo continúa trabajando igual, trasladando el eje de la herramienta y el Plano de Construcción solidario a él, y aplicando el procedimiento. Irá devolviendo el mismo perfil de herramienta al no proyectarse nada, terminará al alcanzar el punto de comienzo, 'Pa'.

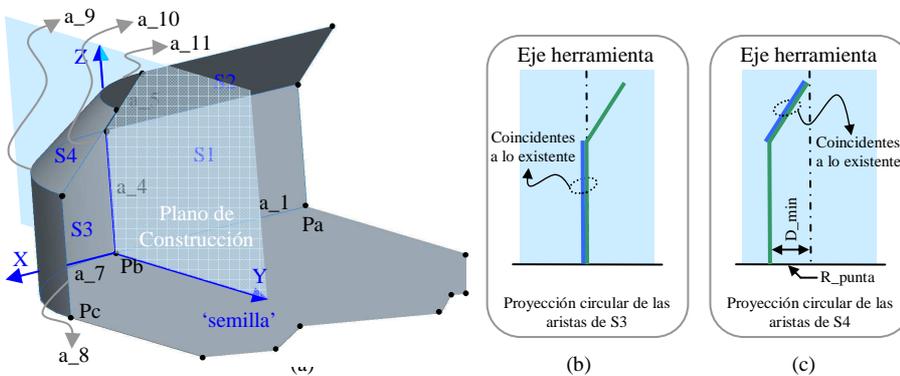


Figura 5-69. Construcción de perfil compatible, proyecciones en el punto 'Pb'.

Se puede hablar, a falta del estudio del acceso, de ciertos parámetros de la herramienta que empiezan a tomar valores. Por ejemplo, 'D_min' queda fijado por la separación necesaria del perfil respecto al eje de la herramienta, Figura 5-69 (c), el valor de 'D_max' se obtendrá en el análisis final del acceso, fijado con toda seguridad por el radio de 'S3'. El radio de punta de la herramienta ('R_punta') tomará un valor de "infinito", ya que la 'semilla' es plana y la transición con 'S1' y 'S3' es a 90°.

- En el ejemplo de la Figura 5-70 (a) se muestra una Zona de Mecanizado donde se requiere un cambio de orientación en el eje de la herramienta, para absorber la variación en la inclinación en una de las superficies de la Zona. Las superficies cilíndricas 'S1' y 'S3' son tangentes a sus respectivas vecinas.

- Tomando como superficie 'semilla' a la indicada en la Figura 5-70 (a), se escogerá una cualquiera de sus aristas. Por ejemplo se elige 'a_1' y su punto de inicio 'Pa'.

- Se construye el sistema de coordenadas en 'Pa' según lo comentado, donde el eje 'Z' será el eje de la herramienta, y el Plano 'YZ' el de construcción del perfil.
- Se llama al 'Procedimiento de proyección', teniendo como arista a tratar a 'a_1'. A través de esta arista se accede a la superficie vecina 'S1', dentro del conjunto de superficies de la Zona de Mecanizado. Se procede a clasificar todas las aristas de 'S1' y a proyectar aquellas que sufren variación en 'Z' y que conectan con la original, 'a_5' y 'a_6' en la Figura 5-70 (a). El resultado de la proyección lineal es el primer tramo curvo en azul de la Figura 5-70 (b). Se añade 'S1' a la lista de proyectadas.
- Con las aristas que no varían en 'Z' y no conectan con la arista original ('a_7' en el ejemplo), se alcanza a una superficie vecina, 'S2'. Se clasifican sus aristas y se proyectan linealmente las que experimentan variación en 'Z', 'a_10' y 'a_8'. El resultado es el segundo tramo recto vertical en azul de la Figura 5-70 (b). Como a través de las aristas que no varían en 'Z', 'a_9', no se alcanza a ninguna superficie vecina, se sale del 'Procedimiento proyección' y se desplaza el eje de la herramienta a la arista siguiente de la 'semilla', 'a_2', en su punto 'Pb'. Se añade 'S2' a la lista de proyectadas.
- Puesto que las aristas 'a_1' y 'a_2' en su punto de unión mantienen una relación que no es de tangencia, se llama al 'Procedimiento de proyección'. Al no existir vecina ligada a la arista 'a_2' dentro de la Zona, no hace nada, dejando el mismo perfil que se tenía, Figura 5-70 (b).

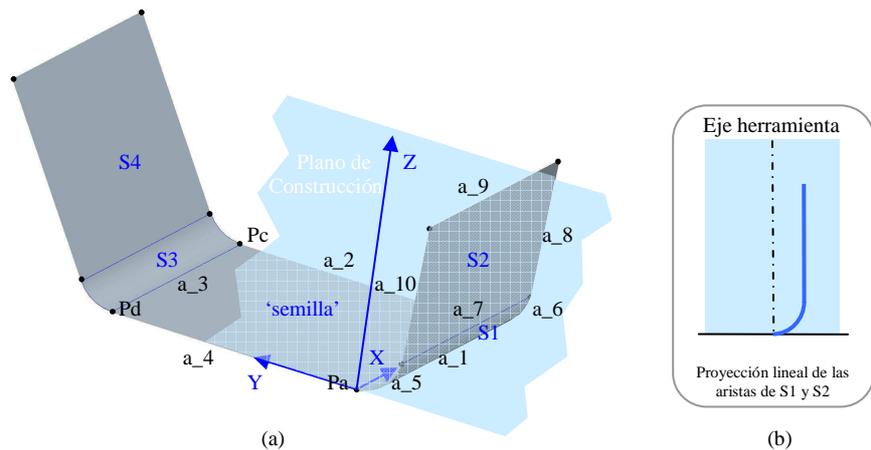


Figura 5-70. Construcción del perfil, proyecciones en el punto 'Pa'.

- Se traslada el sistema de coordenadas a la siguiente arista, 'a_3', punto 'Pc', Figura 5-71 (a), y se llama al 'Procedimiento de proyección'. Clasifica las aristas de la superficie vecina 'S3' y proyecta linealmente 'a_11' y 'a_12'. El resultado de la proyección es la parte curva del perfil en azul de la Figura 5-71 (b). Añade a 'S3' a la lista de superficies proyectadas.

- La arista 'a_13' de 'S3' no experimenta variación en 'Z' y no se habrá proyectado, pero da paso a una superficie vecina, 'S4'. El 'Procedimiento de proyección' clasifica sus aristas, proyectando linealmente a las que varían en 'Z', 'a_14' y 'a_16' (resto del perfil en azul de la Figura 5-71 (b)). Termina al pasar a la arista 'a_15', ya que no conecta con ninguna vecina. Añade 'S4' a la lista de proyectadas.
- El resultado mostrado en la Figura 5-71 (b) no es un perfil válido de herramienta, es necesario un cambio en la orientación del eje. Adopta la nueva orientación mostrada en la Figura 5-71 (c).

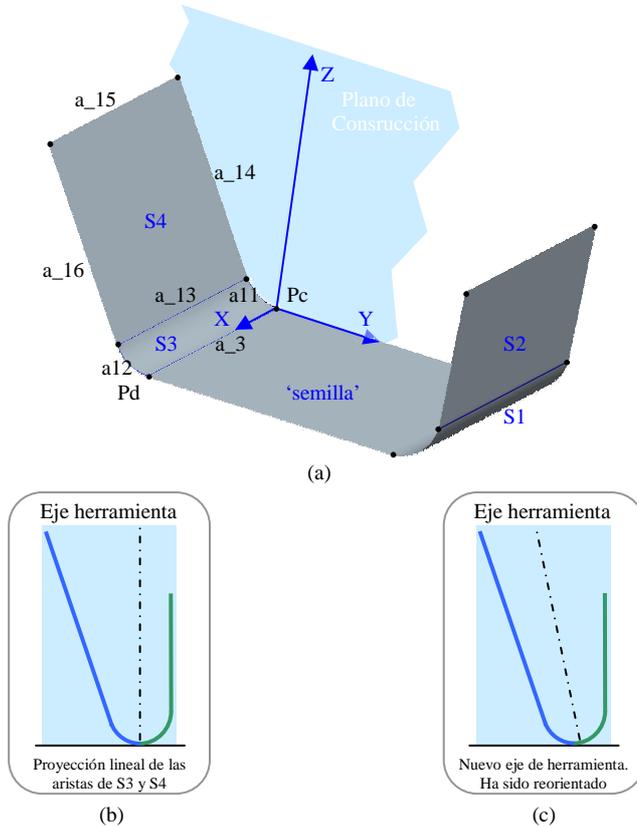


Figura 5-71. Construcción del perfil, proyecciones en el punto 'Pc'.

Al producirse un cambio de orientación se aplica de nuevo todo el proceso, para comprobar su compatibilidad. En este ejemplo concreto, por la disposición de las superficies de la Zona y al haber realizado un sólo cambio de orientación, la compatibilidad se mantiene, y no se van a mostrar los pasos, aunque debe insistirse en la necesidad de comprobar la compatibilidad ante cualquier variación en el eje o perfil.

- A través del ejemplo de la Figura 5-72 (a) se mostrará una Zona de Mecanizado que posee un saliente en su superficie 'S2', y que provoca una inconsistencia física en los tramos del perfil obtenido para la herramienta.

Al sólo contener vecinas a través de la arista 'a_3' (la superficie 'semilla' de la Figura 5-72), no será hasta llegar a ella cuando el 'Procedimiento proyección' devolverá tramos para la construcción del perfil.

- En el punto 'Pc' se sitúa el sistema de coordenadas cuyo plano 'YZ', mostrado en azul en la Figura 5-72 (a), es el de proyección.
- Se llama al 'Procedimiento de proyección' con la arista 'a_3'. Para la superficie vecina 'S1' se clasifican sus aristas, proyectando 'a_5' y 'a_6', ya que experimentan variación en 'Z'. El resultado se muestra en la Figura 5-72 (b). Se añade 'S1' a la lista de superficies proyectadas.

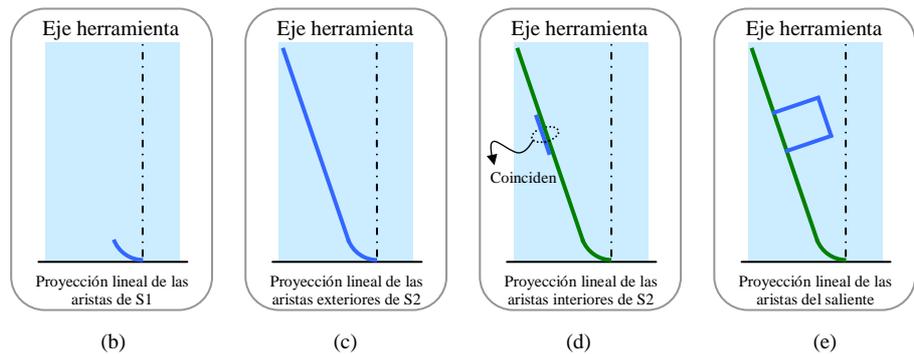
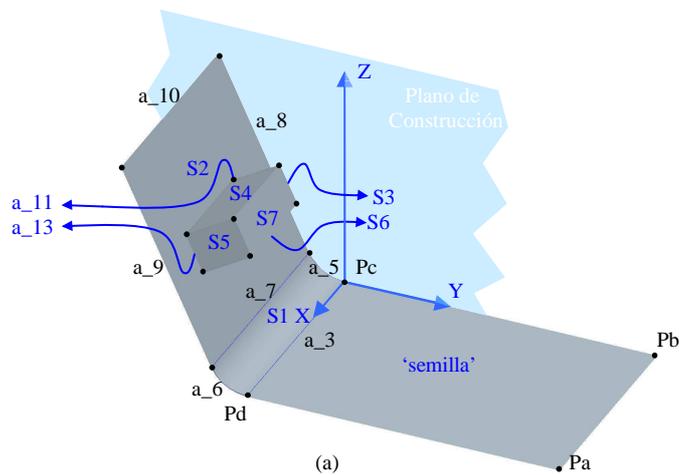


Figura 5-72. Construcción del perfil, proyecciones en 'Pc'.

- A través de la arista de 'S1' que no se incrementa en 'Z', 'a_7', se accede a la nueva vecina, 'S2'. Continuando con la recursión, el 'Procedimiento proyección' proyecta las aristas 'a_8' y 'a_9', obteniendo el siguiente tramo del perfil que se aprecia en Figura 5-72 (c).
- La superficie 'S2' también contiene un recorte interno, en el que el 'Procedimiento proyección' sigue el mismo principio de funcionamiento, clasificando las aristas y proyectando las que poseen variación en 'Z', en

este caso, 'a_11' y 'a_13' (Figura 5–72 (d)).

- Al utilizar las aristas de 'S2' que no sufren variación en 'Z', para alcanzar nuevas vecinas a tratar, se llega a las superficies 'S3', 'S4', 'S5' y 'S6'. El resultado de la proyección de las aristas de estas superficies es el mostrado en la Figura 5–72 (e). Este perfil es incompatible y físicamente imposible para una herramienta de revolución.

Se concluye indicando que no existe un perfil de herramienta válido para esa superficie 'semilla', bajo un proceso tipo 'Fresado'. Deberá probarse con otra semilla.

8.2.4. 'Fresado' apoyado en entidades externas a la Zona de Mecanizado

El proceso de construcción del perfil engloba a las dos formas clásicas de trabajo en los procesos tipo 'Fresado': el trabajo realizando la trayectoria de corte con la zona frontal de la herramienta (la punta), y el trabajo cuando la trayectoria de corte corre a cargo de la zona axial de la herramienta (el cuerpo), 'Fresado frontal' y 'Fresado periférico' respectivamente.

En la realidad, en un proceso de fresado, por ejemplo el mecanizado de un "escalón", mientras una superficie se genera con la punta, la otra es generada con el cuerpo. En el proceso de construcción del perfil, dependiendo de cual de las dos superficies se tome como 'semilla' y de la orientación de la herramienta, se podrá decir que se genera en frontal o en periférico. Evidentemente, entre una solución u otra existirá diferencia en el acabado microgeométrico de cada una de las superficies. Este acabado microgeométrico depende de aspectos como la propia trayectoria de corte, el diámetro y longitud de la herramienta, la orientación del eje de la herramienta y del resto de condiciones de corte y modos de trabajo.

El procedimiento propuesto de búsqueda del perfil, permite encontrar una herramienta para un proceso tipo 'Fresado', independientemente de si se trata de frontal o de periférico. La decisión que se tome a favor de uno u otro, se deja como una elección priorizada de la superficie 'semilla' y/o un ajuste del resto de condiciones, sobre todo las que afectan a la herramienta. Continuando con el ejemplo del escalón, si se fuerza a utilizar a una de sus superficies como 'semilla', manteniendo un eje de herramienta normal a ella, quedará mecanizada por frontal, mientras que la otra se hará por periférico.

Es necesario recordar que, en el contexto de la Tesis, para aceptar un Elemento Característico de Mecanizado, debe quedar demostrada su 'fabricabilidad' y será con posterioridad, durante la Planificación Procesos, cuando se realice un análisis local sobre la Zona en busca de unas condiciones de mecanizado concretas, por ejemplo, buenos acabados o utilización de una herramienta específica, entre otras.

Toda la operativa seguida en los procesos tipo 'Fresado' se apoya en entidades o elementos existentes/contenidos en la Zona de Mecanizado, como por ejemplo, la elección de una de las superficies como 'semilla'. Sin embargo, existen ciertas geometrías que sólo admiten generación por mecanizado, a partir de un tratamiento en el que se utilizan elementos o disposiciones externas a la Zona de Mecanizado. Estas situaciones se presentan:

- Cuando la superficie ‘semilla’ que debería tomarse para encontrar solución no existe, por que se está ante una cavidad pasante. Ver Figura 5–73 (b).

Situación que se da cuando todas las superficies de la Zona son ‘semillas’, y el rango angular dispuesto para la Zona ofrece un eje paralelo a todas ellas. Si se trata de un ciclo cerrado de superficies, debe seguirse la operativa que a continuación se expondrá. Por el contrario, si el ciclo de superficies es abierto, puede encontrarse solución con la operativa ya comentada. De no encontrarla, es necesario seguir el mismo tratamiento que para el ciclo cerrado de superficies, ya que ésta se convierte en la única solución posible y hay que comprobarla.

En este tipo de geomatrías, la superficie ‘semilla’ deberá ser una perpendicular al único eje dispuesto para la herramienta, y esta superficie no existe dentro de la Zona de Mecanizado. Para obtener el perfil, lo que se hará es recorrer las aristas (recorte) que hipotéticamente contendría la ‘semilla’ adecuada, estas aristas pueden obtenerse de las superficies de la Zona.

Para obtener el recorte de aristas a seguir en la construcción del perfil, se toma una arista cualquiera, de entre las pertenecientes a las superficies de la Zona, que no una a dos superficies entre si. En la Figura 5–73 (b) se corresponde con cualquiera de las arista de los ciclos mostrados en rojo o en azul y que dilimitan a la Zona externamente. El resultado que se obtiene es independiente de la arista y ciclo elegido. A partir de la arista seleccionada se crea una lista que la contendrá. Se añadirá a la lista aquella arista que con un punto en común con la seleccionada (no importa si se empieza por su punto inicial o final), no une a dos superficies de la Zona entre si. Con la arista añadida se repite el proceso: “añadir una arista con punto en común que no una a dos superficies entre si...”. Se continúa hasta que se cierra el recorte o no queden más aristas a incluir. Puede no quedar cerrado el recorte porque tampoco lo esté la Zona.

Esta lista de aristas representa el recorte a seguir para construir el perfil de la herramienta, aplicando ahora si, la sistemática comentada para ‘Fresado’. El eje de la herramienta es el único permitido.

- Cuando todas las superficies de la Zona son ‘semillas’ (no existen por tanto protusiones), y se alcanza solución con una de ellas (encontrando un perfil de herramienta adecuado), pero en la etapa de análisis del acceso se detecta la necesidad de situar el eje de la herramienta fuera de la Zona de Mecanizado, para que exista un ancho de mango distinto de cero. Ante esta situación el eje de la herramienta no apoyará uno de sus extremos directamente en la ‘semilla’. Ver ejemplo en la Figura 5–73 (a), donde la ‘semilla’ seleccionada es ‘S2’ (igual resultado se obtendría al tomar ‘S4’).

Aunque esta situación no afecta al proceso de construcción del perfil, si se tendrá que cuidar el análisis del acceso, para comprobar que se alcanza toda la Zona, sin entrar el eje de la herramienta en ella y sin apoyarse en la superficie ‘semilla’.

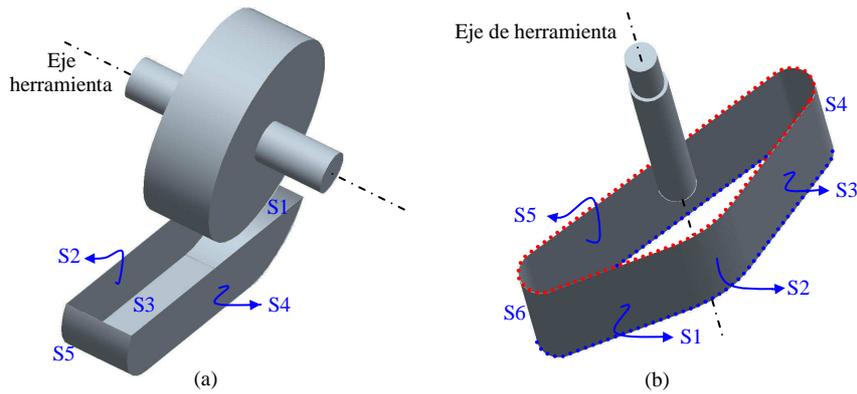


Figura 5-73. Zonas con necesidad de entidades externas para su mecanizado.

8.3. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Rectificado'

En el grupo de procesos tipo 'Rectificado por revolución', la pieza y la herramienta se encuentran girando. El primer paso para la construcción de la herramienta será determinar el eje de giro de la Zona de Mecanizado. Una vez establecido el eje de giro, el resto de etapas para la construcción de la herramienta es idéntico a las seguidas en los procesos tipo 'Fresado', pues nuevamente se trata de una herramienta de revolución.

Para elegir y determinar el eje de giro de la Zona de Mecanizado, se necesita establecer una orientación y una posición. Evidentemente, ambos parámetros están relacionados con la superficie 'semilla', aunque serán modificados y limitados por el resto de superficies de la Zona.

El tipo de 'semilla' impone ciertas condiciones al eje de giro de la Zona, como:

- Si la superficie 'semilla' es plana, debe ser normal a ella, pudiendo tomar cualquier posición.
- Si la 'semilla' es una superficie de revolución, el eje queda restringido a uno coincidente con el propio eje de giro de la superficie 'semilla', salvo en la superficie esférica donde queda posicionado pero no orientado.

La posición del eje de giro de la Zona es enormemente decisiva, ya que afecta a la validez de la geometría (entendida como la posible generación por revolución), y a las partes o regiones que quedan accesibles una vez se encuentre girando.

En resumen, para la construcción del perfil de la herramienta en un 'Rectificado por revolución' se deberá, en primer lugar, orientar el eje de giro con la superficie 'semilla', posicionarlo a partir de las superficies vecinas directas a ésta, y comprobar que la Zona es inicialmente apta para su generación por revolución. Posteriormente, se recorrerá la 'semilla' para ir construyendo el perfil de una herramienta de revolución válida para esta Zona de Mecanizado (en la construcción del perfil podrá variar la orientación del eje de la herramienta, pero no la del eje de giro de la Zona).

8.3.1. Disposición del eje de giro de la Zona de Mecanizado

En la disposición del eje de la Zona de Mecanizado se busca conocer su posición y orientación, a la vez que se verifica el alcance de la herramienta para el mecanizado de las superficies implicadas, incluida la superficie 'semilla'. Esta verificación de alcance cobra especial relevancia en el caso de superficies 'semilla' planas, donde la posición del eje de giro y la existencia de superficies vecinas que delimitan un radio de acción, pueden dejar partes fuera del alcance de la herramienta (Figura 5-74).

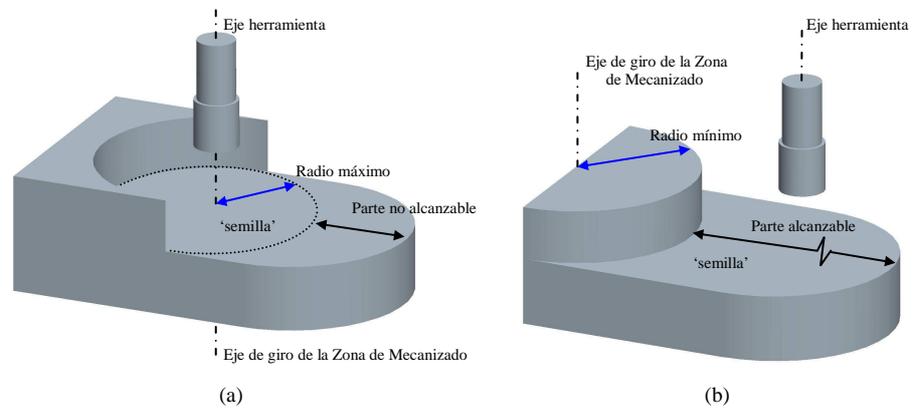


Figura 5-74. Alcance de la herramienta en un 'Rectificado por revolución'.

El alcance de la herramienta en una Zona de Mecanizado de revolución, viene restringido por la posible existencia de superficies, que delimitan la parte exterior (Figura 5-74 (a)) o que delimitan una "isla" de material coaxial al eje de giro (Figura 5-74 (b)). Los dos casos se pueden caracterizar con un valor radial (radio "máximo" y "mínimo" respectivamente). Entre estos radios se encuentra el Volumen de Mecanizado, rebasarlos implicará eliminar las superficies que delimitan a la Zona de Mecanizado.

La sistemática para establecer el eje de giro de una Zona de mecanizado y la verificación de que la Zona es de revolución, consta de los siguientes pasos:

- A partir de la superficie 'semilla' se tratará de posicionar y orientar el eje de la Zona de giro. Si quedan fijadas ambas variables, como puede ser ante superficies 'semilla' tipo cilíndrica o cónica, el resto del algoritmo servirá para realizar la primera comprobación de que la Zona realmente es de revolución. En caso de fijarse una de las dos variables, indicará que la otra no está restringida y que puede tomar cualquier valor. Será a través de la toma en consideración de las vecinas de primer orden cuando se fije completamente el valor pendiente.
- Se recorren todas las aristas de cualquier recorte de la 'semilla' de acuerdo al sentido topológico, para comprobar que las superficies vecinas:
 - Son de revolución, en caso contrario la Zona queda descartada como Zona de revolución. En este tipo de Zonas sólo la superficie 'semilla' (Figura 5-75 (a)), o una vecina normal al eje de giro, (Figura 5-75 (b)), pueden ser planas.

- Respetar los parámetros del eje de giro ya fijados por la 'semilla'. Cualquier discrepancia con la orientación y/o posición procedentes de la 'semilla' invalidan la Zona.
- El radio de la superficie vecina establece unos límites a los radios máximo y mínimo de alcance de la herramienta (si alguno de los dos no tiene valor, lo fijará, y a partir de ese momento cualquier superficie de la Zona deberá respetarlos). Si la normal topológica de la superficie vecina tiene sentido contrario a la normal geométrica, su valor en radio fijará el radio máximo de alcance para la Zona, Figura 5-74 (a). Sin embargo, si ambas normales tienen el mismo sentido, el valor del radio fijará el radio mínimo, Figura 5-74 (b).
- Si la arista tratada no tiene asociada superficie vecina dentro de la Zona de Mecanizado, se calcula la distancia (radio) entre el punto más alejado en ella y el eje de giro de la Zona, su valor deberá ser menor o igual al radio máximo para que pueda alcanzarse en el mecanizado. Si aún no está fijada la posición del eje de giro, deberá hacerse la comprobación cuando lo esté. Si queda sin fijar, indicará que no existen vecinas, por lo tanto no hay impedimentos en el alcance.

Aplicada la sistemática anterior se estará ante una de estas situaciones:

- La Zona de Mecanizado no es de revolución por cualquiera de las discrepancias comentadas, tipo de superficies que la forman, posiciones y orientaciones de ejes no compatibles, etc.
- La Zona de Mecanizado es de revolución y el eje de giro está completamente determinado. Puede procederse a la construcción del perfil con todas las superficies de la Zona.
- La Zona es de revolución, pero el eje de giro no ha quedado determinado completamente. Situación que se tiene, por ejemplo, ante una 'semilla' esférica sin vecinas, que admite cualquier orientación para el eje, o ante una superficie 'semilla' plana sin vecinas, que también admite cualquier posición, y que además, al llamar al procedimiento de construcción del perfil indicará que acepta cualquier forma de herramienta.

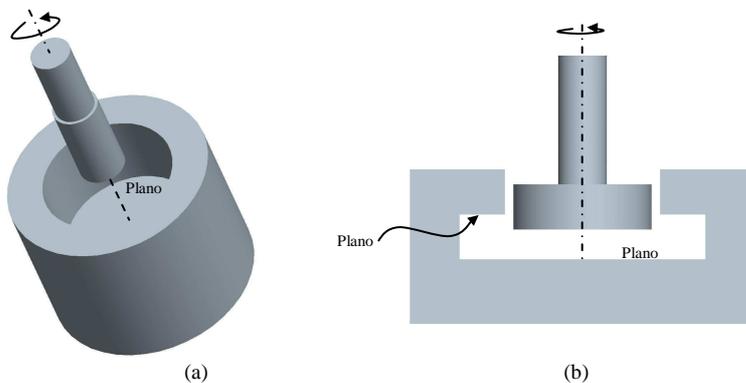


Figura 5-75. Zonas con planos para un 'Rectificado por revolución'.

8.3.2. Construcción del perfil de la herramienta

Una vez establecido el eje de giro de la Zona de Mecanizado, se pasa a la construcción del perfil adecuado para obtener las superficies que la componen. La metodología a seguir coincide con la aplicada en los procesos tipo 'Fresado', con la particularidad de que en el 'Rectificado por revolución' se dispone de un mayor número de restricciones geométricas, que simplifican su aplicación. Por ejemplo, no se aceptan superficies planas (salvo las perpendiculares al eje de giro), o superficies de revolución con ejes no coaxiales al de giro de la Zona.

La forma de llevar a cabo la compatibilidad entre perfiles coincide con la de los procesos tipo 'Fresado', ya que también se trata de herramientas de revolución. La única diferencia es que al recorrer las aristas de la superficie 'semilla' el eje 'Z' no se se traslada únicamente, rota en función del ángulo avanzado respecto al eje de giro de la Zona, contemplado así el hecho de que la Zona gira.

Al igual que en 'Fresado', el eje de la herramienta puede cambiar de orientación si la geometría así lo requiere. Debe recordarse que en los procesos tipo 'Rectificado por revolución', la orientación del eje de la herramienta no queda restringida a una paralela al eje de giro de la Zona de Mecanizado, como se verá en los ejemplos, aunque sí encuentra bastantes limitaciones.

En la Figura 5-76 (a) se muestra una Zona de Mecanizado válida, donde la superficie 'semilla' no es plana, se trata de una superficie cilíndrica. El eje de la herramienta no coincide con el de giro de la Zona. Esta situación se admite siempre que se respete la compatibilidad con el resto de superficies de la Zona, y siempre que el perfil resultante, con la inclinación adecuada del eje, no tenga ningún impedimento geométrico.

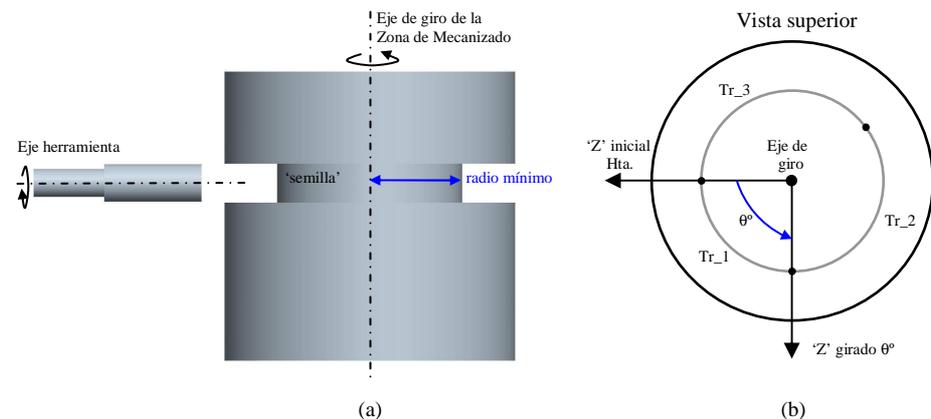


Figura 5-76. 'Rectificado por revolución' con herramienta inclinada.

En la vista superior de la pieza, Figura 5-76 (b), se aprecia que la 'semilla' está formada por tres superficies cilíndricas compatibles, enlazadas por los tramos 'Tr_1', 'Tr_2' y 'Tr_3', representados en gris. Al recorrer la 'semilla' para contruir el perfil, pasando por cada punto de unión de estos tramos, el eje 'Z' del sistema de coordenadas asociado a la herramienta deberá ser reorientado, como se indica.

8.3.3. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta

Aunque la sistemática para la construcción del perfil ya ha sido vista en detalle en la explicación y ejemplos de los procesos tipo 'Fresado', se aprovecha este apartado para mostrar diversas situaciones que refuerzan las características particulares que poseen los procesos tipo 'Rectificado por revolución'.

- En la Figura 5-77 se muestra un ejemplo en el que la superficie tomada como 'semilla' es plana, y está formada por una arista circular y tres del tipo línea. Las flechas en color verde indican el sentido topológico del recorte exterior en la 'semilla'. El eje de giro de la Zona queda orientado por la propia 'semilla' (normal a ella) y posicionado por la superficie vecina cónica que existe en el tramo curvo.

Debido a la forma de la 'semilla' existen partes no alcanzables, por lo que no podrá mecanizarse la Zona por completo y se descartará. Sin embargo, si existe herramienta capaz de generar la vecina de primer orden (superficie cónica). En el ejemplo se muestra el Plano de Construcción en dos puntos contiguos del recorte exterior de la 'semilla', incluyendo en azul el perfil de la herramienta que se obtendría.

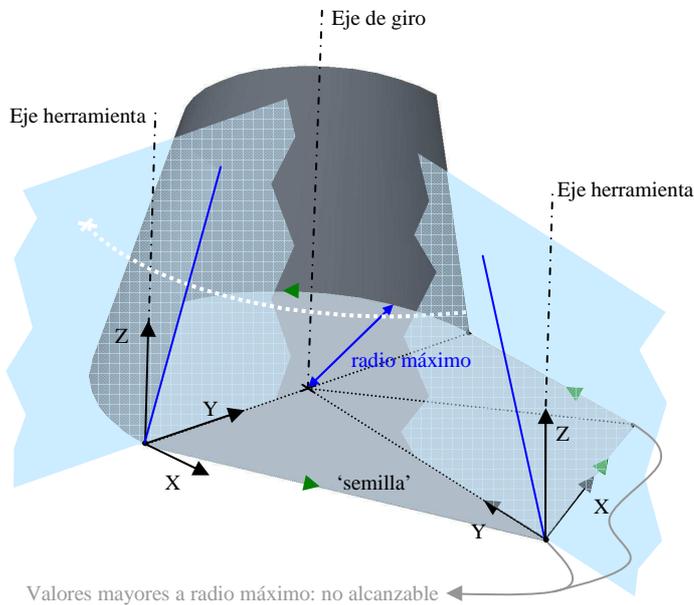


Figura 5-77. Alcance y perfil de la herramienta en Zona de Mecanizado ejemplo.

- En la Figura 5-78 se muestra una Zona de Mecanizado apta para ser generada con un proceso tipo 'Rectificado por revolución'. En ella se tiene una superficie 'semilla' plana, en cuyo centro se sitúa el eje de giro de la Zona, orientado por la propia 'semilla' y posicionado por las vecinas de primer orden: 'Toro_1' y 'Toro_2'.

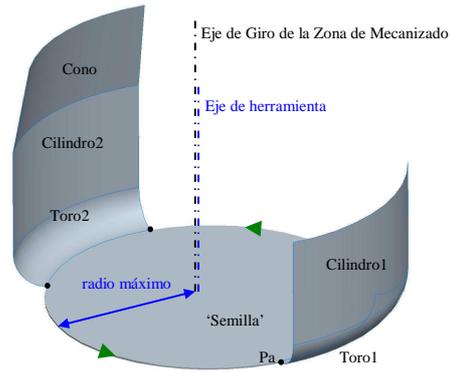


Figura 5–78. Zona de Mecanizado para un 'Rectificado por revolución'.

El resto de superficies vecinas confirman que la Zona es de revolución, y le dan forma a un perfil de herramienta capaz de generar a todas las superficies incluidas en ella. Empezando por el punto 'Pa', en la Figura 5–79, se muestran las distintas proyecciones circulares que conforman el perfil de la herramienta. Los tramos resultado de estas proyecciones son compatibles entre si, eliminándose aquellos que se repiten o solapan.

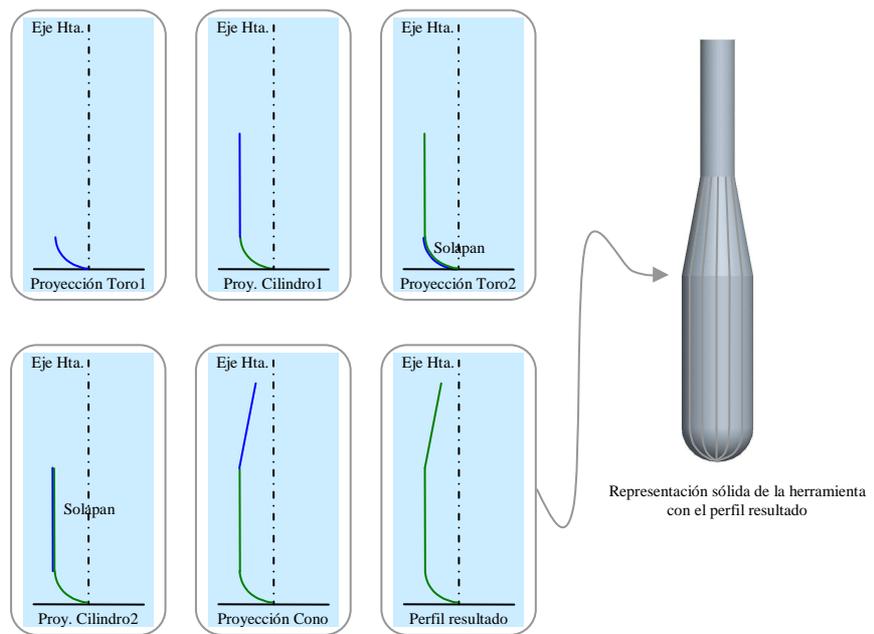


Figura 5–79. 'Proyección de las superficies, perfil y herramienta admisible'.

- En la Figura 5–80 se presenta un ejemplo de Zona de Mecanizado válida que incluye una protusión. En la figura, las flechas en azul indican el sentido topológico del

recorrido para el recorte exterior de la superficie 'semilla', las flechas en verde indican el sentido para el recorte interior.

En la parte derecha de la Figura 5–80 se muestran las proyecciones de las superficies de la Zona de Mecanizado y una representación de la posible herramienta (tipo "cola de milano"). En las proyecciones se han ido eliminando los solapes y repeticiones de tramos.

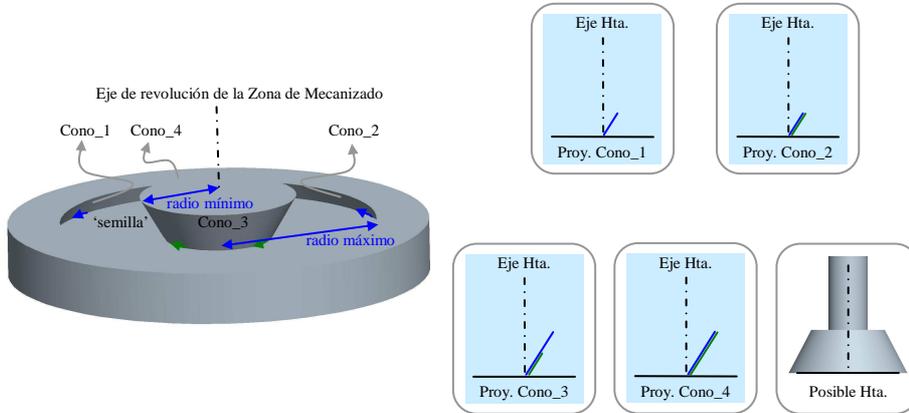


Figura 5–80. Protusión en un proceso tipo 'Rectificado por revolución'.

8.4. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Limado'

En este tipo de procesos, en el que la pieza y la herramienta no giran, las geometrías generadas se obtienen al trasladar el perfil de la herramienta a lo largo de una trayectoria que debe ser rectilínea. La propia sección de la herramienta y la trayectoria sobre la superficie 'semilla', determinan en gran medida la forma geométrica obtenida. Entre los procesos más representativos en este grupo se encuentran: el Limado, el Cepillado, el Mortajado y el Brochado.

Aprovechando la facilidad de representación de las geometrías en un proceso tipo 'Limado', cabe recordar que al igual que sucede en cualquier proceso de la clasificación, al realizarse un solape de la herramienta entre pasadas consecutivas de avance, la geometría obtenida depende, tanto de la punta de la herramienta como de las condiciones de corte. A su vez, las irregularidades (marcas) producidas por el solape, junto con el tipo de herramienta y las condiciones de corte, influyen directamente en el acabado superficial.

En la Figura 5–81 se muestra un ejemplo exagerado de lo comentado, donde se aprecian las irregularidades ocasionadas por un menor solape entre pasadas consecutivas. Estas irregularidades no aparecerán en el modelo geométrico de la pieza (de aparecer, el tratamiento sería completamente distinto, pues no habría una única Zona de Mecanizado que las incluyera a todas).

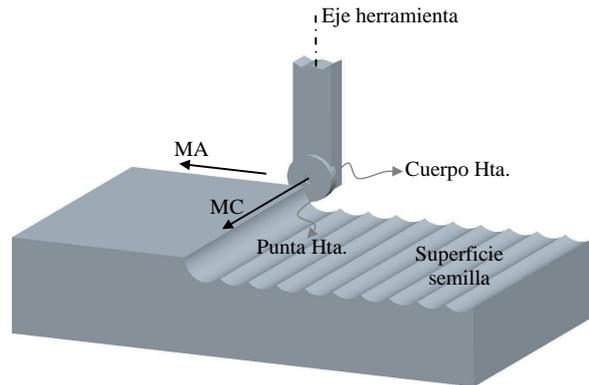


Figura 5-81. Ejemplo de aplicación de un proceso tipo 'Limado'.

Dentro de los procesos tipo 'Limado' se encuentra el Brochado, Figura 5-82. Aunque sus características (eje paralelo al movimiento de corte, posibilidad de trabajar una zona cerrada pasante, avance en más de una dirección y sentido), son ligeramente diferentes al resto de procesos del grupo, mantiene el mismo procedimiento de construcción del perfil de la herramienta. Una vez obtenido el perfil, y ante alguna de estas características propias, y de la accesibilidad, quedará confirmada su aplicación.

En los procesos tipo 'Limado', se realiza siempre una proyección lineal sobre el Plano de Construcción. Una de las primeras acciones será establecer el eje de la herramienta a partir de la superficie 'semilla', y con él, el Plano de Construcción.

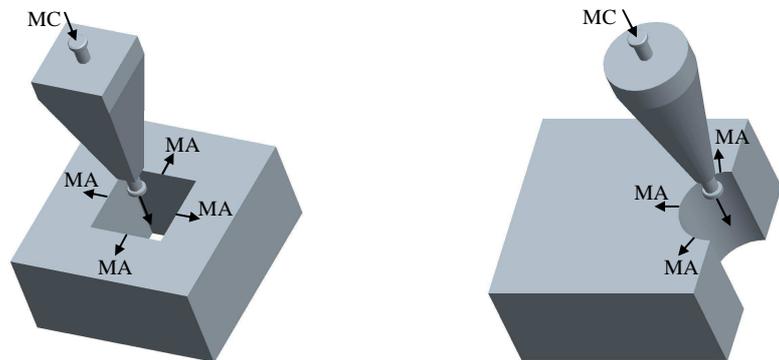


Figura 5-82. Ejemplo de proceso tipo 'Limado' en la modalidad de brochado.

A efectos prácticos del reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, no se va a distinguir entre procesos concretos (como en este caso, el Brochado, Cepillado, Limado,...). La asociación a un proceso concreto dependerá de factores ajenos al reconocimiento, por ejemplo, se optará por un Brochado ante un perfil de herramienta cerrado o con tramos a ambos lados, que por condiciones de

corte invaliden la aplicación de otro proceso del grupo.

8.4.1. Disposición del eje de la herramienta

Como en los procesos anteriores se selecciona una superficie 'semilla', a partir de la cual se establece un sistema de coordenadas, cuyo plano 'YZ' se utiliza para proyectar y construir el perfil de la herramienta. En este caso, al ser la herramienta plana, el eje 'Z' no tiene que ser el eje de simetría de la herramienta, sino que debe verse como una referencia para construir el perfil y mango de la herramienta. Sin embargo, la forma y orientación final del mango quedará establecida una vez se conozca el perfil completo y se analice el acceso. En la Figura 5-83 se pueden ver distintas disposiciones del mango sobre un mismo perfil, para una misma Zona de Mecanizado.

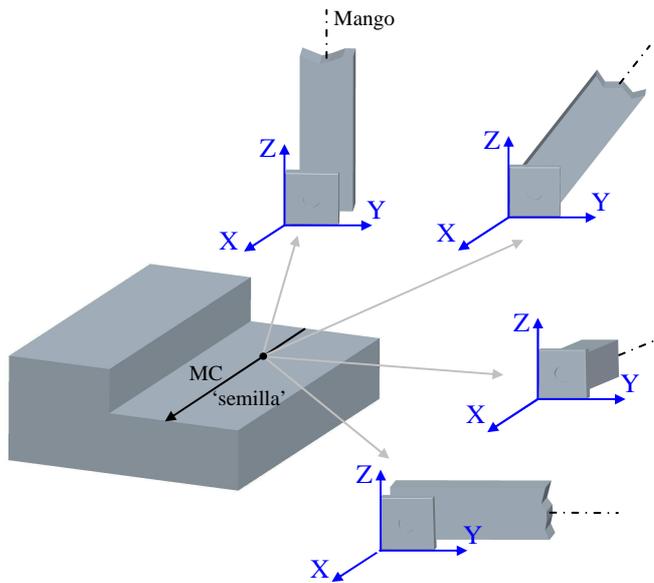


Figura 5-83. Eje de herramienta ante 'semilla' plana.

Para establecer la orientación del sistema de coordenadas, el eje 'Z' se dispone normal a la 'semilla', el eje 'X' se dispone siguiendo la trayectoria de corte. Será la propia dirección del movimiento de corte la seguida como dirección de proyección. Por lo tanto, el lado izquierdo del perfil, tomado como referencia al eje 'Z', será independiente del derecho. Se utiliza el mismo procedimiento de proyección del perfil que en 'Fresado', para lo cual, se tomará como eje de herramienta uno coincidente con la normal topológica a la superficie 'semilla', en el punto considerado.

Puesto que el movimiento de corte es rectilíneo y la sección de la herramienta se mantiene constante, las formas geoméricamente válidas estarán compuestas por superficies planas y/o cilíndricas (Figura 5-84).

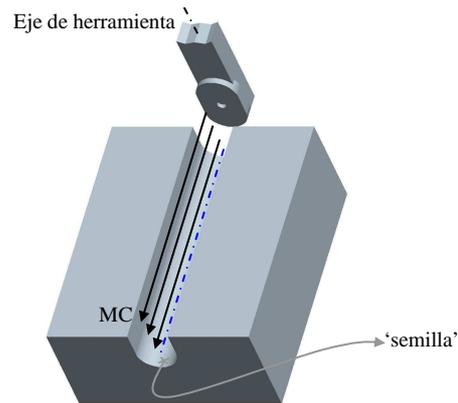


Figura 5-84. Disposición del eje de herramienta ante superficie 'semilla' cilíndrica.

8.4.2. Construcción del perfil de la herramienta

Una vez seleccionada la superficie 'semilla' se recorrerán todas las aristas de sus recortes para proyectar las superficies vecinas. La dirección de proyección lineal es siempre la misma, se empieza en el punto de inicio de cualquiera de las aristas en su recorte exterior, se construye el sistema de coordenadas con el eje 'Z' normal a la 'semilla', el eje 'X' sigue la tangente topológica a la arista y el eje 'Y' es el resultado del producto vectorial de los dos anteriores, con el sentido de la normal topológica a la arista en ese punto. Sin embargo, en los procesos tipo 'Limado', al recorrer las aristas según su sentido topológico, el sistema de coordenadas de la herramienta (y por tanto el Plano de Construcción) no es recalculado ni cambiado de orientación, simplemente se traslada a la nueva localización con la orientación que tenía.

Es de especial importancia el eje 'X', ya que sigue la dirección del movimiento de corte, y en este grupo de procesos una vez fijada la dirección no se admite variación. El Plano de Construcción será 'YZ'.

Si la 'semilla' es plana, la primera arista que se encuentre y que de paso a una superficie vecina marcará la dirección del movimiento de corte, y por tanto, la dirección de proyección. Si la 'semilla' es cilíndrica, esta dirección coincidirá con el eje del cilindro. Una vez concretada la dirección de corte, cualquier superficie vecina que se encuentre sólo podrá estar situada de tal forma que pueda generarse por traslación a lo largo de ese movimiento de corte.

Al ir recorriendo las aristas del recorte de la 'semilla' en busca de superficies vecinas, es importante controlar a que lado del perfil afecta el resultado de la proyección de cada una. Para lo cual, se puede realizar una comparación entre la normal topológica de la superficie tratada y el sentido del eje 'Y'.

Siguiendo la metodología general, sobre el perfil construido se comprobará cualquier aspecto físico que impida la generación por traslación de la Zona de Mecanizado, por ejemplo, la existencia de superficies vecinas con distinta inclinación y que afecten al mismo lado del perfil, la aparición de uniones tangentes y no tangentes entre tramos a una misma altura y a un mismo lado del perfil, o cualquier otro tipo de

inconsistencia geométrica que impida la existencia de forma de herramienta válida.

Anulará la aplicación de un proceso tipo 'Limado', aquellas Zonas de Mecanizado con superficies distintas a las comentadas (planas y cilíndricas), o dispuestas de forma no favorable a una generación por traslación. En la Figura 5-85 (a) puede verse una Zona de Mecanizado con una superficie tórica, mientras que en la Figura 5-85 (b) se ve una Zona con una superficie cilíndrica y con un eje no paralelo al movimiento de corte. Ambos ejemplos no pueden generarse por 'Limado'.

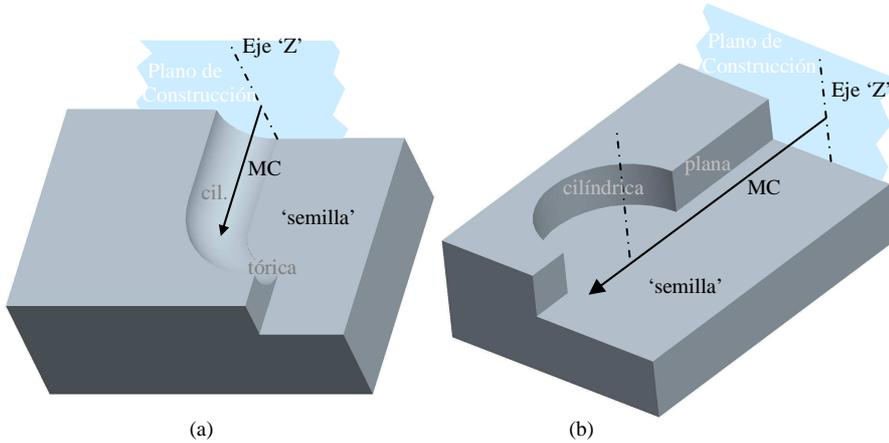


Figura 5-85. Zonas de Mecanizado no aptas para un proceso tipo 'Limado'.

Otro aspecto a considerar es la existencia de salientes en las superficies de la Zona de Mecanizado. En la Figura 5-86 puede verse la influencia de una protusión en un proceso tipo 'Limado', a ambas partes del eje de referencia del perfil aparecen zonas cerradas, resultado de recorrer la protusión de la superficie semilla y proyectar las superficies normales al movimiento de corte. La línea en verde, situada en el Eje 'Z', es el resultado de la proyección de 'S1'. Al encontrar más de dos tramos proyectados para definir la parte derecha e izquierda del perfil la herramienta no mantiene la validez física, es irrealizable.

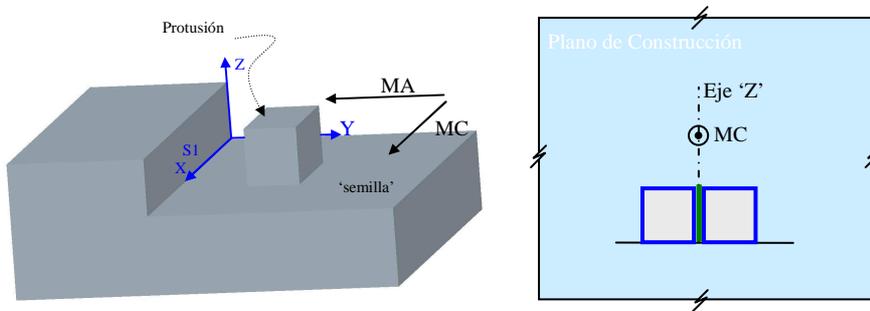


Figura 5-86. Efecto de una protusión en un proceso tipo 'limado'.

Como se ha indicado, debe tenerse en cuenta la parte del perfil, derecha o izquierda, a la hora de proyectar tramos y comprobar validez. En la Figura 5-87 se muestra una Zona con perfil a ambos lados del eje de la herramienta.

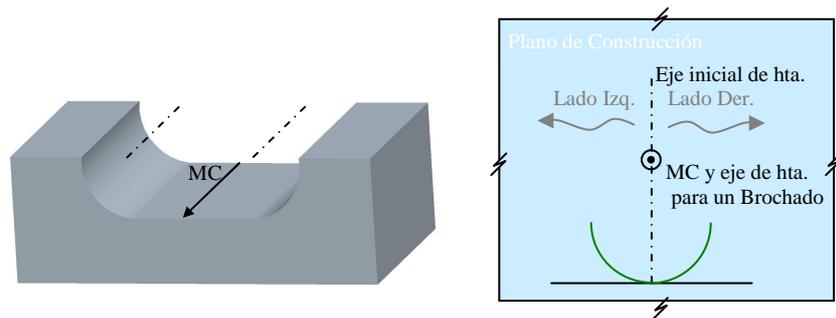


Figura 5–87. Ejemplo de Zona de Mecanizado apta para un Brochado.

8.4.3. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta

En el ejemplo de la Figura 5–88 se muestra una Zona de Mecanizado en la que puede aplicarse un proceso del tipo 'Limado'. Si se toma como 'semilla' la superficie plana, su única vecina de primer orden pasa a ser la cilíndrica, a través de la cual se alcanza a otras dos superficies planas.

En la figura, las puntas de flecha en color verde indican el sentido topológico del recorte exterior de la 'semilla'. Los puntos marcados como, 'P1', 'P2', 'P3' y 'P4', coinciden con los de definición de las aristas, y en este caso, con las posiciones por las que se trasladará el Plano de Construcción.

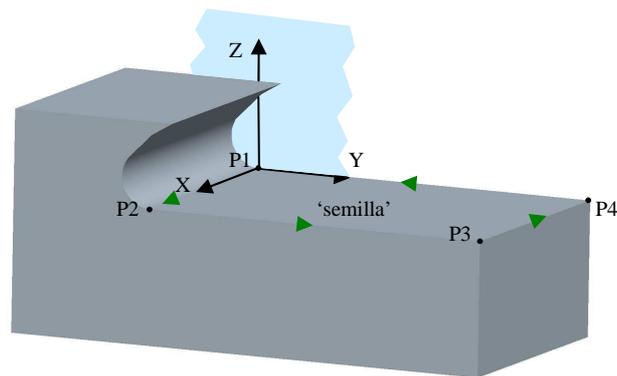


Figura 5–88. Ejemplo de Zona de Mecanizado abierta y válida.

La geometría de la Zona va marcando el proceso de construcción del perfil. En este grupo de procesos la primera superficie vecina a la 'semilla' fija el movimiento de corte, y por tanto el eje 'X', con el Plano de Construcción normal a él.

En la Figura 5–89 se han representado las proyecciones lineales que se obtienen al aplicar el procedimiento de construcción del perfil en la situación comentada. Se muestra en azul lo que se proyecta en cada paso, y en verde la forma que va tomando el perfil una vez comprobada su compatibilidad.

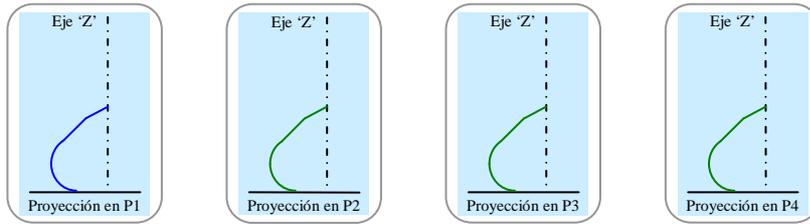


Figura 5–89 Resultado de las proyecciones en los cuatro puntos de la ‘semilla’.

En la Figura 5–90 se presenta una Zona de Mecanizado tipo “cajera pasante”, para un proceso del grupo ‘Limado’. La superficie ‘semilla’ es una de las caras planas de la Zona. Al construir el perfil de la herramienta se encuentran tramos a ambos lados del eje de referencia, Eje ‘Z’, quedando un perfil cerrado. En la misma Figura 5–90, se muestran los estadios del Plano de Construcción (mostrado en azul claro) que se obtienen durante la construcción del perfil, al ir proyectando las diferentes superficies vecinas a la ‘semilla’.

Físicamente puede existir una herramienta con esta sección, para un mecanizado realizando una traslación de la misma, con una sujeción (mango) normal a ella. Ante esta situación, en el análisis del acceso se detectará que el proceso concreto capaz de mecanizarla es un Brochado.

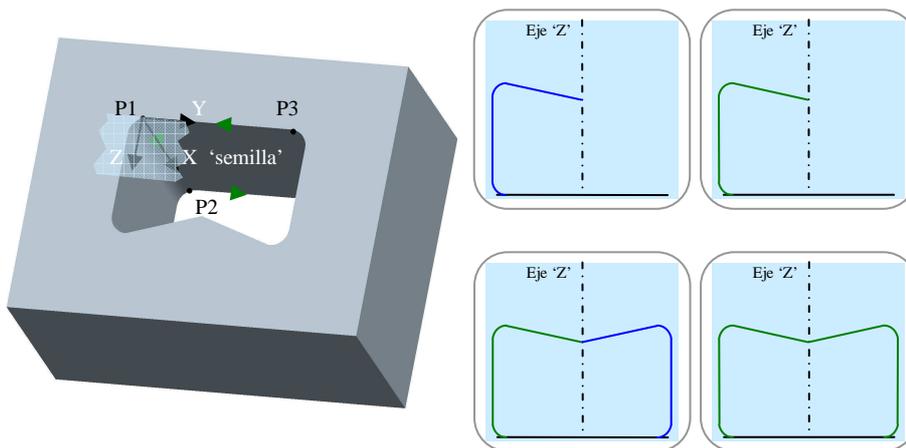


Figura 5–90. Ejemplo de Zona de Mecanizado cerrada y válida.

El perfil obtenido para la Zona de Mecanizado de la Figura 5–90, es un claro ejemplo de que en el grupo de procesos tipo ‘Limado’, el Eje ‘Z’ es simplemente una referencia y no debe tomarse directamente como el eje de la herramienta. Pueden existir ciertas restricciones impuestas por el propio perfil de la herramienta, que obliguen a tomar un eje de herramienta distinto.

8.5. Construcción de la herramienta en los procesos tipo 'Torneado'

Los procesos agrupados bajo esta denominación tienen como característica el giro que posee la Zona de Mecanizado. Para su generación se utiliza una herramienta plana, cuyos movimientos se sitúan en un plano, el Plano de Trabajo.

Al no ser la herramienta de revolución y aprovechar el solape en la dirección del avance entre partes de la herramienta, ésta no va a tener restricciones con los tramos que la componen. Estos podrán ser rectos o curvos, con transición tangencial entre ellos o no, pudiendo incluso presentar perfiles distintos a ambos lados del eje de la herramienta, ver Figura 5-91. En una situación límite, la herramienta podría ser una "línea", que al moverla por el Plano de Trabajo generará las superficies de la Zona de Mecanizado. En definitiva, existe una clara independencia entre la forma/perfil de la herramienta y la forma/perfil de la Zona de Mecanizado.

En el grupo de procesos tipo 'Torneado' se utiliza la misma operativa vista en el resto de grupos, con una diferencia: aunque el perfil que se obtiene es el negativo correspondiente a las superficies de la Zona de Mecanizado, no es recomendable asignarlo directamente a la herramienta, debe buscarse una equivalencia con unos perfiles de herramienta genéricos. Esta búsqueda permite:

- Tener tipificadas un número limitado de formas posibles de herramienta, para reducir la diversidad de resultados y buscar posteriormente compatibilidades entre Zonas de Mecanizado.
- Obtener las orientaciones menos restrictivas, y por lo tanto las más probables, comprobando el alcance y validez del perfil en todas las partes de la Zona de Mecanizado.

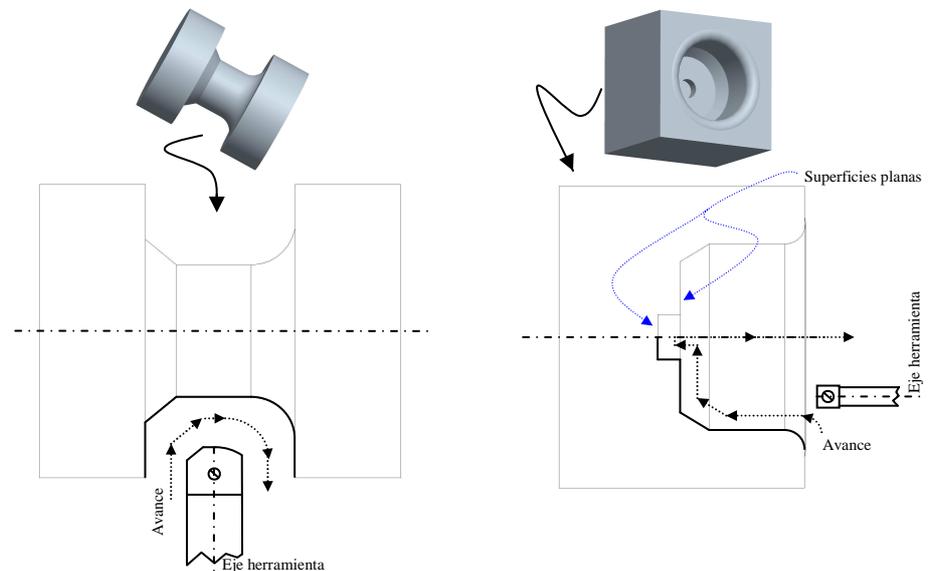


Figura 5-91. Zonas de Mecanizado y herramientas para un tipo 'Torneado'.

No se realiza distinción alguna entre el trabajo exterior, trabajo radial, frontal o interior, ya que no afecta a la operativa seguida. La distinción entre el tipo de trabajo a llevar a cabo se puede realizar posteriormente, en función del acceso a la Zona de Mecanizado y respecto a su eje de giro.

8.5.1. Disposición del eje de giro de la Zona de Mecanizado

El eje de giro de la Zona de Mecanizado en las piezas de revolución, suele coincidir con el eje de giro de la propia pieza. Aunque debe quedar claro, que al igual que en los procesos tipo 'Rectificado por revolución', el eje de giro de la Zona de Mecanizado puede ser independiente al de la propia pieza. Se deja fuera del ámbito del reconocimiento cualquier decisión o actuación relacionada con el amarre y/o equilibrado de la pieza debido a su forma geométrica.

Antes de construir el perfil de la herramienta capaz de generar la Zona de Mecanizado, es necesario establecer la posición y orientación del eje de giro de la misma, así como realizar una primera valoración como geometría alcanzable por revolución. El procedimiento que se sigue, en la búsqueda de la posición y orientación del eje de giro, coincide plenamente con el explicado en los procesos tipo 'Rectificado por revolución'. Contemplando el problema de forma aislada, se observa que en ambos casos se trata de zonas de revolución.

8.5.2. Construcción del perfil de la Zona de Mecanizado

Analizando los aspectos correspondientes a la construcción del perfil de la herramienta, y aunque en este grupo de procesos la herramienta que se empleará en el mecanizado es plana, se concluye que es factible utilizar una sistemática similar a la seguida en los procesos tipo 'Rectificado por revolución', sin embargo, el perfil obtenido no va a ser directamente el de la herramienta, será el perfil generatriz de la Zona de Mecanizado, a partir de él se construirá el perfil de la herramienta plana.

En este grupo de procesos, las proyecciones que se realicen serán todas "radiales", como en los procesos tipo 'Rectificado por revolución'. En ambos procesos Tipo la pieza (Zona de Mecanizado) se encuentra en revolución, por lo tanto, el perfil sobre el que se apoyará la construcción de la herramienta provendrá, de forma directa o indirecta (como a continuación se verá), del perfil que tenga la Zona.

Sin embargo, en el proceso tipo 'Torneado', al no obtenerse directamente el perfil de la herramienta, la superficie 'semilla' también deberá proyectarse. El resultado es el perfil de la Zona de Mecanizado, será a partir de él y teniendo en cuenta los movimientos de avance característicos del grupo y la condición de la herramienta, herramienta plana, cuando se construirá el perfil genérico para la herramienta.

En caso de que el perfil de la Zona intersecte (toque) con el propio eje de giro de la Zona de Mecanizado, situación que se da ante un trabajo interior, se tomará como perfil resultado el obtenido para la Zona de Mecanizado, más su simétrico, tratándolos, a todos los efectos, como un único perfil.

8.5.3. Determinación del perfil genérico de la herramienta

Durante la obtención del perfil tipificado para la herramienta, a partir del perfil de la Zona de Mecanizado, se contemplará la posibilidad de generar superficies aprovechando el solape entre partes de la herramienta según el movimiento de avance sobre el Plano de Trabajo.

Por tratarse de una herramienta plana, el perfil comentado en el punto anterior podrá tomarse como el perfil completo de la herramienta capaz de generar la Zona de Mecanizado. Esta generación se llevaría a cabo con tan sólo aproximar y retirar en línea recta a la herramienta.

Aún así, no todas las geometrías generables con un proceso tipo 'Torneado' admiten una aproximación y retirada tan simple. Además se obtendrían tantas herramientas como geometrías a mecanizar se encuentren, trabajando siempre con herramientas de forma.

A partir del perfil de la Zona de Mecanizado obtenido, se realizan unas transformaciones que permiten establecer las herramientas 'tipo' válidas. Al existir múltiples formas de herramienta capaces de reproducir la misma Zona, se selecciona una forma válida y tipificada, con la que poder comparar herramientas en la etapa de 'Agrupación de Elementos Característicos de Mecanizado', por ejemplo.

Para establecer unas herramientas 'tipo', se distinguen tres situaciones posibles en el perfil de una Zona de Mecanizado, en función de los tramos inicial y final del mismo: 'divergencia', 'paralelismo' y 'convergencia', Figura 5-92. Para distinguir entre las tres situaciones, se comprobará si se produce intersección entre la tangente al primer tramo (TA) y la tangente al último tramo (TB) del perfil de la Zona. Calculadas en su primer y último punto. Las tangentes deberán prolongarse hacia la parte donde no está el material (hacia fuera de la pieza).

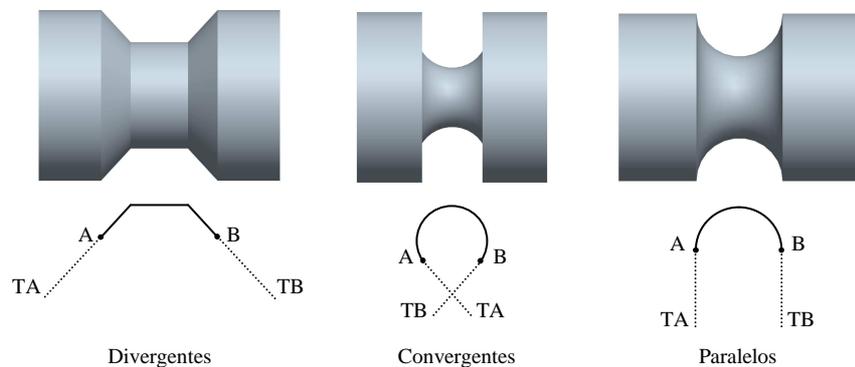


Figura 5-92. Situación de 'convergencia' o 'divergencia' en el perfil reconstruido.

Esta clasificación del perfil, permite reducir el número de parámetros en el caso de perfiles 'divergentes' y 'paralelos', aportando una mayor facilidad para tipificar y realizar comparaciones entre herramientas. La sistemática que se sigue en la construcción de la herramienta también se ve afectada por la clasificación, ya que se reduce considerablemente, una vez se descarta que no se trata de un perfil convergente.

Se ha optado por no incluir el perfil 'paralelo' en el grupo de 'divergentes', ya que en el paralelo la herramienta empieza a tener mayores restricciones en la orientación de su eje y en las formas admisibles, permitiendo su tratamiento por separado un mejor ajuste de los parámetros para su tipificación.

Perfil divergente

En los perfiles divergentes siempre existirá una herramienta capaz de mecanizar la Zona. Una de sus múltiples formas coincide plenamente con la del perfil de la Zona a Mecanizar, ya que no hay problemas en la entrada o salida de la herramienta.

La forma genérica de la herramienta 'tipo' seleccionada en estos casos, se corresponde con una triangular. Su definición se apoya en los puntos 'A' y 'B' de comienzo y fin del perfil obtenido, quedando su punta en la intersección entre las tangentes 'TA' y 'TB', prolongándolas hacia donde está el material. La base quedará cerrada tras la unión de los puntos 'A' y 'B' a través de una línea recta, Figura 5–93.

Trabajando con herramientas triangulares, se aseguran las condiciones mínimas necesarias para mecanizar la Zona implicada. Estas son:

- Un punto, la intersección de 'TA' y 'TB' con el que reproducir el perfil. Evidentemente este punto no representa un canto perfecto, agudo, entre 'TA' y 'TB', existirá una transición posiblemente redondeada entre ellos, al igual que con una herramienta real. No se entra, por razones obvias, a determinar el radio de acuerdo. Se sabe que existe y ya se seleccionará el adecuado en su momento.
- El ángulo entre las tangentes 'TA' y 'TB', representa el ángulo máximo que puede tener la herramienta para alcanzar todas las partes del perfil obtenido, evitando "talonar".
- La normal al tramo que une los puntos 'A' y 'B', representará al eje más probable de la herramienta. El ancho del mango está limitado por la longitud del tramo que une a los puntos 'A' y 'B'.

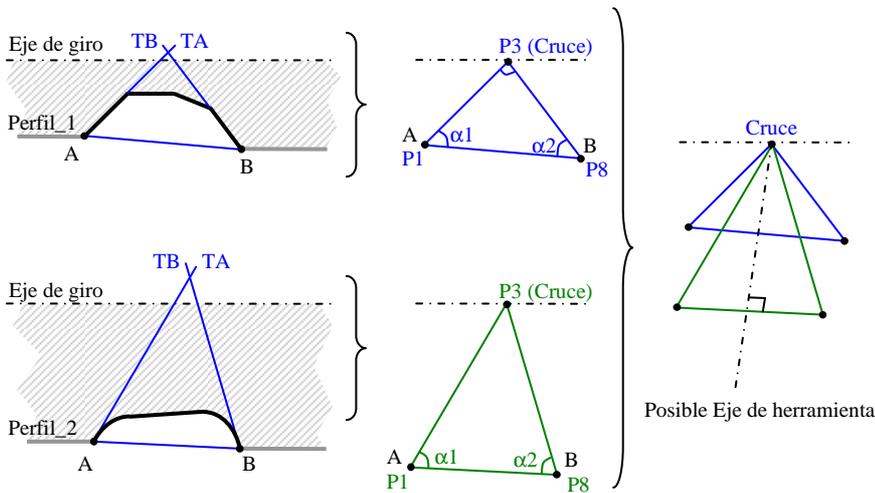


Figura 5–93. Perfiles resultado, herramientas y compatibilidad entre ellas.

En la Figura 5-93 se muestra la obtención de herramientas 'tipo' (triangulares) para dos Zonas diferentes, los parámetros que se usan para su definición y una posible compatibilidad entre ellas, donde se ha hecho coincidir los puntos de cruce de ambas herramientas, manteniendo paralelos los ejes de giro de la Zona de Mecanizado. En esta situación puede verse que una herramienta queda completamente dentro de la otra, esto significa que son compatibles, con las dimensiones de la menor y su disposición de eje, permitiendo el mecanizado de ambos perfiles con la misma herramienta. Respecto a los parámetros necesarios para la definición de una herramienta triangular (ver Figura 5-51), se usan los puntos 'P1', 'P3' y 'P8', junto con los ángulos ' α_1 ' y ' α_6 '. Además, ' $\alpha_1 = \alpha_6 < 180^\circ$ ', ' $R_1 = R_2 = 0$ ', ' $P_3 = P_4 = P_5 = P_6$ ' y ' $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ ', dejan de tener sentido.

Una situación que puede darse, y que debe ser controlada puesto que se tiene toda la información para ello, es la existencia de compatibilidad entre herramientas a través de una tercera, composición de las dos implicadas y que sea apta para el mecanizado de ambos perfiles. Como puede deducirse, debe hacerse un tratamiento geométrico de las formas de las herramientas para establecer compatibilidades entre dos o más. En este punto, lo único que se pretende es obtener unos datos y unas formas, lo más genéricas posibles, que lo permitan.

Otra información que puede extraerse a partir de los datos de las herramientas obtenidas, es el tipo de operación a realizar, exterior, interior o en una cara perpendicular al eje de giro. Para ello, bastará analizar la disposición del eje de la herramienta respecto al eje de giro de la Zona de Mecanizado, y del lugar que ocupa el material de la pieza, como se aprecia en el ejemplo de la Figura 5-94.

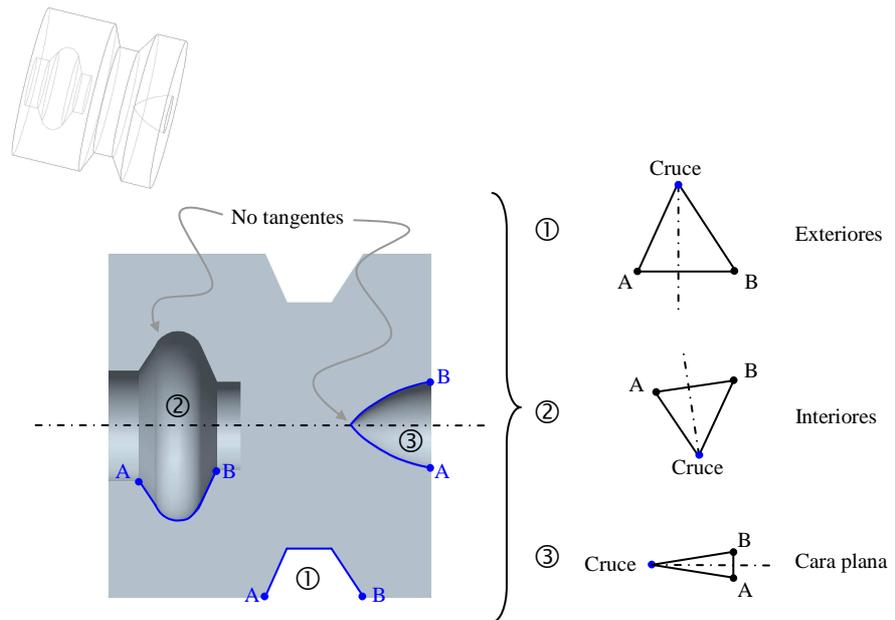


Figura 5-94. 'Operación' en función de la disposición del eje de la herramienta.

Perfil convergente

En un perfil ‘convergente’, la abertura de entrada/salida es menor que la zona que encierra el perfil y que deberá recorrerse en el mecanizado. Por tanto, el ancho de la herramienta estará limitado, siendo necesario comprobar que se alcanzan todas las partes del interior.

En el caso de perfiles convergentes, hay ciertos tramos, o partes de tramos del perfil (sobre todo los que contienen al punto ‘A’ y ‘B’) que no van a ser mecanizados con la punta de la herramienta, sino con un lateral o incluso con la parte posterior de la misma. La zona no accesible a la punta de la herramienta va a determinar en gran medida la forma que ésta va a tomar.

Ante una condición de convergencia queda sin aplicación la herramienta genérica triangular, ya que no puede acceder a todos los tramos, y en caso de poder hacerlo no dejaría la forma adecuada. Es necesario definir otras herramientas genéricas.

Teniendo en cuenta que los tramos que integran a cualquier perfil van a ser líneas o arcos de circunferencia, enlazados en cualquier orden, y que la relación entre tramos vecinos puede ser de tangencia, o no, se establecen tres tipos diferentes de herramientas: ‘Circular’, ‘Punta curva’ y ‘Filos rectos’, como se aprecia en la Figura 5–95, donde aparecen en azul aquellos parámetros de la herramienta plana genérica empleados (Punto 6.2). Al tener tres tipos de herramienta diferenciados se facilita su obtención y posterior comparación con otras.

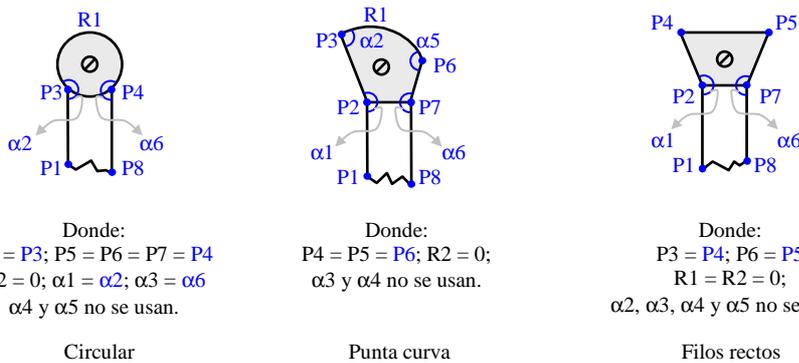


Figura 5–95. Herramientas genéricas para un perfil convergente.

Para poder seguir la sistemática empleada en la obtención de estas herramientas genéricas ante un perfil de la Zona convergente, es necesario definir las siguientes variables que se utilizarán (ver Figura 5–96):

- ‘A’ y ‘B’, son los puntos de entrada y salida al perfil de la Zona de Mecanizado.
- ‘TA’ y ‘TB’, son las tangentes a los tramos primero y último de la Zona de Mecanizado, en los puntos ‘A’ y ‘B’ respectivamente.
- ‘Bisectriz’, se corresponde con la bisectriz de las tangentes.
- ‘l’, es la distancia entre la recta paralela a la bisectriz que pasa por el

punto 'A', y el punto más alejado del perfil en la parte izquierda, medido siempre normal a esta recta paralela a la bisectriz.

- 'D', es la distancia entre la recta paralela a la bisectriz, y que pasa por el punto 'B', y el punto más alejado del perfil en la parte derecha, medido siempre normal a esta recta paralela a la bisectriz.
- 'E', es la distancia entre las dos rectas paralelas a la bisectriz, las que pasan por 'A' y 'B' respectivamente.

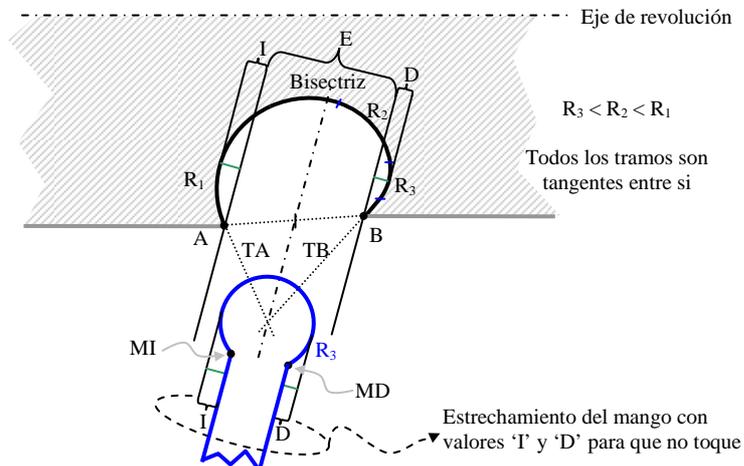


Figura 5-96. Ejemplo de perfil con todos los tramos tangentes entre sí.

Cualquier tramo que forme parte del perfil construido para la Zona, puede generar una herramienta válida si converge con la tangente 'TA' o con 'TB', realizando las prolongaciones para ver dicha intersección hacia el interior de la Zona, normalmente hacia el eje de giro de la Zona de Mecanizado. Si se trata de un tramo curvo, se prolongará la recta que une los puntos inicial y final de definición del tramo. Cada tramo que cumpla con esta condición pasará a ser punta de herramienta, pudiendo generar una herramienta válida. De esta manera, se asegura que el punto más alejado de la Zona puede ser alcanzado en el mecanizado, dejando un espesor para el mango mayor de cero.

En la sistemática de construcción de la herramienta genérica, después de haber trazado las entidades correspondientes a las variables comentadas, acordes a su definición, debe tenerse en cuenta que:

- Si sólo existen tramos rectos, estos serán no tangentes entre sí. Sólo existirán herramientas del tipo 'Filos rectos' capaces de mecanizar la Zona.
- Cuando todos los tramos son tangentes entre sí, existiendo tramos rectos y curvos, puede encontrarse una herramienta de 'Filos rectos' que lo mecaniza.
- Cuando todos los tramos son curvos, no existe herramienta de 'Filos rectos' capaz de mecanizarlos.
- Si todos los tramos de la Zona de Mecanizado son tangentes entre sí, seguro

que al menos uno es curvo, por lo tanto existirá herramienta de 'Punta curva', con radio el menor de todos los tramos curvos, que lo mecanice. Esta herramienta tendrá su eje central coincidente con la bisectriz, quedando cerrada por detrás a través de 'TA' y 'TB'. Si el radio considerado supera a 'E/2', la herramienta será de 'Punta curva', si no lo supera la herramienta podrá ser circular, ya que todas las transiciones entre tramos son tangentes. En la Figura 5-96 puede verse un ejemplo de esto.

- Independientemente del resto de tramos de la Zona, cuando dentro de la zona etiquetada como 'E' todos los tramos son tangentes, la herramienta generada con el tramo curvo, menor a cualquiera de los existentes en dicha zona (Figura 5-97 (a)), puede centrarse manteniendo útil el arco circular original (éste no se prolonga), por lo tanto, la herramienta seguirá siendo de 'Punta curva' pero centrada, que es más general que la no centrada, tal como se aprecia en la Figura 5-97 (b).

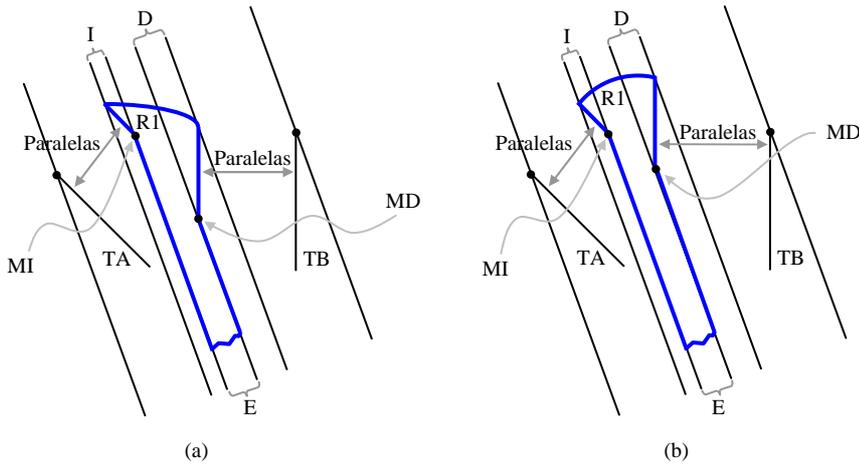


Figura 5-97. Centrado de la herramienta.

- Para un mismo perfil de la Zona de Mecanizado, la herramienta obtenida con un eje distinto al de la bisectriz (por ejemplo con la perpendicular a la línea que une los puntos de entrada 'A' y 'B') queda englobada por la obtenida con la bisectriz, con tan sólo realizar un giro de ejes, ver Figura 5-98. Aunque puede darse el caso de no encontrar solución con la bisectriz (Figura 5-99 (a)) y si con la perpendicular a la línea que une 'A' y 'B' (Figura 5-99 (b)).

Por lo tanto, de no encontrar solución con la bisectriz debe probarse con la normal a la línea que une 'A' y 'B'. No se prueban otros ejes, puesto que de obtenerse solución con ellos, siempre tendrá menos rango para la entrada y salida de la herramienta, quedará más forzada que con la bisectriz o la normal a la línea entre 'A' y 'B'.

Al final, puede tenerse un conjunto de herramientas genéricas válidas para una misma Zona de Mecanizado, aunque puede quedar vacío si las herramientas genéricas encontradas tienen alguna inconsistencia física, por ejemplo, ante distancias 'I' y 'D' que no dejen espesor de mango posible. Debe recordarse, que un perfil puede contener varios tramos capaces de ser usados como punta de herramienta, pudiendo obtener solución con cada uno de ellos.

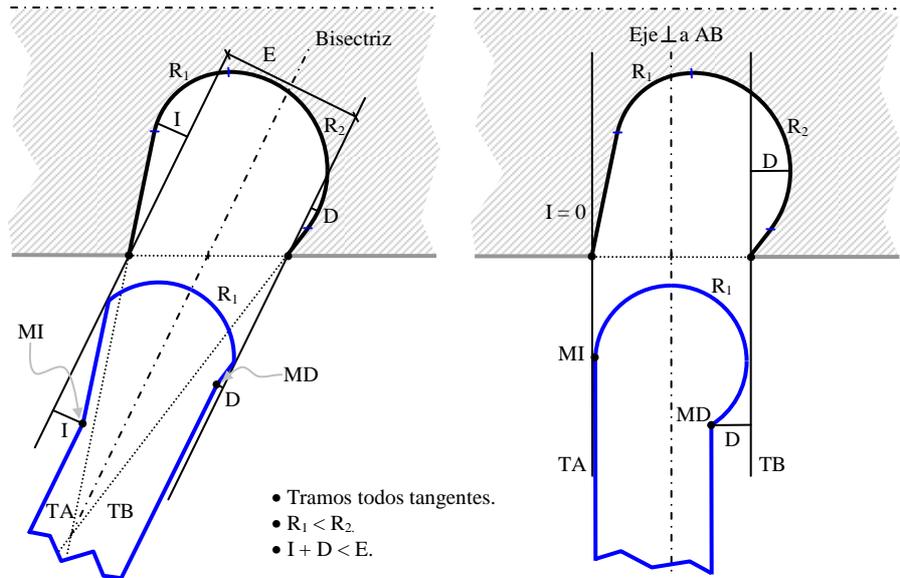


Figura 5-98. Herramienta obtenida con la bisectriz y con la normal a la recta 'A-B'.

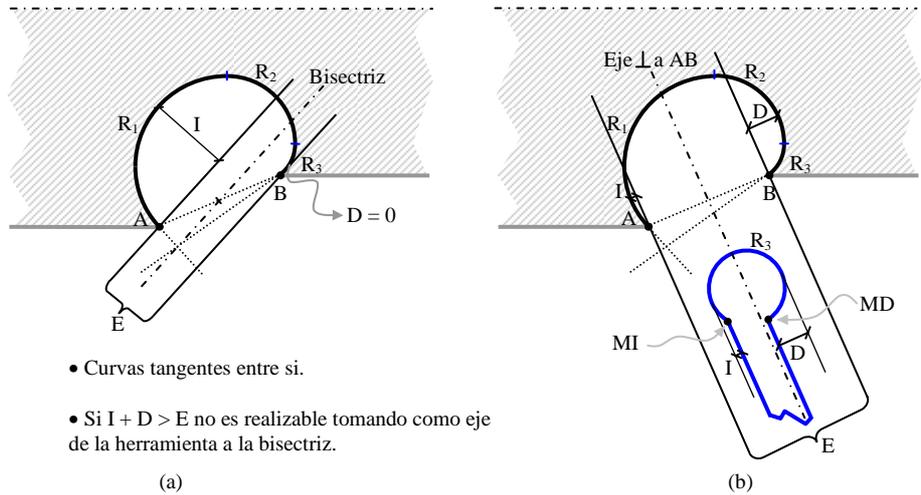


Figura 5-99. Perfil que sólo admite solución con la normal a la recta 'A-B'.

A lo largo de los ejemplos, se han ido obteniendo unas herramientas con una correspondencia directa con las tres tipificadas para un perfil de la Zona convergente: Circular, Punta curva, Filos rectos. No se han incluido en las figuras mostradas los parámetros utilizados en su tipificación, por no complicarlas excesivamente, ya que su asignación es sencilla.

En la Tabla 5-7 se muestra un resumen de los pasos a seguir para obtener el conjunto de soluciones (herramientas genéricas válidas) en un perfil convergente. En

la Figura 5–100 se incluye el diagrama de flujo correspondiente a los pasos comentados. En él se destacan las repeticiones (nuevas soluciones) a realizar ante tramos aptos para punta de herramienta, y ante un eje de herramienta perpendicular a la línea que une los puntos de entrada ‘A’ y ‘B’.

Paso 1	Trazar las rectas paralelas al eje de la herramienta y que pasan por ‘A’ y ‘B’.
Paso 2	Seleccionar tramo de entre los candidatos a ser punta de herramienta.
Paso 3	Trazar dos rectas paralelas al eje de herramienta, que pase, una por el punto de inicio del tramo punta de herramienta, y otra por el punto final.
Paso 4	Calcular el punto que mantiene la distancia ‘I’ con el eje de la herramienta. Trazar una paralela a dicho eje y que pase por él. Hacer lo mismo con el punto que mantiene la distancia ‘D’.
Paso 5	Unir la paralela del Paso 3, que queda a la izquierda del eje de la herramienta, con la del Paso 4, que también está a la izquierda. La unión se hará con una recta que es paralela a ‘TA’, llamándole al punto intersección con la paralela del paso 4, ‘MI’. Repetir la acción con la parte derecha del eje de la herramienta, usando como recta de unión una paralela a ‘TB’ y llamando al punto de intersección con la paralela del paso 4, ‘MD’.
Paso 6	El mango de la herramienta quedará definido con dos rectas paralelas al eje de la herramienta y que empiezan en ‘MI’ y ‘MD’ respectivamente.

Tabla 5–7. Explicación de los pasos del algoritmo de la Figura 5–100.

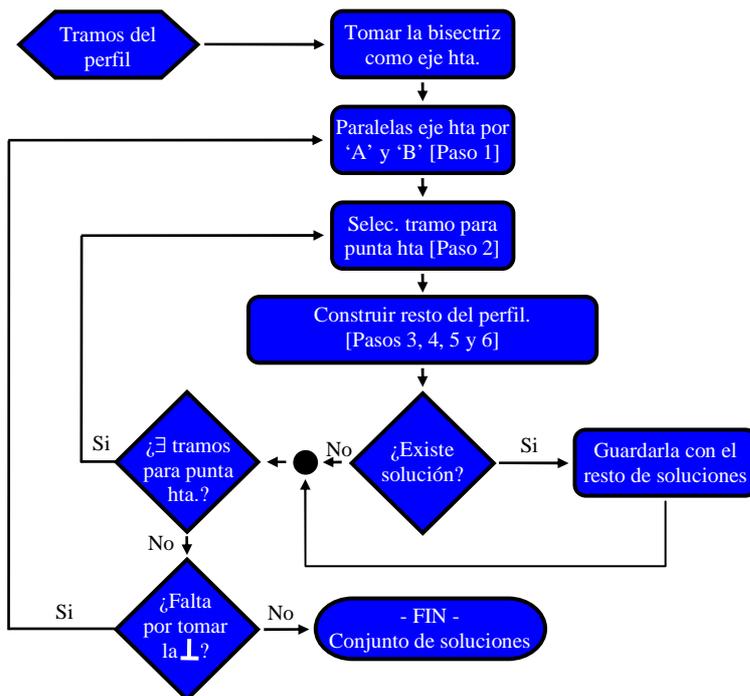


Figura 5–100. Algoritmo para obtener la herramienta en un perfil convergente.

Perfil paralelo

En un perfil ‘paralelo’ tampoco existen limitaciones en la entrada/salida de la herramienta, pero no se puede aplicar la misma operativa que en los perfiles ‘divergentes’, ya que las tangentes ‘TA’ y ‘TB’ no intersectan.

Puede pensarse, que en estos casos al ser ambas tangentes paralelas, la herramienta triangular pasará a ser una línea de longitud la profundidad del perfil, medida en la normal al tramo que va del punto ‘A’ al ‘B’ y sin anchura (herramienta ideal). Aunque puede parecer solución, no debe usarse, ya que no permite buscar herramientas compatibles, de hecho, todas las que tengan un perfil paralelo saldrán compatibles entre si. Sin embargo, al darle cuerpo a la herramienta representada por la línea, se tendrá que elegir una forma para su punta en función del perfil de la Zona, y tener en cuenta que se deben mecanizar por completo los laterales de la Zona sin “talonar”. Dicho de otra forma, dos perfiles paralelos son compatibles con una herramienta ideal del tipo línea, pero no puede encontrarse una forma real de herramienta que mecanice a los dos, como en el caso de la Figura 5–101.

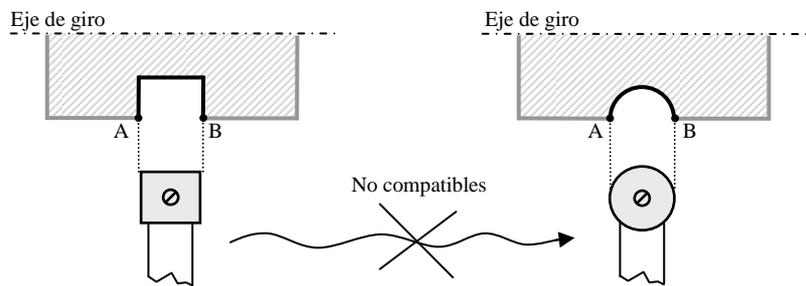
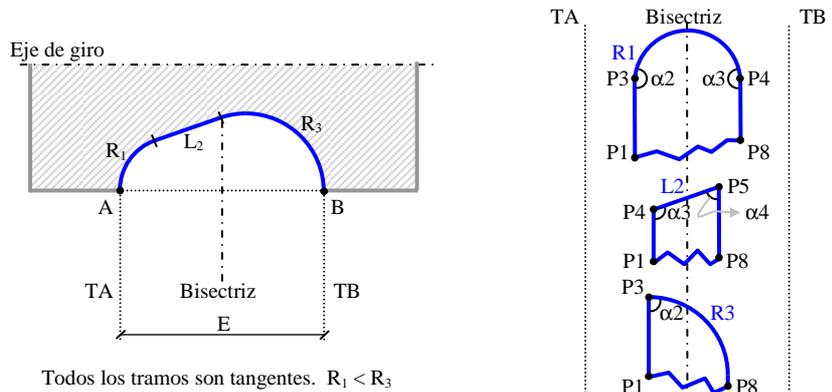


Figura 5–101. Perfiles paralelos no compatibles entre si.

La sistemática a seguir es coincidente a la explicada para ‘convergentes’, particularizando el valor de las variables ‘I’ y ‘D’, que será cero. Además, la bisectriz coincide siempre con la normal a la línea que une los puntos ‘A’ y ‘B’, situación que evitará buscar solución con la normal cuando no se encuentre con la bisectriz.

Puede verse un ejemplo de perfil paralelo en la Figura 5–102.



Todos los tramos son tangentes. $R_1 < R_3$

Figura 5–102. Obtención de herramientas genéricas en un caso de perfil paralelo.

Otro aspecto destacable, es el hecho de tener menos restricciones en la anchura del mango. Esta situación permite, en principio, tener tantas herramientas válidas para el perfil de la Zona como tramos la conforman, siendo muy sencilla su parametrización. En las tres herramientas obtenidas para la Zona de la Figura 5–102, se han incluido los parámetros necesarios para su definición, un detalle interesante es comprobar que todas mantienen el mismo eje.

8.5.4. Ejemplos de construcción del perfil de la herramienta

Puesto que en las explicaciones para la obtención de las herramientas genéricas se incluyen varios ejemplos, se han dejado para este punto, unos ejemplos seleccionados en función de la forma geométrica que presenta la Zona de Mecanizado.

El ejemplo de la Figura 5–103 (a) corresponde a una pieza de revolución, con la particularidad de que la ranura formada por las superficies 'S₁', 'S₂' y 'S₃', posee un eje de giro distinto al de giro de la pieza. Esta situación será detectada en el procedimiento de "Disposición del eje de giro de la Zona de Mecanizado", que situará y orientará el eje de giro adecuado a la Zona.

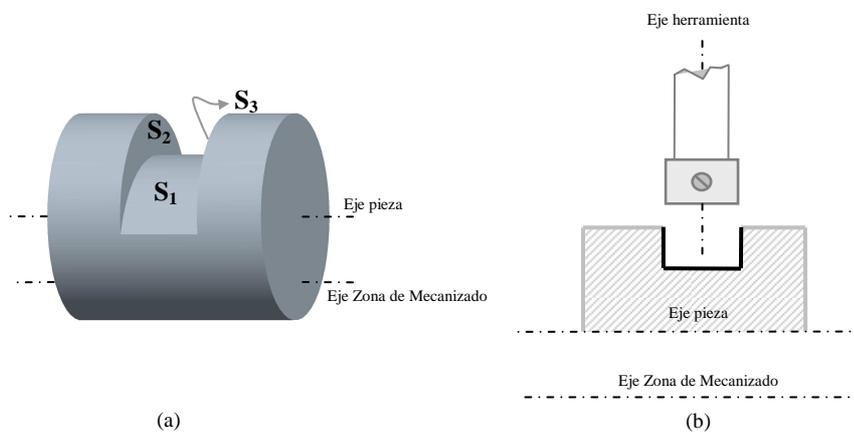


Figura 5–103. Mecanizado de una ranura por revolución. Perfil paralelo.

Tomando como superficie 'semilla' a 'S₂', Figura 5–103 (a), se obtiene el perfil de la Zona de Mecanizado (trazo negro grueso) y la herramienta genérica mostrada en la Figura 5–103 (b). Se trata de un perfil paralelo.

En la Figura 5–104 se muestra un nuevo ejemplo de Zona de Mecanizado para un proceso del grupo 'Torneado'. En la imagen de la pieza, aparece en alámbrico la forma geométrica correspondiente a la Zona de Mecanizado que queda oculta en la vista seleccionada. Se trata de una Zona convergente, cuyo perfil está formado por un tramo circular central y dos tramos rectos tangentes a él. Con esta geometría la herramienta 'tipo' correspondiente, tal como se aprecia en la figura, es una 'Circular'.

El eje de la herramienta toma la dirección de la bisectriz, aunque en este caso coincide con la perpendicular a los puntos 'A' y 'B' de entrada a la Zona. Notar, que de

no existir tangencia entre los tramos rectos y el curvo, la herramienta obtenida sería del tipo 'Punta curva', para recoger esa transición.

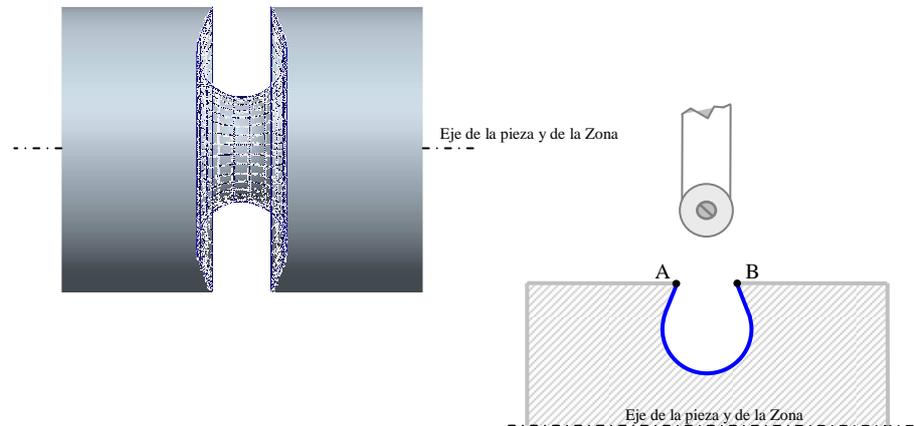


Figura 5-104. Ejemplo de mecanizado de Zona convergente.

En la Figura 5-105 (a) puede verse una pieza con una Zona de Mecanizado apta para un proceso del grupo 'Torneado'. Aunque se muestra un corte de la pieza, se ha mantenido una representación en alámbrico de la otra parte para evitar confusiones.

El perfil interior toca al eje de giro de la Zona (Figura 5-105 (b)), ante este caso se debe trabajar con el perfil de la Zona más su simétrico. Se trata de una Zona de Mecanizado convergente, donde la bisectriz coincide con la perpendicular a la línea entre los puntos 'A' y 'B', siendo ambas coaxiales al eje de revolución de la pieza.

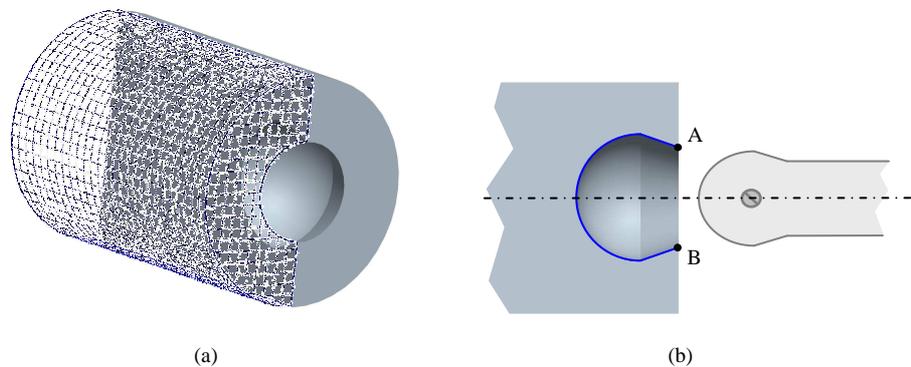


Figura 5-105. Ejemplo de perfil convergente que toca el eje de revolución.

En la Figura 5-105 (b) se incluye la herramienta genérica que se obtiene ante esta Zona de Mecanizado, con la anchura máxima que permite la entrada, y las uniones no tangentes necesarias para mecanizar los tramos laterales de la Zona, garantizando el acceso lateral para alcanzar cualquier punto.

9. Verificación de la accesibilidad a la Zona de Mecanizado

Un aspecto importante para afirmar que un Elemento Característico de Mecanizado tiene sentido, es la posibilidad real de acceso al Volumen a eliminar. En esta comprobación deberán contemplarse aquellas partes del modelo completo de la pieza, que de una forma u otra, impidan o restrinjan el acceso a la Zona de Mecanizado.

En todos los procesos debe verificarse que el acceso permite una eliminación continua del Volumen. Tener que eliminar el Volumen en dos o más partes, implica retirar la herramienta de corte para volver a entrar por otro lado, situación equivalente a la de cambiar de Plano de Trabajo. Un Volumen discontinuo supone realizar más de una operación de mecanizado, además de dejar más superficies con irregularidades superficiales o 'marcas'. Llegados a este punto, y puesto que el Volumen no ha sido descompuesto en las etapas previas, si no existe una eliminación continua y completa se descartará al Elemento Característico de Mecanizado.

Para llevar a cabo la verificación de la accesibilidad se dispone de la siguiente información:

- Modelo sólido de la pieza.
- Superficies que integran a la Zona de Mecanizado.
- Superficie tomada como 'semilla', o en su defecto, recorte seguido para la construcción de la herramienta.
- Eje de la herramienta, compatible con el rango de validez establecido para la Zona.
- Perfil de la herramienta sobre el eje anterior, junto a sus restricciones.

Estos datos hacen referencia a entidades B-Rep del modelo de la pieza y a campos particulares de la estructura que define a un Elemento Característico de Mecanizado. Se utiliza el formato B-Rep, 'Manifold' o 'Non-Manifold', siempre que se trate de datos geométricos y topológicos.

Cualquier cambio en la orientación de la herramienta, necesario para conseguir un acceso completo, debe estar avalado por los rangos de validez disponibles para esa Zona. Además, será necesario volver a reconstruir el perfil de la herramienta con la nueva orientación para confirmar el cambio. Debe recordarse que la pertenencia a los rangos de validez, por si sola, no es garantía para afirmar que existe un perfil de herramienta que satisface a la Zona de Mecanizado. Un ejemplo de la necesidad de cambio de orientación se tiene ante cavidades pasantes, cuando al eje de la herramienta se le permiten dos sentidos diferentes, 0° y 180°, y uno de ellos se encuentra obstaculizado.

En la comprobación de la accesibilidad, se proyectarán sobre un plano las entidades geométricas (superficies) de la Zona de Mecanizado, y aquellas de la pieza que puedan influir en el acceso.

9.1. Tipos de accesos

En función del grupo de procesos tratado se contemplan unas posibilidades de acceso u otras. Una de las condiciones que más influye en la posibilidad de acceso, es el tipo de herramienta asociada a cada grupo de procesos: herramienta de revolución o herramienta plana.

En los procesos tipo 'Fresado', se permite un acceso tanto vertical (en la dirección del eje de la herramienta), entrando directamente al interior de la Zona de Mecanizado, como horizontal (en un plano perpendicular al eje de la herramienta), donde se realiza una entrada lateral a la zona de trabajo, (Figura 5-106 (a)). La referencia en estos procesos es la superficie 'semilla', y por tanto, el acceso vertical será sobre ella y el horizontal a su mismo nivel (alcanzándolo a través de una posición exterior a la Zona de Mecanizado).

En el grupo representado por el 'Rectificado por revolución', el acceso se realiza en el plano que contiene al eje de la Zona de Mecanizado. Se trata de un acceso lateral tomando como referencia a ese plano, Figura 5-106 (c), aunque si la referencia es la superficie 'semilla', como en el caso del 'Fresado', el acceso puede verse como vertical o lateral.

Algo similar le ocurre al grupo representado por el 'Torneado', el acceso es lateral (horizontal) situado en el Plano de Trabajo, pudiendo tomar cualquier orientación sobre él, Figura 5-106 (c).

En los procesos tipo 'Limado', el acceso se analiza en el plano normal al movimiento de corte, Figura 5-106 (b). En este plano se busca la orientación y forma del mango, encargado de sujetar a la parte cortante. Ante ciertas geometrías del perfil de la herramienta (por ejemplo perfiles cerrados), se admite un acceso paralelo al movimiento de corte.

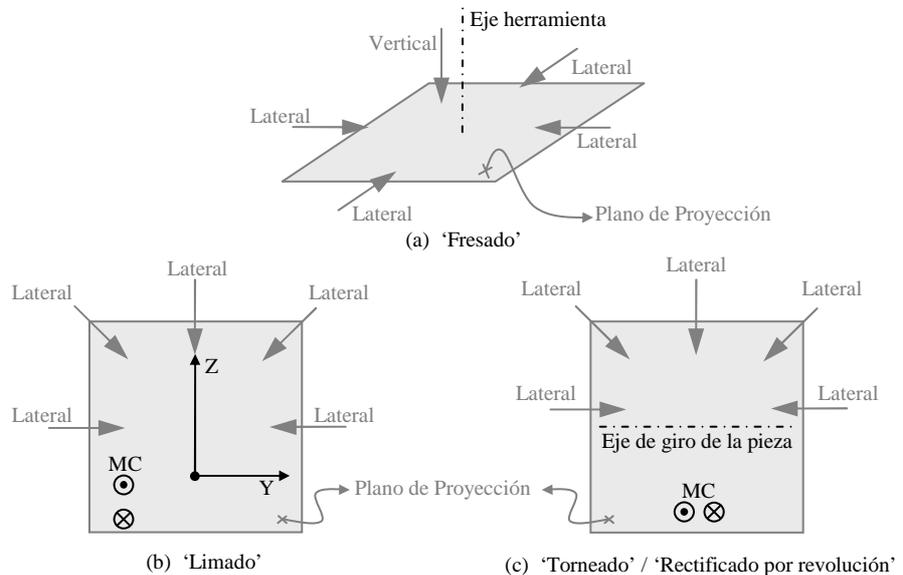


Figura 5-106. Acceso vertical y acceso lateral (horizontal).

En la Figura 5-107 pueden verse dos ejemplos concretos sobre el tipo de acceso disponible. En la figura (a), se muestra el acceso a una Zona de Mecanizado para un proceso tipo 'Fresado'. Las flechas en color negro indican por donde puede desplazarse la herramienta. Como se ve en la figura, la Zona es cerrada, y sólo permite un acceso en la dirección del eje de la herramienta (vertical).

Cuando la herramienta no es de revolución, por ejemplo en un proceso tipo 'Torneado' como el de la Figura 5-107 (b), el acceso se convierte en la búsqueda del camino y la forma para el mango de la herramienta que evite las partes de la pieza. Al igual que en la construcción de la herramienta, cuando los tramos de la Zona de Mecanizado llegan hasta el eje de giro de la propia Zona, mecanizado interior, deberá trabajarse con la copia simétrica del perfil de la Zona obtenido, para no restringir aún más el acceso de la herramienta y de su mango.

En ambos ejemplos de la Figura 5-107, se muestran herramientas válidas y orientaciones admisibles para sus ejes. Aunque pueden existir varias soluciones, el objetivo es encontrar al menos una que permita validar al Elemento Característico de Mecanizado, o en caso de no existir, descartarlo por irrealizable.

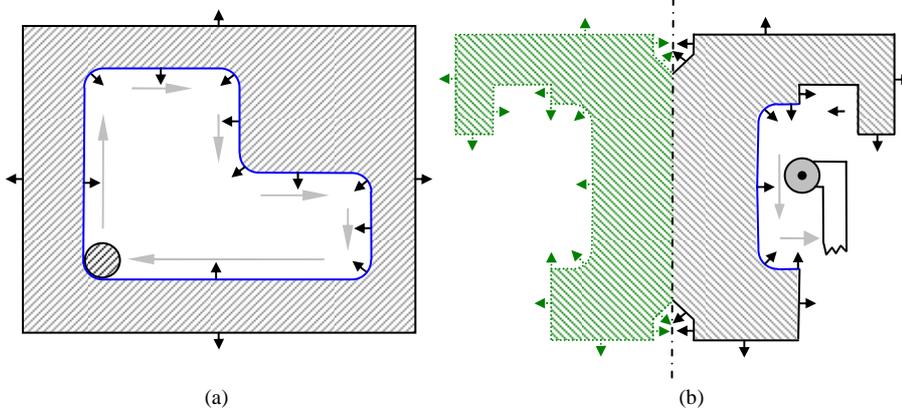


Figura 5-107. Acceso en un proceso tipo 'Fresado' (a) y en uno 'Torneado' (b).

En el análisis del acceso, la influencia de cualquier superficie de la pieza en el acceso a la Zona de Mecanizado, se estudiará a partir de las sombras generadas por las caras de la pieza, sobre el propio perfil de la Zona de Mecanizado, cuando se sitúa un punto de luz en el infinito según la dirección del acceso. Estas sombras se obtienen a partir de la proyección de las distintas superficies sobre el Plano de Proyección, determinado este último por el grupo de procesos de pertenencia.

Las sombras implican obstáculos para acceder a la Zona de Mecanizado o para moverse por su interior, si éstas caen dentro. La ausencia de sombras indica posible camino para desplazar la herramienta. La accesibilidad quedará patente si la herramienta alcanza a todas las partes de la Zona de Mecanizado, moviendo el mango con la orientación adecuada entre las sombras (obstáculos), de acuerdo a los desplazamientos del proceso (grupo de procesos) considerado.

La forma de proyectar las superficies para el análisis del acceso puede ser:

- “Lineal”. Puede verse como el conjunto de luces y sombras que se obtienen al situar la pieza a proyectar entre el Plano de Proyección y un punto de luz normal al plano, situado en el infinito.
- “Circular”. Se dispone de un eje de revolución, contenido en el Plano de Proyección. La proyección será el resultado de hacer impactar las entidades geométricas sobre el Plano de Proyección, girándolas alrededor del eje. En este caso también puede hablarse de luces y sombras, donde las primeras son los huecos o ausencia de entidades, y las segundas son las entidades que han impactado en el plano.

Así pues, la búsqueda de acceso consiste en encontrar un camino por las luces que permita acceder a la Región de Trabajo. Este camino impone límites a las dimensiones de las herramientas. Dimensiones que se completan controlando las anchuras entre las sombras y los radios de acuerdo de las propias sombras incluidas en la Región de Trabajo.

La Figura 5–108 (a) sirve para ilustrar el concepto de proyección de sombras comentado, estableciendo una primera toma de contacto con la sistemática a aplicar para el análisis de la accesibilidad a través de la proyección de las superficies. En este ejemplo la parte que interesa es la cajera triangular que contiene la pieza, suponiendo un proceso tipo ‘Fresado’. En la representación de la pieza se ha añadido el Plano de Proyección (P_1), normal al eje de la herramienta y situado a la altura de la superficie ‘semilla’. La proyección que se realiza es del tipo “Lineal”.

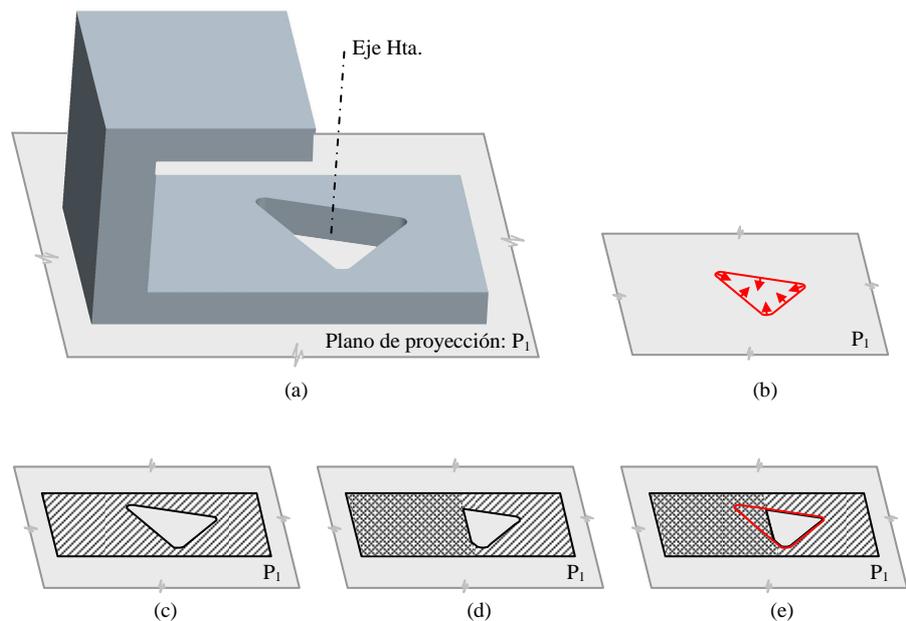


Figura 5–108. Ejemplo de proyección (luces y sombras).

En la Figura 5–108 (b) se muestra la proyección del perfil de la Zona de Mecanizado, perfil que representa los límites que la herramienta deberá alcanzar para completar el mecanizado. En este caso la Zona es cerrada, las flechas en rojo son las

normales topológicas a los tramos proyectados e indican hacia donde no está el material.

La Figura 5-108 (c), aporta la proyección de la superficie que contiene la entrada a la Zona de Mecanizado. El resultado queda como “sombra” para el acceso.

La Figura 5-108 (d), incluye la proyección del resto de superficies de la pieza por encima del Plano de Proyección. Puede apreciarse como el hueco por donde puede moverse la herramienta en el mecanizado ha sido reducido, el acceso ha quedado restringido por la aparición de nuevas sombras resultado de la proyección.

Al situar por encima del Plano de Proyección, donde se encuentran las luces y sombras, a la Región de Trabajo (destacada en rojo en la en la Figura 5-108 (e)), puede apreciarse el espacio disponible para la herramienta, hueco en gris, y toda la zona que ésta debe alcanzar (en rojo). A partir de esta información puede realizarse un análisis más detallado para confirmar la posibilidad real de mecanizado, obtener las características/restricciones de la herramienta, etc.

La búsqueda de un posible acceso lateral a la Zona, necesario ante ciertas geometrías (por ejemplo, la correspondiente a una ranura en “T” y a ciertas disposiciones, como el ‘Fresado’ con un eje de herramienta fuera de la Zona de Mecanizado, Figura 5-73 (a)), requiere encontrar un camino entre las sombras con la herramienta situada sobre el Plano de Proyección, y un tamaño de mango adecuado, que permita desplazarse por dentro y alcanzar todas las partes, como se deduce a la vista de la Figura 5-109.

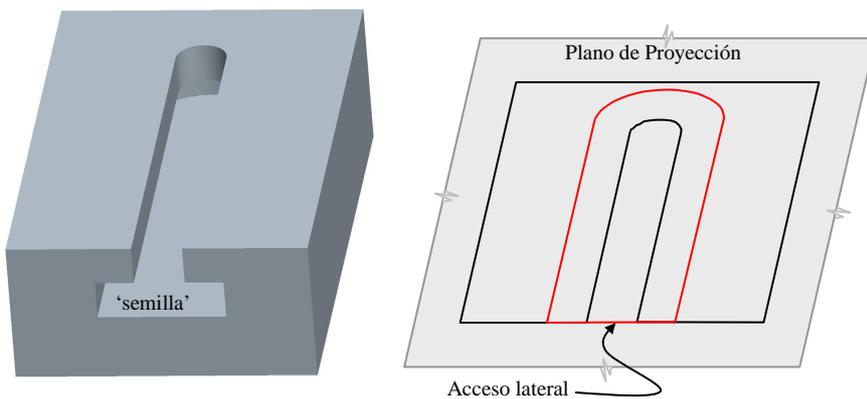


Figura 5-109. Resultado de la proyección para una ranura en ‘T’.

En el ejemplo de la Figura 5-109, imagen derecha, se muestra el resultado de la proyección (luces y sombras) de las superficies de la pieza que quedan sobre la ‘semilla’. Superficie, esta última, sobre la que se sitúa el Plano de Proyección.

En rojo se ha sobrepuesto el perfil de la Zona de Mecanizado para comparar la región a recorrer entre las zonas de luz que quedan (en color gris). En la parte inferior puede verse la posibilidad de un acceso lateral, ya que existe una zona de entrada sin sombras.

En la Figura 5-110 (a) puede verse una Zona de Mecanizado de revolución (líneas

en azul) y el resultado de la proyección que se obtiene, Figura 5–110 (b).

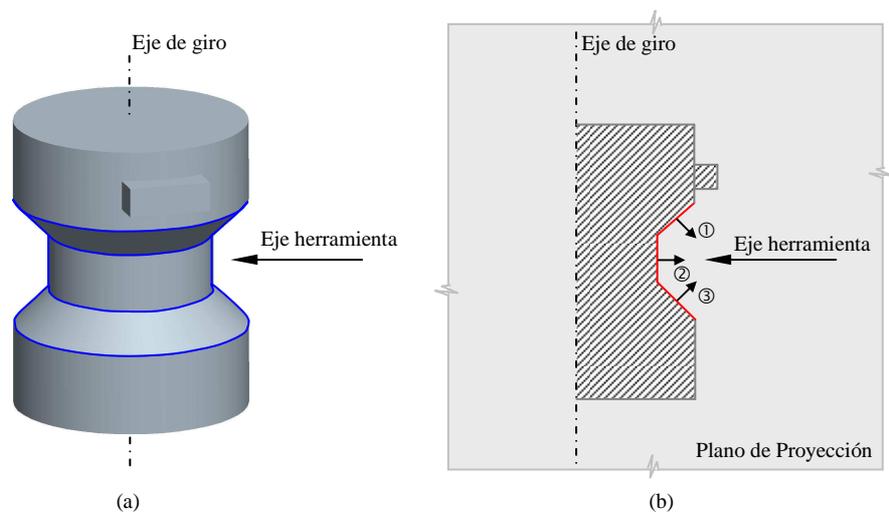


Figura 5–110. Ejemplo de proyección "circular", 'Torneado'.

Sobre el Plano de Proyección, en la figura anterior, se ha dispuesto la proyección del perfil de la Zona de Mecanizado en color rojo, Figura 5–110 (b), que en este caso queda abierto, el acceso a ella es lateral (horizontal). Las zonas de sombra obtenidas limitan las posibles direcciones y sentidos para este acceso lateral.

9.2. Plano de Proyección y Región de Trabajo

Como se ha ido viendo, al plano sobre el que se proyectan las superficies de la pieza y sobre el que se realizará el análisis de la accesibilidad se denomina: 'Plano de Proyección'.

La proyección de la Zona de Mecanizado, define una región bi-dimensional sobre el Plano de Proyección por la que se moverá la herramienta durante la eliminación del Volumen asociado a la Zona. A esta región se la denomina: 'Región de Trabajo'. La proyección del resto de superficies de la pieza servirá para analizar por donde se accede a la Región de Trabajo y que nuevas restricciones se imponen al movimiento por dentro de la propia región.

La Región de Trabajo no tiene porque ser cerrada. Cuando no lo sea, podrá cerrarse virtualmente con los propios límites del material de partida (bruto). Debe verse como una proyección, sobre un plano concreto, del Volumen de material a eliminar.

En los procesos, 'Rectificado por revolución' y 'Torneado', la Región de Trabajo queda abierta, puesto que el Plano de Proyección contiene al eje de la herramienta. De hecho, la abertura representa la entrada de la herramienta a la Zona de Mecanizado. En el 'Limado', la Región de Trabajo también suele quedar abierta, aunque en ocasiones se cierre indicando la necesidad de un eje de herramienta

normal al Plano de Proyección.

Como ya se ha indicado, en los procesos en los que gira la pieza, 'Rectificado por revolución' y 'Torneado', el Plano de Proyección será aquel plano que contenga al eje de la herramienta y al eje de giro de la Zona de Mecanizado. Al tratarse de una proyección circular su situación es indiferente (el resultado obtenido será el mismo). Para un proceso tipo 'Limado', el Plano de Proyección quedará perpendicular al movimiento de corte, y situado en el límite exterior de la superficie 'semilla', ya que sobre ésta se realizan las trayectorias de corte, mientras que su posición concreta vendrá en función de las aristas que delimitan a la 'semilla'.

En los procesos tipo 'Fresado', el Plano de Proyección se sitúa normal al eje de la herramienta, coincidente con la superficie 'semilla', por lo tanto, la Región de Trabajo puede en cualquier momento quedar cerrada y aún así no invalidar el Elemento Característico de Mecanizado. Un ejemplo de Región de Trabajo cerrada en un proceso del tipo 'Fresado', se obtendrá al proyectar la Zona de Mecanizado correspondiente a una "cajera circular".

En los procesos tipo 'Fresado', para tener en cuenta al resto de la geometría de la pieza, se trabaja con aquellas superficies/caras del modelo que se encuentren a lo largo de la dirección de acceso al Volumen a eliminar, concretamente por donde transcurrirá el eje de la herramienta. Van a ser precisamente estas superficies las que impidan que la herramienta alcance todas las partes del Volumen a mecanizar. Pueden establecerse límites a lo largo del eje de la herramienta, para descartar aquellas superficies que queden por debajo, y en ocasiones también por encima de una cota dada. La cota de profundidad de una Zona de Mecanizado marca un límite, ya que todas las superficies que estén por debajo no afectarán al acceso. De forma similar, en función del Proceso Tipo, pueden establecerse límites que eliminen las proyecciones de superficies no influyentes.

En los procesos tipo 'Fresado', si existe superficie 'semilla', ésta no debe considerarse como un impedimento de acceso, sino como el límite inicial de la Región de Trabajo. Es importante indicar que en situaciones en las que no hay 'semilla', por ejemplo un agujero pasante, serán el resto de superficies de la Zona de Mecanizado las que establezcan el límite inicial y final de la Región de Trabajo.

En el resto de procesos, 'Rectificado por revolución', 'Limado' y 'Torneado', la superficie 'semilla' pasará a ser un tramo más del resultado de la proyección, que junto al resto, procedentes de las otras superficies de la Zona, ayudarán a definir la Región de Trabajo.

9.3. Procedimiento de proyección de las superficies

Aunque las superficies manejadas estén en B-Rep, una proyección de éstas sobre un plano no se reduce a proyectar los tramos que las delimitan interna y externamente, ya que debido al tipo de superficie, a su forma, y a su orientación en el espacio, se tendrán que buscar los tramos que delimitan la "sombra" a proyectar, que pueden no coincidir con los originales. De no coincidir, deben crearse asignándoles el sentido topológico adecuado.

Además, es importante mantener la información topológica suficiente para

conocer, sobre el resultado de la proyección, que recorte encierra material, o representa a un hueco, así como, por qué parte de las aristas proyectadas puede ir la herramienta en su aproximación y eliminación del Volumen, sobre todo en Regiones de Trabajo abiertas.

Antes de explicar la sistemática para llevar a cabo el proceso de proyección de superficies, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las caras que se intersectan son el resultado de la proyección sobre el Plano de Proyección de caras planas, cilíndricas, cónicas,...., procedentes de la pieza, y siempre estarán formadas por un recorte exterior y por, cero, uno, o varios recortes interiores. Los recortes interiores proyectados representan huecos, si a través de uno de estos huecos se da paso a una protusión, será la proyección posterior de las superficies que la conforman las que cierren el paso de la herramienta.

- A partir de la intersección con la primera cara/superficie procedente de la pieza, la Región de Trabajo podrá estar formada por más de un hueco independiente, pudiendo contener cada uno de ellos islas, y éstas a su vez nuevos huecos internos. Se dejará de cumplir el formato B-Rep.

En la Figura 5-111 aparece representada una pieza, cuya geometría sólo tiene sentido como ejemplo para la proyección de superficies en busca de la accesibilidad en un proceso tipo 'Fresado'. Su finalidad es mostrar la operativa de proyección sobre la Zona de Mecanizado, así como la influencia sobre la Región de Trabajo debida a esta proyección. En el ejemplo sólo se muestra la proyección del cilindro central hueco.

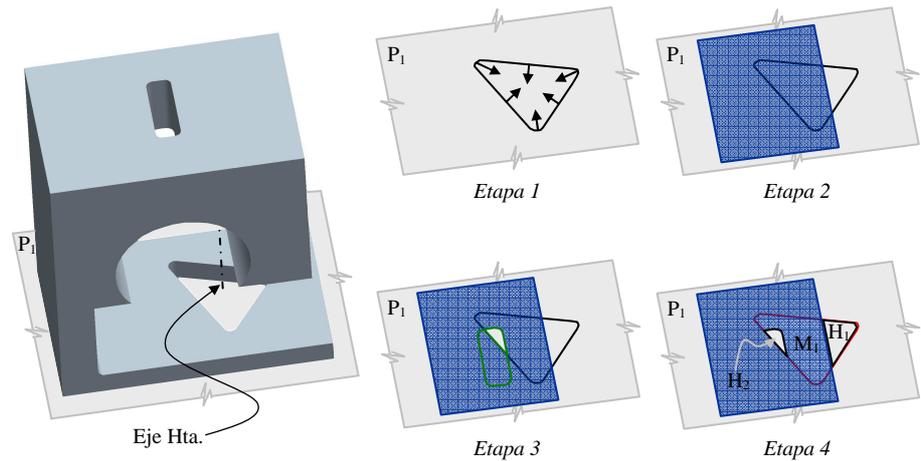


Figura 5-111. Ejemplo de proyección "lineal" de superficies.

El eje de la herramienta se dispone normal al plano 'P₁', plano que representa el fondo de la Zona de Mecanizado ("cajera triangular"). Al ser la cavidad pasante, debe establecerse una superficie 'semilla' a partir de los recortes externos de las superficies de la Zona. El Plano de Proyección se dispone normal al eje de la herramienta (en el punto de 'Z' mínimo correspondiente a los recortes).

A continuación se realiza una breve explicación de cada una de las etapas que aparecen en la figura.

- *Etapa 1*: Se ha proyectado la Zona de Mecanizado sobre el plano 'P₁', plano normal al eje de la herramienta, obteniéndose la Región de Trabajo mostrada en color negro. Las flechas representan las normales topológicas e indican donde está el hueco. En el resto de etapas no se muestran estas normales para no complicar el dibujo, aunque debe recordarse que cada tramo de la Región de Trabajo mantiene su propia normal topológica.

- *Etapa 2*: Proyección de la cara cilíndrica sobre 'P₁', sin tener en cuenta su agujero central. Puede verse que el rectángulo resultado, en azul, interferirá con parte de la Región de Trabajo.

- *Etapa 3*: Proyección del agujero central de la superficie cilíndrica anterior, resultado en verde, donde puede comprobarse que también existirá intersección con la Región de Trabajo.

- *Etapa 4*: Superposición de la Región de Trabajo sobre las luces y sombras de lo que se tiene hasta este momento, para comprobar el acceso disponible.

Al reconstruir la Región de Trabajo, y cuando existe intersección entre caras, aparecen una serie de huecos (zonas de luz (H₁ y H₂ en la Figura 5-111)), islas de material y zonas con material (sombras (M₁ en la Figura 5-111)), formadas a partir de los tramos resultantes de las intersecciones. Es muy importante mantener la información topológica suficiente para poder reconstruir cada nueva entidad acorde a su función, hueco, isla, zona de material, y poder comprobar las dimensiones admisibles de la herramienta, así como su desplazamiento por las zonas de luz.

Los trozos inconexos resultantes (*Etapa 4*), representan los accesos posibles para el mecanizado de la "cajera triangular" en este estadio. Las sombras indican que no se puede acceder verticalmente por ninguna otra parte diferente a los dos huecos, a su vez limitan el acceso lateral, aunque al ser cerrada la Región de trabajo éste queda completamente descartado. Aún quedarán por proyectar el resto de caras de la pieza, en cuya situación final se encontrará una Región de Trabajo reducida al hueco 'H₂', insuficiente a todas vistas, para permitir la entrada y los movimientos necesarios para el mecanizado completo del Volumen.

En la *Etapa 1* de la Figura 5-111, se distinguen los tramos que conforman el perfil representante de un hueco: la Región de Trabajo inicial. Estos tramos se cortan al ir intersectando la Región de Trabajo con las caras de la pieza, de forma que al obtener en la *Etapa 4* los huecos 'H₁' y 'H₂', estos pueden ser reconstruidos, en parte con tramos que antes no existían, y el resto con los procedentes del hueco que representaba a la Región de Trabajo inicial. Debe aprovecharse la información topológica de los tramos originales para que el resultado siga manteniendo la condición de hueco.

Sucede algo similar con la zona de material, 'M₁', donde se conservan tramos procedentes de la cara cilíndrica que se proyectó e intersectó, siendo el sentido topológico de la cara el correcto para reconstruir topológicamente a la Zona.

Al manejar estructuras que no cumplen estrictamente con B-Rep, y tratar configuraciones variadas, tanto en las caras que se proyectan e intersectan como en la Región de Trabajo, se hace especialmente importante atacar el problema en un

orden correcto y controlado.

A continuación se exponen los aspectos destacables y la metodología seguida en la solución desarrollada, mostrando los Pasos para llevar a cabo la proyección e intersección de una cara (Figura 5-112 (a)), con una Región de Trabajo (Figura 5-112 (b)) con la posición relativa mostrada en la Figura 5-112 (c). Este ejemplo se corresponde con parte de una geometría destinada al mecanizado mediante un proceso del tipo 'Fresado', y representa un estadio intermedio donde ya se han hecho proyecciones.

El Plano de Proyección es normal al eje de la herramienta, situado por lo tanto en su 'Z' mínimo. No se resalta expresamente en la figuras, aunque se entiende que es sobre el que se llevan a cabo las proyecciones e intersecciones mostradas.

Centrándose en la cara proyectada a tratar, los Pasos 1, 2 y 3, que a continuación se explicarán, se repiten para cada hueco de ella, mientras que en los Pasos 4, 5 y 6, se tratará su recorte exterior.

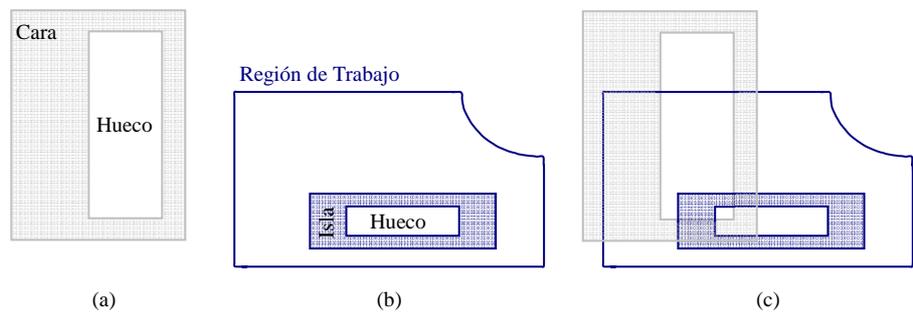


Figura 5-112. Cara, Región de Trabajo y solape entre ambas.

- Paso 1: Se realiza la intersección, en caso de existir, del hueco con el/los recortes externos de la Región de Trabajo (Figura 5-113). Las partes que quedan dentro de la Región de Trabajo se guardan para tratarlas en pasos siguientes. Las que están fuera representan zonas de luz, aunque al ser cerrada la Zona de Mecanizado, cuando se proyecten el resto de superficies quedará impedido el acceso lateral.

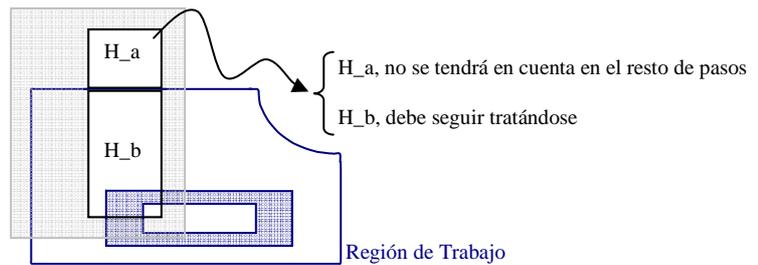


Figura 5-113. Resultado después de aplicar el Paso 1º.

- Paso 2: Se intersecta el resultado del paso anterior que queda contenido en la Región de Trabajo, 'H_b' en este caso, con los huecos (cavidades dentro de las islas de material) de la Región de Trabajo que no son recortes externos. En el resultado se tendrán las partes que quedan dentro (se guardan como huecos definitivos en la Región de Trabajo, pues son accesos reales), y aquellas que están fuera. Ver Figura 5-114.

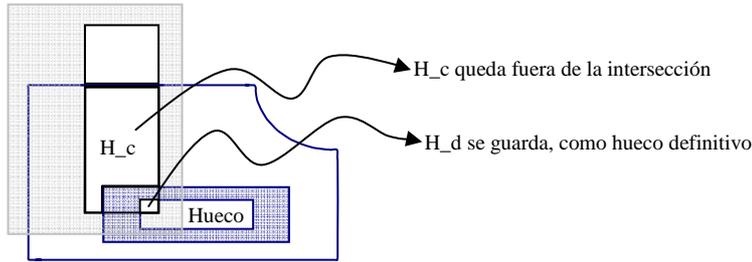


Figura 5-114. Resultado después de aplicar el Paso 2º.

- Paso 3: Con aquellos huecos del Paso 2 que quedaban fuera de la intersección, 'H_c', se realiza una nueva intersección con las islas de material de la Región de Trabajo, eliminando la zona que queda dentro de la isla de material, Figura 5-115. El resultado, 'H_e', se guardará también como huecos definitivos en la Región de Trabajo (accesos posibles).

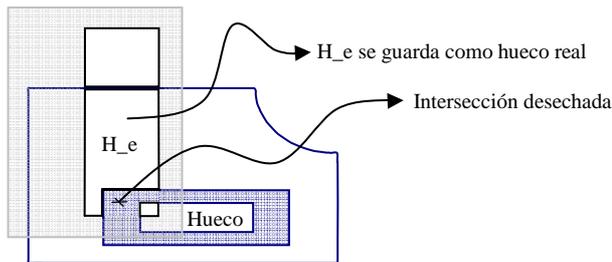


Figura 5-115. Resultado después de aplicar el Paso 3º.

- Paso 4: Se realiza la intersección del recorte exterior de la cara tratada con los huecos originales de la Región de Trabajo, no con los que se han generado y añadido en los pasos anteriores. Si el recorte exterior queda completamente fuera, se rechaza, ya se comprobará en los pasos 5 y 6 si intersecta con islas o con el recorte exterior de la Región de Trabajo. En caso de estar el recorte completamente dentro, pasará en forma de isla a la Región de Trabajo. Si por el contrario existe intersección, Figura 5-116, el hueco de la Región de Trabajo quedará reducido, manteniendo el recorte exterior de la cara tratada su forma original para ser usada en los pasos siguientes.

En caso de quedar el recorte exterior de la cara tratada dentro de la Región de Trabajo, manteniendo aristas en común, se modificará el recorte de la Región de Trabajo implicado, reduciéndolo de tamaño en lugar de añadirlo como isla.

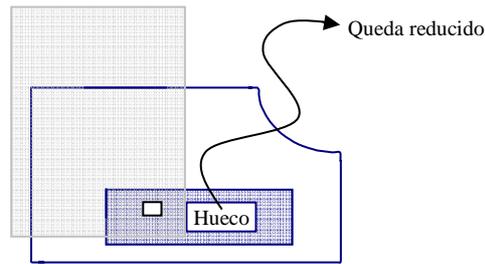


Figura 5-116. Resultado después de aplicar el Paso 4º.

- Paso 5: En este paso se intersecta el recorte exterior de la cara tratada con las islas de la Región de Trabajo. Si queda completamente dentro de alguna isla, se rechaza por completo, ya que la isla de por sí impide el acceso. Si queda completamente fuera de las islas, se descarta, ya se comprobará si intersecta, o no, con el exterior de la Región de Trabajo en el Paso 6. La posible intersección con los huecos se ha comprobado en el paso anterior. Si por el contrario, intersecta con alguna isla, se unen, Figura 5-117, quedando como nuevo recorte de la cara tratada. Se elimina la isla, o las islas, de la Región de Trabajo implicadas en la unión.

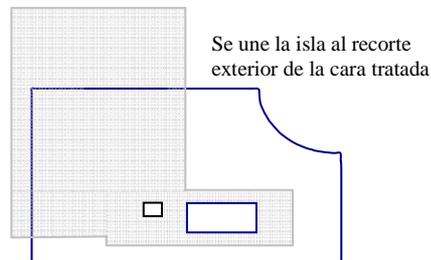


Figura 5-117. Resultado después de aplicar el Paso 5º.

- Paso 6: Llegados a este punto se realizará la intersección del recorte exterior de la cara implicada, puede haberse modificado en el Paso 5, con el/los recortes exteriores de la Región de Trabajo. Si el recorte exterior de la cara implicada está completamente fuera, se deja, pues no afecta al acceso vertical (si al lateral). Además, ante esta situación tampoco habrá existido intersección alguna en los pasos anteriores. En caso de quedar completamente dentro del recorte exterior de la Región de Trabajo, se dejará como isla en ésta. Y por último, el recorte exterior podría estar mitad dentro y mitad fuera, reduciendo de tamaño al recorte exterior de la Región de Trabajo, restringiéndolo aún más el acceso, Figura 5-118. Se ha dejado en línea discontinua por donde transcurría la Región de Trabajo.

Si en este último supuesto, llega un recorte exterior de la cara tratada modificado en el Paso 5 (caso de haber unido el recorte exterior de la Región de Trabajo a una isla), lo que se estará haciendo es adaptar la Región de Trabajo, evitando que exista una isla que rebase los límites del recorte exterior en dicha Región.

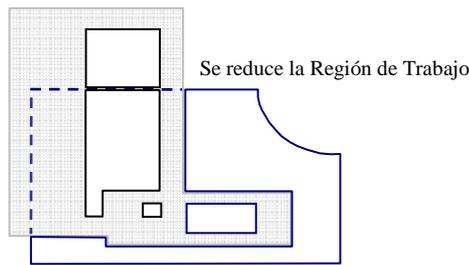


Figura 5-118. Resultado después de aplicar el Paso 6º.

Como se desprende de los distintos pasos, el proceso de intersección no es una cuestión fácil, debido sobre todo a las distintas configuraciones que se pueden presentar. Aunque una vez comprobada que la intersección de una cara con la Región de Trabajo cubre todas las situaciones, el resto es puramente automático, ya que después de realizar una intersección completa de la cara, siempre queda la Región de Trabajo (normalmente modificada) para acometer una nueva intersección y así sucesivamente, hasta terminar con todas las caras a proyectar e intersectar.

9.4. Búsqueda de acceso entre las geometrías resultado

Una vez realizadas todas las proyecciones e intersecciones para una Zona de Mecanizado sobre el Plano de Proyección, el resultado final estará formado por un conjunto de elementos geométricos que representan las luces (huecos y accesos posibles), o las sombras (impedimentos por existencia de material). Los elementos que integran este resultado final en la Región de Trabajo pueden tomar diversas configuraciones, por ejemplo, único recorte exterior sin islas internas, único recorte con islas internas, único recorte con islas y huecos, varios recortes sin islas, varios recortes algunos con islas otros no, etc.

El perfil de la herramienta está formado por una serie de tramos referidos a una posible disposición del eje de la misma. Estos tramos admiten ciertas variaciones en su situación respecto al eje de la herramienta (tanto si es eje de revolución, como si simplemente marca por donde se sujeta la parte cortante, mango), así como variaciones respecto a su longitud. La Región de Trabajo obtenida limitará parte de estas variaciones, evidenciando en algunos casos la imposibilidad de utilizar la herramienta asignada y sus posibles variantes. Esto incluye el mango, que también puede ver afectada su geometría y dimensiones. Para la sección del mango de la herramienta se admitirá un límite inferior, incluyendo sección nula, siendo sus restricciones puramente geométricas, sin entrar en otro tipo de consideraciones, tales como, esfuerzos, flechas, materiales, formas estándares, etc.

Tomando a la Región de Trabajo como los límites reales a alcanzar en la eliminación completa de la Zona de Mecanizado, la comprobación del acceso pasa por buscar algorítmicamente el recorrido de la herramienta, tanto si ésta realiza un primer 'taladrado' (acceso normal al Plano de Trabajo) en el interior de la Región de Trabajo, como si necesita una entrada en vacío a la altura del Plano de Trabajo

(acceso lateral/horizontal a la Zona de Mecanizado). Las aristas proyectadas representan los obstáculos a sortear, y la información topológica de estas y de los recortes, la certeza de por que zona puede (luz), o no puede (sombra), pasar la herramienta.

En un acceso lateral deberán analizarse las luces y sombras fuera de la Región de Trabajo para buscar una entrada factible a la Zona de Trabajo. Pueden utilizarse algoritmos informáticos existentes para comprobar la accesibilidad, trabajando en el Plano de Proyección. Estos algoritmos se dedican a buscar entre las entidades que representan al material, los posibles caminos adecuados, aportando información sobre las anchuras máximas permitidas o incluso el radio de acuerdo mínimo requerido en los tramos curvos analizados. Algoritmos similares han sido utilizados para calcular el ratio de material eliminado, con una herramienta de radio prefijado y dentro de una zona acotada. Pueden verse soluciones para este caso en los artículos [Ref. 60], [Ref. 65], [Ref. 66] y [Ref. 116].

9.5. Consideraciones finales

Aunque el tratamiento algorítmico de la información procedente de la etapa de proyección e intersección de superficies pueda parecer complicado, su complejidad queda reducida por motivos como los que a continuación se comentan:

- Las geometrías muy complicadas, desde el punto de vista de su mecanizado, han pasado una primera criba en el cálculo del rango angular para el eje de la herramienta. Si no se ha encontrado un eje que satisfaga a las superficies de la Zona de Mecanizado se habrán descartado.

- Tres de los cuatro grupos de procesos, 'Rectificado por revolución', 'Torneado' y 'Limado' (a excepción en este último, de un perfil de herramienta cerrado), sólo admiten acceso horizontal, simplificando el proceso de búsqueda. El grupo tipo 'Fresado' no admite la simultaneidad del acceso vertical y horizontal, se comporta como un sistema de dos ejes y medio, facilitando el análisis.

- En caso de tener dividido el acceso en más de un hueco, la búsqueda de la solución se reduce mucho, pues al no admitir el mecanizado de superficies esculpidas no se puede cambiar de Plano de Trabajo, ni interrumpir el corte para proseguirlo por otro lugar. Por lo tanto, se reduce a buscar el hueco de mayores dimensiones y ver si, con la orientación prevista del eje y las dimensiones mínimas previstas del perfil, la herramienta cabe por él y es capaz de alcanzar todas las partes.

- Para los procesos tipo 'Rectificado por revolución', el hueco válido está muy influenciado por el eje de giro de la Zona de Mecanizado, cualquier acceso no compatible con el giro será automáticamente descartado.

Como puede observarse, al particularizar la comprobación del acceso para cada grupo de procesos, situación necesaria por otra parte, se van encontrando una serie de condiciones que simplifican mucho el problema, facilitando su resolución algorítmica.

10. Agrupación de Elementos Característicos de Mecanizado

Una de las directrices que se ha respetado a lo largo de la Tesis, ha sido separar y establecer claramente las distintas tareas a realizar en el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado. Con esta actuación se ha evitado caer en soluciones particulares y en una búsqueda de patrones preestablecidos.

En la generación de los Volúmenes de Mecanizado se ha utilizado el principio de concavidad entre superficies, condicionando la solución a la obtención de unos Volúmenes básicos, para permitir resolver los problemas ocasionados por la aparición de protusiones. Con esta forma de proceder, si para cualquier Zona existe una posible generación por mecanizado, ésta se encuentra.

La descomposición en Volúmenes básicos ofrece una solución, en la que los Volúmenes/Zonas de Mecanizado mantienen el mayor tamaño posible, sin incluir situaciones que impidan una posterior asociación a operaciones, uno a una, es decir un Volumen con una sola operación.

La consecución de la pieza a través de la solución alcanzada mediante los Volúmenes básicos es, en ocasiones y ante ciertas geometrías, poco elaborada y no muy intuitiva. No se descarta, y se ha trabajado para facilitarlo (aportando las estructuras de datos y los procedimientos que posibiliten la agrupación y permitan analizar el resultado), realizar agrupaciones de estos Volúmenes básicos que ofrezcan soluciones más elaboradas, disminuyendo el número de operaciones en beneficio de unas mejores características en el mecanizado y de unas reducciones de tiempos.

Al permitir las agrupaciones, la descripción del mecanizado de una pieza en base a Elementos Característicos de Mecanizado no es única, debe verse como un árbol de posibles operaciones a realizar, ligadas entre si a través de operadores tipo unión ('Y') y exclusión ('O'), en el que la solución ofrecida (Volúmenes básicos) no es más que uno de los posibles caminos en el árbol que la consigue. El resto de caminos representan otras soluciones, resultado de agrupar Elementos Característicos de Mecanizado de una solución previa, por ejemplo, la de los Volúmenes básicos.

Las agrupaciones giran alrededor de un elemento conductor que lo permite. El elemento conductor depende, sin lugar a dudas, de criterios tecnológicos y económicos propios del resto de etapas de la Planificación, como por ejemplo, minimizar amarres, reutilizar herramientas, favorecer ciertas operaciones, aprovechar recursos (máquinas), mejorar acabados, etc. En cualquier caso se corresponde con las soluciones alternativas que ofrece un CAPP (Computer Aided Process Planning).

Las agrupaciones se realizarán entre Volúmenes pertenecientes a un mismo grupo de procesos, según la clasificación establecida. La forma de unirlos o combinarlos es externa al propio razonamiento seguido en su obtención, como se ha comentado, y depende de aspectos conocidos en un estadio posterior al reconocimiento de los Volúmenes. De tratarlos junto al reconocimiento, se entraría en búsquedas de Volúmenes que en algunos casos se tornan recursivas y que no llegan a solución alguna, sin contar la enorme complejidad que se alcanzaría al manejar toda esta información a la vez. Otra consecuencia, directamente relacionada con la inclusión de estos aspectos en la etapa de reconocimiento, es la necesidad de

reprogramar el algoritmo de búsqueda cada vez que se quiere incluir o eliminar algún criterio de índole no geométrico para realizar nuevas agrupaciones.

La estructura adoptada para el proceso de reconocimiento y la información resultado (Elementos Característicos de Mecanizado), permite realizar agrupaciones bajo cualquier criterio, facilitando la validación de las agrupaciones con llamadas a los pasos apropiados del proceso de reconocimiento, por ejemplo, para comprobar que existe un perfil de herramienta compatible con todos los Elementos agrupados.

Esta forma de agrupar/validar encaja en la operativa seguida al realizar la Planificación de Procesos, ya que la solución se modifica y adapta en función de las variables y de la información de la que se va disponiendo a lo largo de la misma.

Aunque las agrupaciones se basan en criterios ajenos al proceso de reconocimiento, se han seleccionado dos características, lo más generales posibles, para mostrar un ejemplo: 'el acceso' y 'la compatibilidad de herramienta'.

Antes de explicar las agrupaciones que se proponen, es necesario recordar que el resultado obtenido se corresponderá con un nuevo Elemento Característico de Mecanizado, y por tanto, cumplirá con la definición que para él se ha dado en el contexto de la Tesis (mecanizable con un Proceso Tipo, en una sola operación, con una herramienta válida y con un acceso viable). Además, pueden realizarse agrupaciones incluyendo Elementos Característicos de Mecanizado resultado de una agrupación anterior, obteniéndose Elementos aún mayores y más complejos.

Es importante volver a remarcar que las agrupaciones no se efectúan en la etapa de reconocimiento, deben realizarse una vez ésta ya concluida y cuando se disponga, en función del transcurso de la Planificación, del criterio adecuado para agrupar.

10.1. Agrupación por acceso local continuo

Esta posibilidad de agrupación se presenta cuando se tienen dos o más Elementos Característicos de Mecanizado, con algún tramo en común en alguna de sus superficies. Los Volúmenes implicados serán independientes, puesto que la relación en sus tramos comunes es de convexidad, no estando relacionados por ninguna otra parte. Es precisamente la existencia de estos tramos comunes la que presagia la no presencia de geometrías intermedias, favoreciendo y facilitando encontrar un acceso a la Zona de trabajo resultante. De hecho, de forma local ya se habrá comprobado la existencia de acceso a cada Zona por separado.

Aún así, el acceso global, en el que se tiene en cuenta la geometría completa de la pieza debe comprobarse, ya que pueden existir geometrías externas a las Zonas agrupadas que obstaculicen el acceso, impedimento que en cada Elemento por separado pudo haber sido absorbido por el perfil de su herramienta.

Para que la agrupación sea posible, en los procesos tipo 'Fresado' y 'Rectificado por revolución', debe existir un mismo eje de herramienta, o una disposición en el movimiento de corte y avance común, en el caso de procesos tipo 'Torneado' y 'Limado'. En esta comprobación se utilizan los rangos angulares para cada Elemento Característico de la agrupación.

Encontrado el eje/disposición común, pueden presentarse dos situaciones: que la

forma de la herramienta para la agrupación se obtenga a partir de la composición de los perfiles de las herramientas de cada uno de ellos, o que exista una nueva forma común para los elementos de la agrupación.

Al utilizar una sola herramienta en la agrupación, el Plano de Trabajo pasará a ser único, manteniéndose o reduciéndose el número de superficies con marcas (irregularidades superficiales) debidas a la trayectoria de corte.

En la Figura 5-119 se muestra una pieza con tres Volúmenes independientes, 'V₁', 'V₂' y 'V₃', que podrán eliminarse por Brochado, perteneciente al grupo de procesos tipo 'Limado'. Pueden agruparse en un solo Elemento Característico de Mecanizado con una herramienta como la mostrada en la figura, resultado de una composición de las herramientas necesarias en cada volumen por separado.

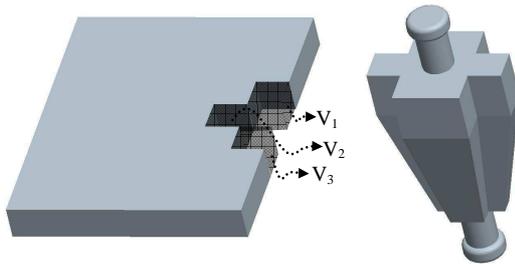


Figura 5-119. Agrupación de Volúmenes en un Brochado.

Otro ejemplo se presenta ante una operación de taladrado, y una o varias posteriores de retaladrado, lamado, ..., donde adecuando la forma de la herramienta (uniendo los perfiles) se consigue realizar una única operación, 'taladrado de forma' que genere a los Volúmenes implicados, 'V₁' y 'V₂', en el ejemplo de la Figura 5-120.

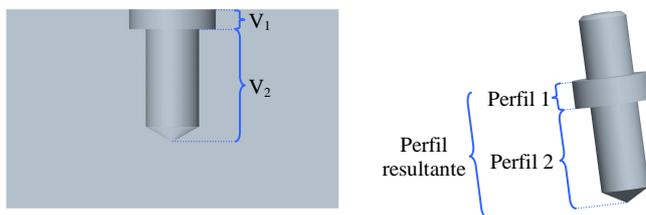


Figura 5-120. Agrupación de Volúmenes en un proceso tipo 'Fresado'.

Aunque en este ejemplo sea más evidente, siempre que en una agrupación se unan perfiles de herramientas, es necesario comprobar la validez física del perfil resultante y el acceso global (en el que interviene toda la geometría de la pieza). Por ejemplo, en la Figura 5-120 si el taladro de menor diámetro 'V₂' se encuentra antes que el de mayor diámetro 'V₁', las condiciones para la agrupación se siguen cumpliendo, aunque es necesario comprobar si al utilizar la herramienta con el nuevo perfil, unión de los dos, la forma geométrica final puede obtenerse.

El Plano de Trabajo vendrá impuesto por la posición final de la punta de la herramienta, aunque las posiciones que ocupaban los Planos de Trabajo para las Zonas de Mecanizado implicadas serán respetadas por las distintas partes del perfil

de la herramienta. En el ejemplo de la Figura 5–120, la base del Volumen 'V1' marca su Plano de Trabajo, mientras que para el Volumen 'V2' es su propio fondo quien lo establece. En la agrupación se utilizará el de 'V2', aunque la forma final de la herramienta mantiene una parte destinada a conseguir la superficie asociada al Plano de Trabajo de 'V1'.

La Figura 5–121 presenta un ejemplo de posible agrupación, donde el perfil de la herramienta no se compone, hay uno compatible con todos los perfiles obtenidos por separado. En la agrupación se aprecia un cambio sustancial en la trayectoria de corte debido al nuevo Plano de Trabajo. Debe señalarse, que aspectos como el amarre de la pieza, que pueden invalidar la agrupación, no se han tenido en cuenta, aunque como ya se ha planteado, pueden ser características a añadir en una fase de agrupación más elaborada.

En la Figura 5–121 se distinguen cuatro superficies, 'S1', 'S2', 'S3' y 'S4', que pertenecen a cuatro Volúmenes diferentes y cuyos ejes de herramienta, marcados en azul en la figura, poseen orientaciones distintas. Los cuatro Volúmenes pueden ser agrupados en uno sólo, reorientando el eje de la herramienta a uno común a todas las superficies, como se indica en la figura.

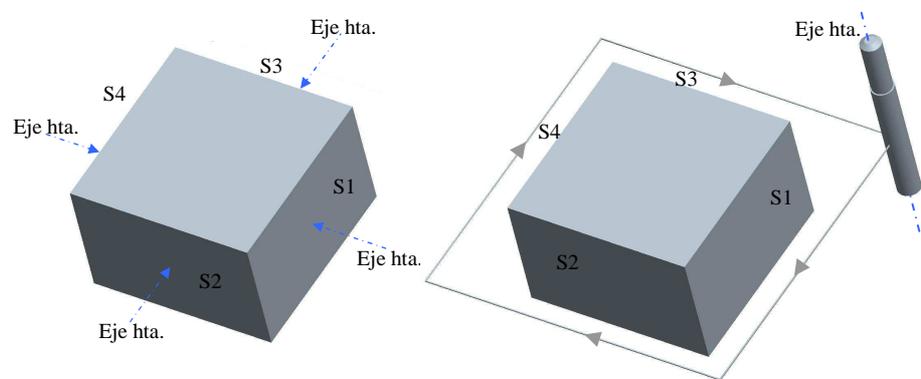


Figura 5–121. Agrupación de Volúmenes para un 'Perfilado'.

El Plano de Trabajo quedará normal al nuevo eje de herramienta y en una posición apta para que el perfil de la herramienta elegido mecanice todas las superficies de la agrupación. Como es obligatorio, el movimiento en el Plano de Trabajo no sufre discontinuidades al realizar el mecanizado completo.

10.2. Agrupación por acceso local no continuo

A diferencia del tipo de agrupación anterior, en este caso no hay una relación de vecindad geométrica entre los Elementos a agrupar, sin embargo, como se tendrá ocasión de comprobar en los ejemplos, existe la posibilidad de una eliminación conjunta mediante una sola operación. Al no existir vecindad entre ellos, los criterios seguidos para agruparlos deberán contemplar mínimamente que el acceso continuo a los dos es posible. Al estar los Elementos que se quieren agrupar, físicamente separados, la comprobación de la validez del perfil resultado y del acceso global se complica.

Como es lógico, para agrupar debe existir un eje de herramienta común a todos los volúmenes implicados, pudiendo una vez más, realizar una composición de los perfiles/forma de las herramientas implicadas o tener una forma común a todos ellos. En resumen, debe encontrarse una única herramienta para el Volumen resultado de la agrupación.

En la Figura 5-122 se muestra un ejemplo sobre Volúmenes inconexos, asociables a operaciones de taladrado en un proceso del tipo 'Fresado', pudiendo ser agrupados en una sola operación con tan solo aumentar la longitud de la herramienta. No debe confundirse con una composición del perfil de la herramienta, ya que en este caso el perfil se mantiene, sólo se actúa sobre uno de los parámetros de su definición, la longitud.

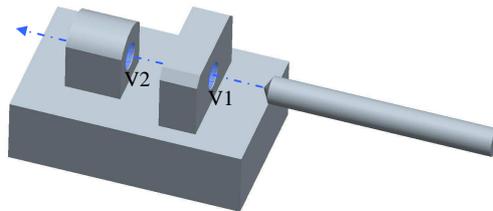


Figura 5-122. Agrupación de Volúmenes en un posible 'Taladrado profundo'.

En estos casos, los Planos de Trabajo suelen ser paralelos y situados en posiciones espaciales diferentes. Al igual que en los casos anteriores no deben aparecer discontinuidades que invaliden la agrupación sobre el nuevo Plano de Trabajo común.

La Figura 5-123 (a) muestra una operación de cilindrado en un proceso tipo 'Torneado'. Los Volúmenes en azul, 'V1', 'V2' y 'V3', generados inicialmente por separado, pueden ser agrupados dando lugar a un único Elemento Característico de Mecanizado, en el cual se tendrá una única forma de herramienta y Plano de Trabajo.

En la Figura 5-123 (b) se muestra un caso bastante común, en el que una pieza posee varios salientes, que mantienen la misma altura y forma en sus superficies. Aunque, para la superficie "techo" de cada saliente se generará un Volumen distinto, todos ellos mantienen el mismo Plano de Trabajo, el mismo eje de herramienta y la misma forma del perfil en ésta, pudiéndose agrupar en único Elemento Característico de Mecanizado asociable a una operación de 'planeado', por ejemplo.

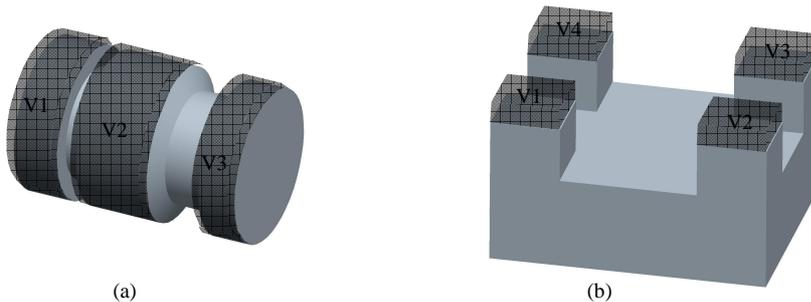


Figura 5-123. Agrupación de Volúmenes para un posible 'Cilindrado' y 'Planeado'.

En la Figura 5–124 (a) se aprecia una ‘ranura’, que por razones de vecindad, quedará descompuesta en dos Volúmenes inconexos, conteniendo una única superficie cada uno. Ambos pueden eliminarse a la vez con una misma herramienta, con un eje paralelo a ambas superficies y normal a la base de la pieza. Además, ante esta nueva configuración, sin importar excesivamente el radio de la herramienta, aunque si su longitud o altura, las dos superficies quedarán mecanizadas sin marcas.

En cada Volumen por separado el eje de la herramienta preferente se orienta normal a la única superficie integrante del Volumen, después del análisis de la accesibilidad se situará paralelo a ella. En la agrupación, se mantiene el eje paralelo a ambas. El Plano de Trabajo será único y quedará normal a la nueva disposición del eje de la herramienta.

Si las superficies enfrentadas, en la ranura del ejemplo, no fueran paralelas (Figura 5–124 (b)), se tendrían dos Planos de Trabajo en distinta posición y no paralelos. El Plano de Trabajo resultante seguirá siendo el comentado, aunque ante esta agrupación el perfil de la herramienta quedará inclinado, herramienta cónica, capaz de generar las dos superficies a la vez.

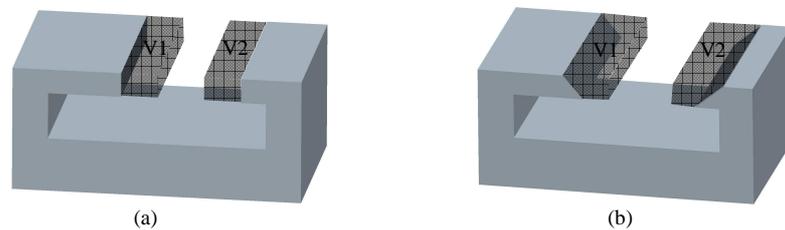


Figura 5–124. Agrupación de Volúmenes en una posible ‘Ranura pasante’.

10.3. Metodología propuesta

Un aspecto destacable en la metodología seguida, es la comprobación de las tres características claves que deben respetarse para que la agrupación resultado cumpla con la definición de Elemento Característico de Mecanizado impuesta en la Tesis:

- Existencia de un eje de herramienta con una única orientación válida para todos.
- Continuidad en el corte sobre el Plano de Trabajo común a la agrupación.
- No aumentar el número de superficies con marcas en la agrupación.

La primera de ellas es fundamental, ya que no debe cambiarse la orientación de la herramienta durante el mecanizado del Volumen resultado de la agrupación, por lo tanto, debe encontrarse una orientación favorable. De no ser los ejes de las herramientas coaxiales, o poderlo ser cumpliendo con los rangos de validez en su orientación, no se continuará en el proceso de agrupación.

Una vez conocido el Plano de Trabajo, debe verificarse que todas las superficies resultado de la agrupación son realizables con una trayectoria continua sobre él, sin importar la dirección y sentido seguido. Para tal fin, debe emplearse un algoritmo

similar al de construcción del perfil de la herramienta, tomando como superficie 'semilla' a la/las incluidas en el Plano de Trabajo, o de no existir 'semilla', se seguirá un perfil obtenido a partir de las propias superficies de la agrupación, de forma equivalente a lo comentado en el Punto 8.2.4.

Finalmente se comprobará que no aumenta el número de superficies con irregularidades superficiales, marcas, respecto a las que se tenían por separado, evitando de esta forma entrar en un mecanizado de superficies esculpidas. Para comprobarlo, debe conocerse el Plano de Trabajo y las superficies a él ligadas, puesto que va a ser por donde discurra la trayectoria de corte.

La Figura 5–125 muestra los pasos que permiten establecer la agrupación vista.

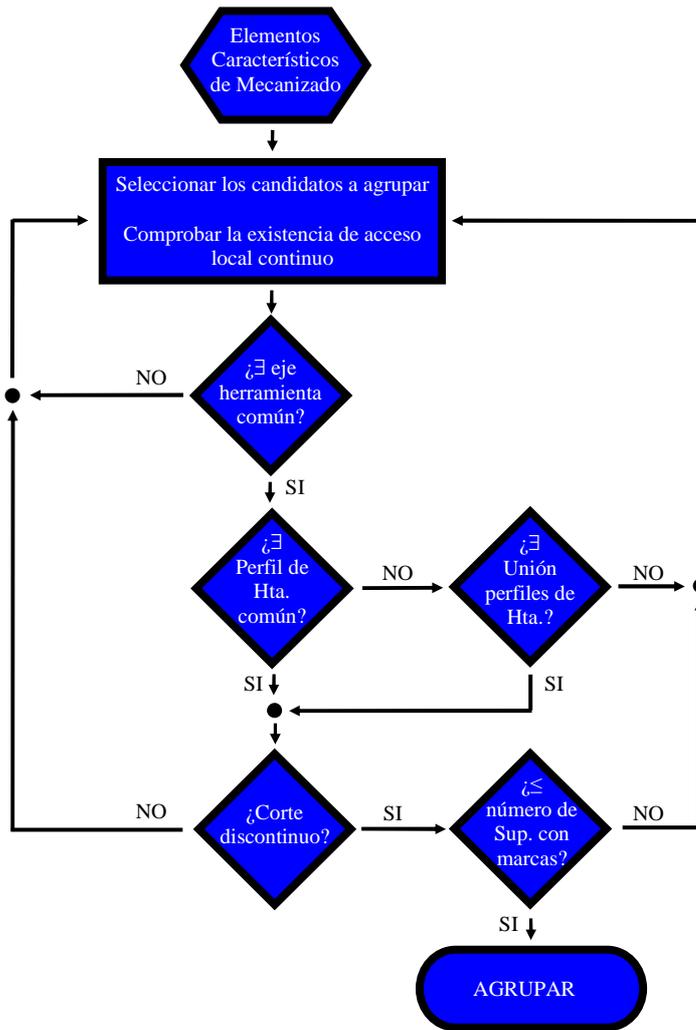


Figura 5–125. Pasos para agrupar Elementos Característicos de Mecanizado.

Se ha dejado en el paso “Seleccionar los candidatos a agrupar”, cualquier

consideración sobre la cantidad y el orden a seguir en la selección de Elementos a agrupar, por ejemplo, de dos en dos.

El conjunto de Elementos Característicos de Mecanizado sobre el que se trabaja puede no ser estático, ya que la agrupación es aplicable sobre Elementos resultado de agrupaciones previas.

Capítulo 6. Pruebas y discusión de resultados

El grupo de procesos seleccionado para el desarrollo de los algoritmos es el 'Fresado', ya que por su amplia utilización en la industria y por la gran variedad de geometrías con él alcanzables, lo hacen un magnífico candidato para abordar el problema del reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado.

Realizando una comparación entre los distintos grupos de la clasificación, el grupo de procesos tipo 'Fresado' es sin duda alguna el más genérico y complejo de todos. El 'Rectificado por revolución' puede considerarse como una simplificación del 'Fresado', con alguna particularidad como se ha comentado en el capítulo anterior, pero con el que mantiene una compatibilidad entre geometrías. El grupo correspondiente al 'Limado', posee aún mayores restricciones, por lo que admite un tratamiento informático más simple, una vez realizada la criba geométrica. Por otra parte, el grupo 'Torneado', debido a las propias características de los procesos que lo integran, permite prescindir de la tercera coordenada (la relacionada con la revolución de la pieza) pudiéndose simplificar considerablemente. Además, el corazón del proceso de reconocimiento: la obtención de los Volúmenes básicos, es la misma para todos ellos.

Para comprobar el funcionamiento se han llevado a cabo distintas pruebas sobre dos grupos de piezas, uno formado por piezas sencillas, donde con una forma geométrica mínima se pone en evidencia alguna situación especial o problemática, y otro compuesto por piezas genéricas más complejas, obtenidas del 'NIST repository', [Ref. 78].

El 'NIST repository', está formado por un conjunto de piezas (modelos geométricos) de muy diversos formatos, destinadas a ser utilizadas por desarrolladores de todo tipo de aplicaciones y herramientas relacionadas con el CAD. Entre ellas se encuentran las piezas almacenadas en B-Rep conformes al estándar STEP, y que han sido utilizadas por la comunidad de investigadores dedicados al reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado, para testear el comportamiento de las metodologías propuestas. Puede encontrarse una introducción sobre el objetivo en la creación del 'NIST repository', y una explicación de sus contenidos, en el artículo de Regli y Gaines, "A repository of Designs for Process and Assembly Planning", [Ref. 90].

Como se ha tratado de transmitir a lo largo de la Tesis, el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado es una cuestión vital dentro de la Planificación de Procesos automática, no sólo por el tiempo y recursos que consume, sino porque influye directamente en el resto de etapas de la Planificación, con el consiguiente efecto por todos conocidos: las decisiones tomadas en etapas tempranas en el ciclo, son decisivas sobre el tiempo y coste final.

Debido a la necesidad de mejoras y a la obligada competitividad, cada vez son más las aplicaciones de Fabricación Asistida por Ordenador que incluyen módulos dedicados al reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, que aportan una mayor automatización y mejoras. Estos módulos, debido al estado actual de los reconocedores automáticos ofrecen soluciones parciales, relacionadas en su gran mayoría, con los Elementos Característicos de Diseño o con aquellas técnicas de reconocimiento que en un ámbito de aplicación reducido ofrecen resultados satisfactorios.

Evidentemente las soluciones comerciales se han nutrido de los avances en el reconocimiento, llevados a cabo por decenas de autores que a nivel mundial trabajan en él.

En el capítulo dedicado al 'Estado del arte' se han revisado las principales técnicas, comentando sus ventajas e inconvenientes, advirtiendo que ninguna de ellas resuelve por completo el problema, ni si quiera la combinación de varias técnicas ofrece una solución definitiva. Por lo tanto, las aplicaciones comerciales ofrecen soluciones parciales, resultado de aplicar alguna de estas técnicas, restringidas a los casos seguros. No hay una técnica suficientemente madura con una aplicación general.

Las piezas de prueba seleccionadas para este capítulo, contienen aquellas geometrías que evidencian los principales problemas con los que se encuentra un reconocedor, así como algunos aspectos geométricos que se han querido destacar. Los resultados de las pruebas no van a ser comparados con las soluciones particulares de otros autores, pues ya han sido revisadas en el 'Estado del arte' y se conocen sus limitaciones. Se ha preferido comparar con alguna aplicación comercial, que utilizando las técnicas existentes, ha realizado un esfuerzo considerable para que tenga una utilización real.

Son muchas las aplicaciones CAD/CAM que incorporan módulos dedicados al reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado. Entre las que destacan: Pro/Engineer [Ref. 2], Catia [Ref. 7], Unigraphics [Ref. 10], SolidWorks [Ref. 5], DelCam [Ref. 9], GibbsCAM [Ref. 6], etc. Sin entrar en detalles, pues el

funcionamiento interno normalmente es desconocido, estos reconocedores pueden separarse en dos grupos. Un primer grupo, donde se sitúan aquellas que reconocen Elementos simples, agujeros (taladros), planeados, etc., que con toda seguridad se apoyan exclusivamente en los Elementos Característicos de Diseño. Un segundo, en el que se incorporan técnicas de reconocimiento más complejas y avanzadas.

Interesan las del segundo grupo, teniendo en cuenta las siguientes matizaciones:

- Suelen utilizar soluciones software desarrolladas por otras compañías. Empresas especializadas como, Geometric Software Solutions [Ref. 4], Engineering Geometry Systems [Ref. 8] (adquirida por DelCam) y Honeywell Federal Manufacturing and Technology (FM&T), entre otras.
- Al no disponer de soluciones definitivas, incorporan dos formas de trabajo diferenciadas, una llamada AFR (Automatic Feature Recognition) y otra llamada IFR (Interactive Feature Recognition), dejando en esta última la resolución de los casos que no es capaz de solventar la parte AFR, previa petición de ayuda al usuario (interactividad). El IFR requiere que el usuario delimite la Zona de Mecanizado y le asocie el Elemento Característico apropiado al Volumen por ella representado.
- El AFR suele quedar restringido a fresado o torneado, por separado, incluso suelen estar en módulos diferentes. En fresado trabajan sobre un conjunto acotado de Elementos Característicos de Mecanizado, como, agujeros (holes), cajeras (pockets), islas y salientes (island and ribs), redondeos y chaflanes (fillets and chamfers), entre los más importantes. En muchas ocasiones sólo trabajan sobre piezas prismáticas.
- Suelen apoyarse en los Elementos Característicos de Diseño para obtener los Elementos Característicos de Mecanizado. De hecho, la forma de diseñar en estas aplicaciones condiciona mucho a la parte CAM, ya que usa primitivas de diseño fácilmente reconocibles como operaciones de mecanizado, variando su disponibilidad en función del proceso destino, previamente seleccionado (torneado, fresado, ...).
- No permiten, y suele ser causa de errores en su funcionamiento debidos a ausencias significativas en su geometría, los Elementos Característicos incompletos, o el solape entre varios de ellos.
- No ofrecen procesos alternativos de mecanizado para la eliminación de un mismo volumen, pues limitan las soluciones desde el comienzo, ya que se accede al reconocimiento automático desde un módulo concreto, fresado, torneado, ...
- No todas las aplicaciones CAD/CAM que incluyen la opción de reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, permiten trabajar sobre el estándar ISO10303 (STEP).

En el mercado se encuentran empresas, como es el caso de 'STEP Tools, Inc.', [Ref. 3], que desarrollan y comercializan una serie de librerías y aplicaciones software que permiten manejar fácilmente el estándar STEP. Entre las aplicaciones que comercializa STEP Tools se encuentra ST-Plan, a través de la cual se puede realizar un reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado, tanto de forma interactiva como automática, con muchas de las limitaciones antes expuestas. Para

realizar el reconocimiento automático usa el motor desarrollado por 'Honeywell Federal Manufacturing and Technologies', plasmado en la aplicación FBMAACH (Feature Based Machining). Motor que incorporan la mayor parte de las aplicaciones CAD/CAM del segundo grupo.

Las soluciones que ofrece ST-Plan no se apoyan en la secuencia de diseño seguida en la pieza, importa el modelo directamente en STEP. Además, no se aprecia ningún tipo de criba sobre el resultado proporcionado, en ocasiones y sobre resultados dudosos, las aplicaciones comerciales no se arriesgan a dar falsos Elementos Característicos de Mecanizado, simplemente no dan respuesta.

La aplicación mayoritariamente utilizada en las comparaciones, como se tendrá ocasión de comprobar, es ST-Plan 2.0, que incluye al principal y más utilizado motor de reconocimiento: FBMAACH en su versión 5.4. Disponible a partir de una licencia temporal (de evaluación) ofrecida por STEP Tools.

Las pruebas realizadas lo han sido en ambos sentidos, esto es, las piezas ejemplo que incluye ST-Plan han sido probadas con el software desarrollado en la Tesis, y una parte de la batería de piezas utilizadas en la Tesis, propias y procedentes del 'NIST Repository', se han probado con el ST-Plan.

La impresión general que ofrece el AFR de FBMAACH, incluido en el ST-Plan, es muy satisfactoria en el reconocimiento de agujeros, cajeras y escalones puros, aunque se han detectado problemas en el manejo de superficies no planas y geometrías complejas (con existencia de salientes, protusiones). Algunos de estos problemas se comentarán en parte de las piezas que a continuación se muestran.

Es preciso aclarar, que la información sobre el algoritmo de reconocimiento utilizado por el FBMAACH, y las consideraciones de interpretación exactas, no se conocen. Sólo se ha contado con la ayuda del programa y la estructura de datos de la solución mostrada, que permite de una forma visual, entender la relación entre las superficies integrantes y el Elemento reconocido.

Con las piezas seleccionadas para este punto, propias y del NIST, se va a seguir la siguiente estructura:

- Exponer los aspectos que se quieren evidenciar. Interés de la pieza.
- Mostrar una imagen 3D de la pieza en la que aparecen. Se indicará si la pieza pertenece al 'NIST repository' o no.
- Explicar la solución obtenida aplicando el software desarrollado, acorde al razonamiento teórico expuesto en la Tesis, mostrando imágenes capturadas durante la ejecución del mismo.
- Comentar la solución ofrecida por FBMAACH en las piezas más representativas.

1. Ejemplo de funcionamiento ante superficies convencionales, no sólo planas

La región que interesa en esta pieza, Figura 6-1 (a), es la "cajera" central con

todas sus aristas, exteriores e interiores, redondeadas. En esta región aparecen superficies planas, cilíndricas, esféricas y tóricas.

El interés por esta pieza, es la inclusión de superficies no sólo planas (no es una pieza prismática), para verificar que la teoría explicada realmente funciona con cualquier tipo de superficie (superficies regulares). Además, es un buen ejemplo para comprobar el funcionamiento de algoritmos concretos, como es el caso del encargado de obtener los rangos de orientación válidos para el eje de la herramienta ante superficies no planas.

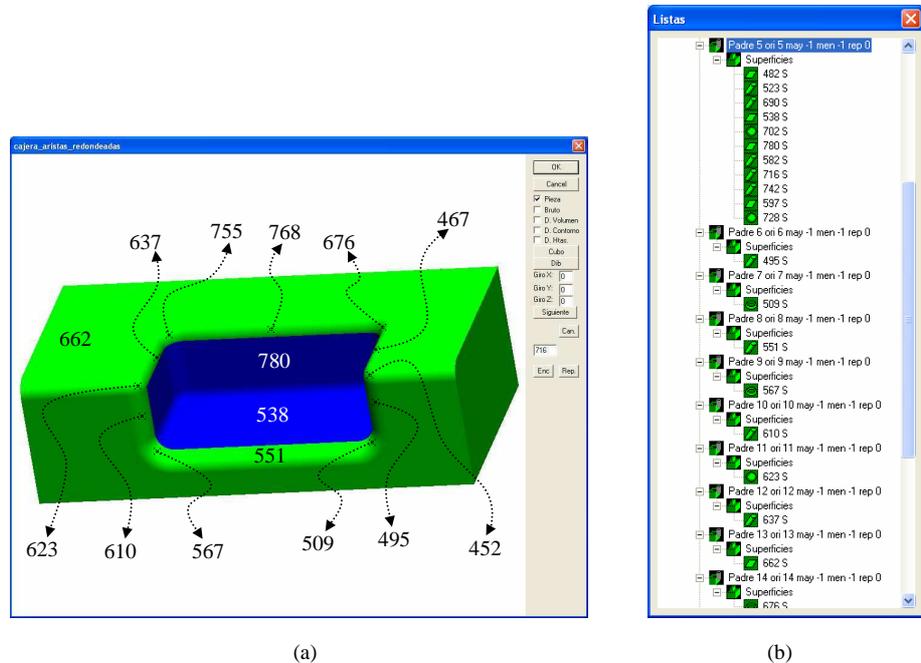


Figura 6–1. Pieza ejemplo: 'Cajera_aristas_redondeadas'.

Puede verse, Figura 6–1 (b), que el proceso de reconocimiento encuentra un Volumen, 'Padre 5', formado por 11 superficies y que representa la gran cajera central, de esta cajera sólo se han etiquetado dos, la '780' y la '538'.

Las superficies de la figura, '768', '755', '637', '623', '610', '567', '551', '509', '495', '452', '467' y '676', no se incorporan al Volumen 'Padre 5', porque no mantienen relación de concavidad con las incluidas en él. Aparecen en el resto de Volúmenes de la pieza, una en cada Volumen, ya que son convexas con todas las que les rodean.

Aprovechando la pieza ejemplo puede llevarse a cabo una agrupación del tipo, 'acceso local continuo', entre 'Padre 5' y los Volúmenes que contienen a las superficies, '452', '467', '676', '768', '755' y '637'. La superficie 'semilla' será la '538' requiriendo una herramienta con eje normal a ella, de punta esférica para conseguir las transiciones interiores, y con un perfil que incluya la transición convexa a la altura adecuada para generar al resto de superficies agrupadas (superficies de transición con la '662').

2. Ejemplo de múltiples ‘semillas’ donde sólo una es válida

La pieza de la Figura 6–2 (a), se ha seleccionado para mostrar que la ‘semilla’ correcta no siempre es la primera, y queda condicionada a encontrar con ella una herramienta válida para el Volumen. También muestra el rango de validez permitido en la orientación de la herramienta que ofrece la Zona de Mecanizado tras aplicar la metodología explicada. Debe recordarse, que la búsqueda es para el grupo de procesos tipo ‘Fresado’.

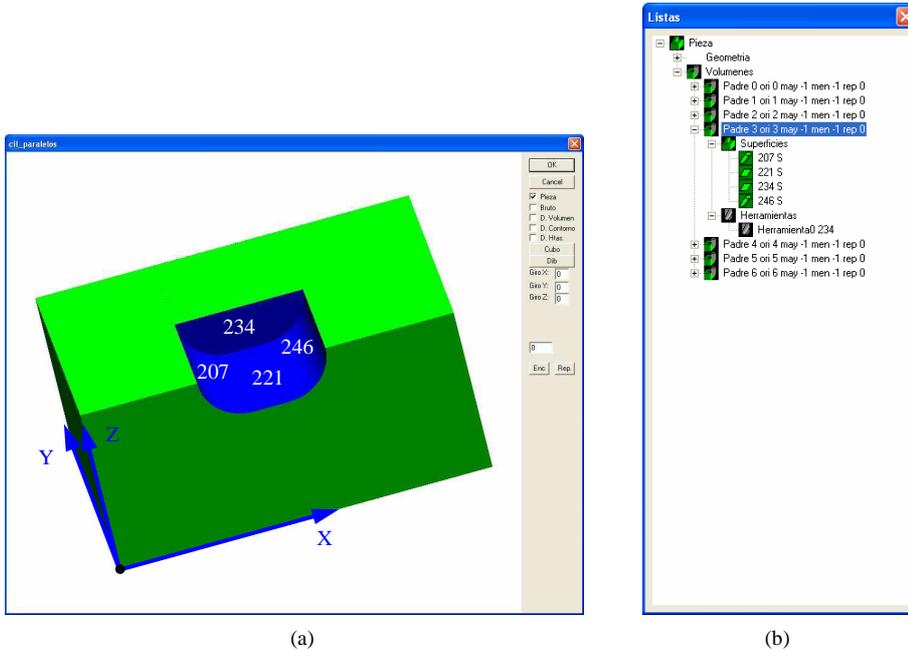


Figura 6–2. Pieza ejemplo: ‘Cil_paralelos’.

La zona en azul representa al Volumen ‘Padre 3’, este Volumen contiene cuatro superficies, la ‘234’, ‘207’, ‘246’ y la ‘221’. En el despliegue de la Figura 6–2 (b), puede apreciarse que en el lado derecho de cada superficie aparece la letra ‘S’, informando que puede tomarse como ‘semilla’. El algoritmo empieza a buscar solución por la primera ‘semilla’ de la lista, que no permite alcanzar ninguna solución. Es al pasar a la siguiente ‘semilla’, la superficie ‘234’, cuando se encuentra un perfil de herramienta válido.

En este caso, la herramienta puede ser una cilíndrica de punta plana y radio menor o igual al de las superficie ‘207’ y ‘246’, respetando la transición a 90° entre la ‘234’ y cualquiera de las otras tres.

Aunque el árbol de Volúmenes, Figura 6–2 (b), no muestra el rango de validez para la herramienta, independientemente de las limitaciones que impondrá el propio perfil obtenido, los valores disponibles para la orientación del eje de la herramienta son los que a continuación se indican (referidos al sistema de coordenadas mostrado

en la figura):

- Alrededor del eje 'X' el rango va de 90° a 180° .
- Alrededor del eje 'Y' el rango va entre -90° y 90° .
- Alrededor del eje 'Z' queda fijado por la elección en la 'X' y en la 'Y'.

La herramienta que propone la aplicación, tomando como 'semilla' a la superficie '234', es la mostrada en la Figura 6-3 (representación del perfil de revolución que ofrece la aplicación desarrollada), donde se aprecia la necesidad de un perfil recto, herramienta cilíndrica. Al ser la 'semilla' plana, la punta de la herramienta será plana. El resto de parámetros de definición de la herramienta y del mango, como sus diámetros máximos y mínimos permitidos, se obtendrán en la etapa de análisis del acceso. Por ejemplo, el diámetro máximo de la herramienta quedará fijado a 70mm, al ser este el diámetro de las dos superficies cilíndricas "pared" de la Zona, la '207' y la '246'. Si algún valor no queda fijado significará que no hay restricción en él.

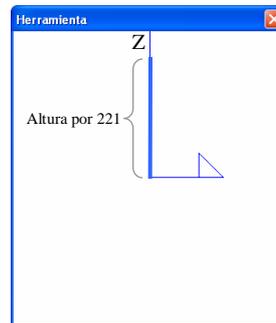


Figura 6-3. Perfil de la herramienta para 'Cil_paralelos'.

3. Ejemplo de construcción de perfil de herramienta no estándar

Aunque lo normal en un proceso tipo 'Fresado' es encontrar geometrías que requieran herramientas estándares, en su mayoría cilíndricas/cónicas de punta plana o punta esférica, pueden presentarse situaciones en las que se necesite una herramienta de forma, con un perfil concreto. La metodología propuesta trabaja con cualquier tipo de herramientas, puesto que construye el perfil de la herramienta necesario, indicando las posibles variaciones admitidas.

La geometría de la pieza 'Perfil_especial', Figura 6-4 (a), no representa problema alguno, respecto a volúmenes, intersecciones, etc., ya que no existen superficies Conflictivas de ningún tipo. Se obtienen un total de diez Volúmenes 'Padre' necesarios para la consecución de la pieza final (de 'Padre 0' a 'Padre 9', Figura 6-4 (b)). El material de partida considerado mayor a la pieza en todas sus caras.

La pieza ejemplo posee una 'ranura' de fondo plano y paredes curvas. Para realizar el mecanizado de esta 'ranura', Volumen 'Padre 1' (representado en azul en la figura), se requiere un perfil para la herramienta formado por tres tramos no tangentes

entre si, dos de ellos curvos y de distinto radio. La punta de la herramienta será plana.

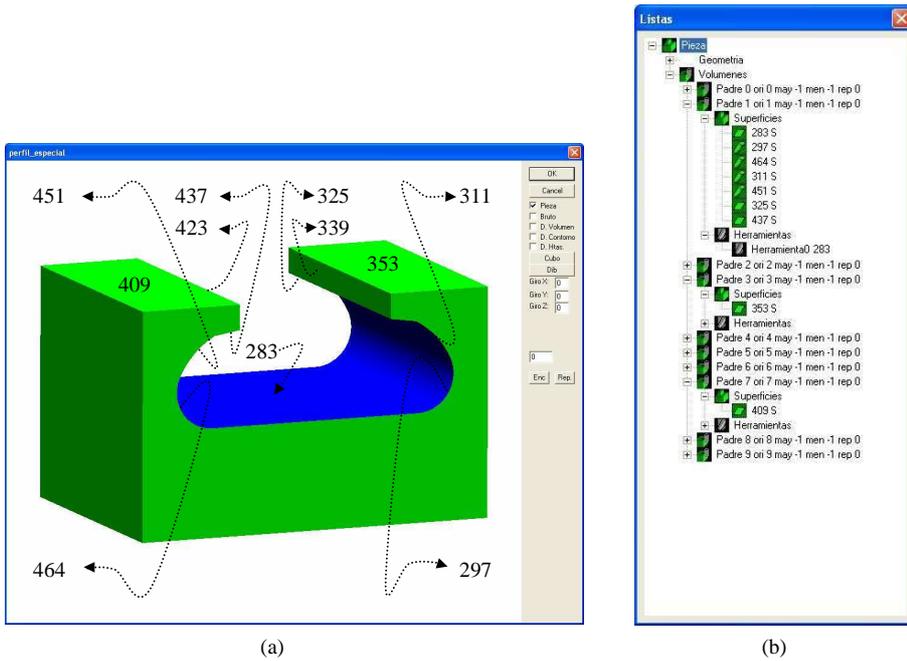


Figura 6-4. Volumen 'Padre 1' de 'Perfil_especial'.

Tomando como 'semilla' a la superficie '283', se obtiene el perfil para la herramienta mostrado en la Figura 6-5 (a). En la Figura 6-5 (b) se muestra una representación sólida de una posible herramienta con este perfil. Se trata de una fresa convexa de forma.

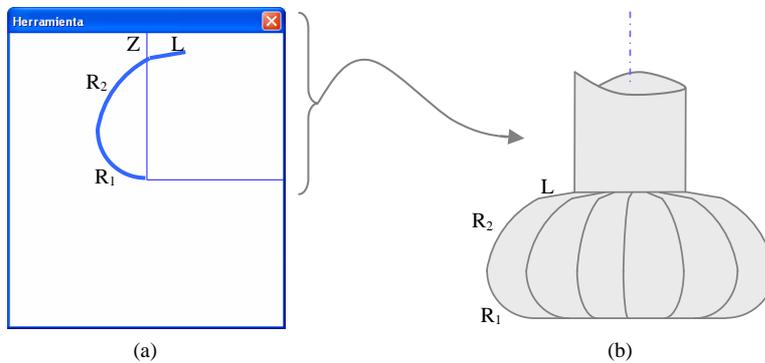


Figura 6-5. Herramienta '0', tomando como 'semilla' a la superficie '283'.

El perfil de la Figura 6-5 (a) será desplazado. para dar cabida al mango de la herramienta, ya que cruza al eje 'Z'. Al desplazarlo se estará imponiendo un valor al diámetro mínimo de la herramienta. Si el desplazamiento del perfil respecto al eje 'Z' es superior al valor de 'R₁', y aunque la relación de la superficie 'semilla' con sus

vecinas directas es de tangencia, la punta de la herramienta será plana. En el análisis de la accesibilidad se concretarán o limitarán el resto de parámetros de herramienta, por ejemplo, el diámetro máximo del mango quedará acotado por la distancia entre las superficies '423' y '339'.

Al observar el árbol de Volúmenes, Figura 6–4 (b), se aprecia que las superficies '353' y '409' están en Volúmenes diferentes, 'Padre 3' y 'Padre 7' respectivamente, se debe a que entre ambas superficies no existe relación de vecindad por concavidad, ni directa, ni a través de otras superficies. Sin embargo, observando la pieza puede pensarse en realizar un 'planeado' que genere a ambas superficies a la vez. Situación que no presenta mayor problema, puesto que puede realizarse una agrupación del tipo 'acceso local no continuo'. Una situación similar se da ante las superficies '339' y '423', no relacionadas por vecindad y que podrían generarse en la misma operación, un 'ranurado' por ejemplo, con una herramienta de diámetro adecuado.

4. Ejemplo de geometría local decisiva

Un reconocedor de Elementos Característicos de Mecanizado debe ser capaz de tratar cualquier superficie que aparezca en el modelo 3D de la pieza, no sólo por el tipo de superficie, también por su tamaño y disposición. Cualquier superficie que haya sido incluida en el modelo es necesaria y, de no coincidir con la del bruto o material de partida, deberá ser considerada y generada.

La pieza seleccionada y denominada 'Center', perteneciente al NIST Repository (Figura 6–6 (a)), de apariencia sencilla, esconde un par de pequeñas superficies que complican el reconocimiento y asignación de herramienta para las dos "ranuras" de la parte derecha de la pieza. Las superficies son, la '13990' y la '11450', mostrada esta última en el detalle de la Figura 6–6 (b). Se aprovecha esta pieza para ver el comportamiento, en la generación de Volúmenes, ante una superficie Conflictiva Menor, la '6820'.

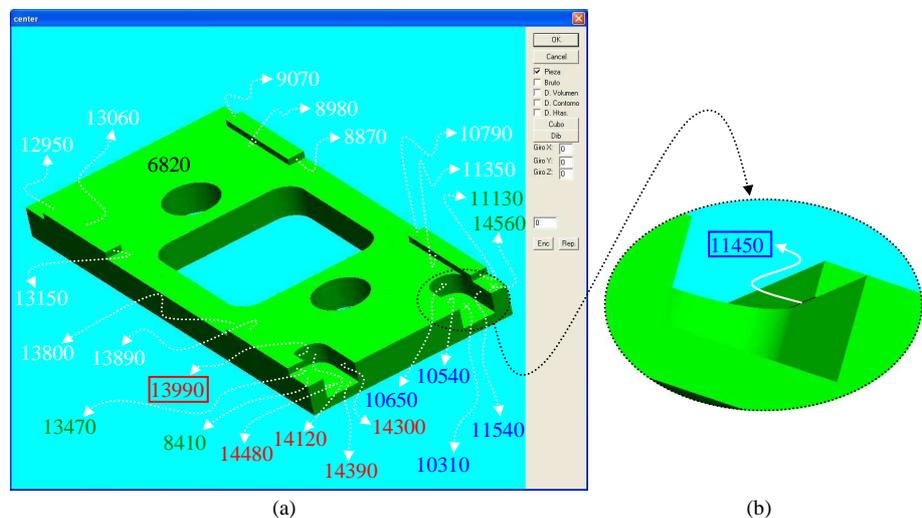


Figura 6–6. 'Center' y detalle de una de sus partes complicadas.

Debido a las transiciones a 90° entre las superficies de los Volúmenes ‘Padre 5’, que contiene a la ‘11540’, y ‘Padre 15’, que contiene a la ‘13990’, se hace obligatorio utilizar como ‘semilla’ a la superficie ‘10310’ en el primer caso, y a la ‘14390’ en el segundo, Figura 6–7 (c). Esta situación obliga a un perfil de herramienta, en ambos casos igual, y que se cierra en parte por arriba para poder generar las superficies ‘11450’ y ‘13990’.

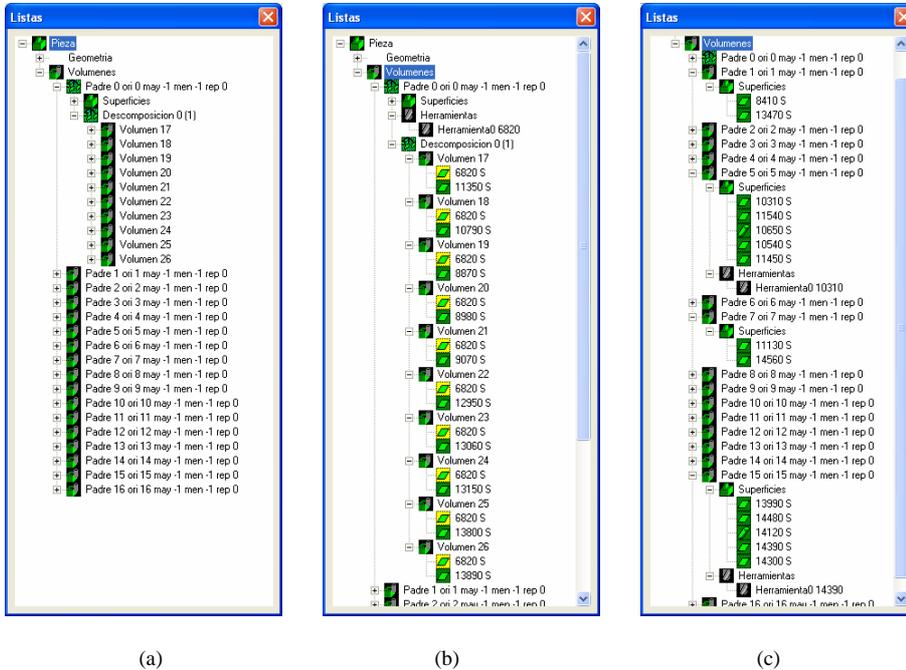


Figura 6–7. Árboles de solución para ‘Center’.

En la Figura 6–8 (a) puede verse el perfil correspondiente al cuerpo de la herramienta para la “ranura” de la derecha, tomando como ‘semilla’ a ‘10310’. La superficie ‘11450’ está incluida en el Volumen ‘Padre 15’, como debe ser, pero no influye en el cuerpo de la herramienta, ya que en la construcción del perfil se detecta su disposición respecto a la ‘semilla’ y se excluye. Su influencia será tenida en cuenta en el análisis de la accesibilidad (Punto 9 del Capítulo 5). En este análisis, la superficie ‘11450’ obliga a cerrar la herramienta por arriba, reduciendo por tanto el ancho disponible para su mango. El diámetro máximo vendrá limitado por la ‘10650’, y la punta plana, obligada por las transiciones a 90° entre la base de la ranura (superficie ‘semilla’) y las paredes.

En la Figura 6–8 (b) se muestra una representación completa de la herramienta acorde al perfil, incluyendo las restricciones comentadas. El tratamiento de la ranura de la “izquierda” sigue un razonamiento idéntico.

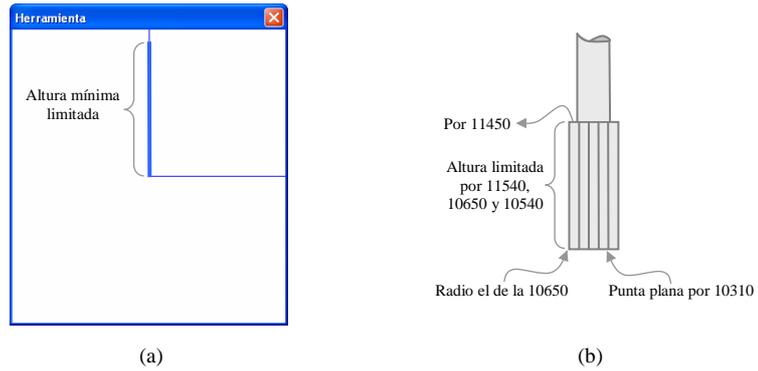


Figura 6–8. Perfiles de herramientas para ciertas zonas de ‘Center’.

El detalle mostrado en la Figura 6–6 (b) se corresponde con una ranura en forma de ‘T’, a la que le faltan partes de lo que se puede denominar el “techo” de la ranura, se trata pues de un Elemento Característico de Mecanizado incompleto.

En la Figura 6–9 (a) se muestra en detalle una ranura en ‘T’ completa y no pasante. Para obtener/fijar valores como el “ancho máximo de mango” o la “zona mínima cortante en la parte superior de la herramienta”, se realiza una proyección sobre el Plano de Proyección (relacionado con la superficie ‘semilla’), Figura 6–9 (b), donde poder medir este tipo de distancias (luces y sombras). En la Figura 6–9 (c) se muestra una imagen de una herramienta para un proceso tipo ‘Fresado’ que cumple con estas especificaciones.

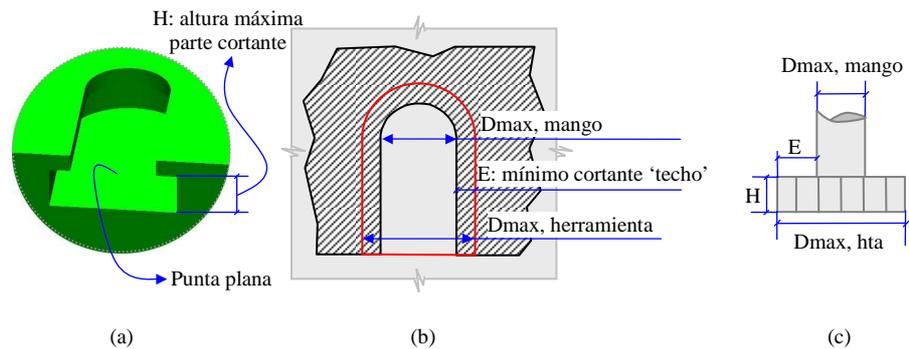


Figura 6–9. Ejemplo de la ranura en ‘T’ y de su proyección en un plano.

Aparte del problema comentado, existe una superficie Conflictiva Menor (la ‘6820’) que provoca la ‘Descomposición 0’, donde se generan los Volúmenes, ‘17’, ‘18’, ‘19’, ‘20’, ‘21’, ‘22’, ‘23’, ‘24’, ‘25’ y ‘26’, Figura 6–7 (a). Sólo se realiza una descomposición, al existir únicamente una Conflictiva Menor. La ‘Descomposición 0’ es la alternativa al Volumen padre, en caso de que este último no pueda realizarse. Se trata de soluciones ‘Or’, excluyentes.

Ante una Conflictiva Menor no se debe descartar la posibilidad de llevar a cabo el

mecanizado del Volumen padre, 'Padre 0' en este caso, en una sola operación. En este ejemplo, tomando como 'semilla' a la superficie '6820' se encuentra una herramienta capaz de generar a 'Padre 0'. Esta herramienta es una fresa de punta plana (debido a las transiciones a 90° con la 'semilla'), Figura 6–8 (a), en un principio sin límite de diámetro y con una altura de filo impuesta por las superficies, '12950', '13060', '13150', '9070', '8980', '8870', '13800', '13890', '10790' y '11350', que dan altura a las cuatro protusiones situadas sobre la superficie '6820', en este caso coincidentes. Al encontrar solución en el Volumen 'Padre 0', no se busca en su descomposición (Figura 6–7 (b)).

Al igual que se ha visto en los ejemplos anteriores, existen agrupaciones, más o menos evidentes, que podrían realizarse para aprovechar la herramienta, la operación, el amarre, o cualquier otro aspecto deseado. En este caso, por ejemplo, puede realizarse una agrupación del tipo, 'acceso local no continuo', con los Volúmenes 'Padre 1' ('8410' y '13470') y 'Padre 7' ('14560' y '11130'), ver Figura 6–7 (c), donde la 'semilla' incluirá a las superficies '8410' y '14560', mecanizándose con el cuerpo de la herramienta las otras dos.

Otra posibilidad, es agrupar a 'Padre1' y 'Padre 7' con 'Padre 0', por 'acceso local continuo', ya que las superficies '13470' y '11130' pertenecen a dos de las protusiones contenidas en la superficie '6820', con cuyas superficies mantendrán relación de vecindad convexa. Además, al quedar las superficies '8410' y '14560' al mismo nivel que la '6820' formarán parte de la superficie 'semilla'.

La pieza aquí mostrada y utilizada en las pruebas ('Center'), también procede del 'NIST Repository', sin embargo, entre las piezas ejemplo del software comercial probado aparece una aparentemente idéntica a ésta, en la que al ejecutar el reconocimiento automático se obtiene una solución diferente a la esperada. Analizado la geometría para averiguar las causas de las diferencias, se pudo comprobar que las superficies '11450' y '13990' habían sido eliminadas suprimiendo, por tanto, el problema del tamaño de superficies y de posibles Elementos incompletos. Se probó la pieza original del NIST sobre el software comercial sin poder obtener resultado alguno, ya que aparece un error en la apertura del fichero: '*STEP Import Failure*'.

5. Ejemplo de saliente/protusión debida a una superficie Conflictiva Mayor

La pieza llamada 'Clevis22', Figura 6–10 (a), es un buen ejemplo para mostrar el comportamiento ante la existencia de una protusión provocada por superficies Conflictivas Mayores. En estos casos no existe solución en el Volumen Padre, y debe buscarse en los Volúmenes resultado de su descomposición.

'Clevis22', es una pieza obtenida del 'NIST Repository', [Ref. 78], ante la que un planificador humano no tendría problema alguno para determinar las operaciones a realizar bajo un proceso tipo 'Fresado', pero que resulta complicado desde un punto de vista automático.

Realizando el análisis de concavidad/convexidad, aparece la Zona de Mecanizado mostrada en azul (Figura 6–10 (a)), que no puede ser generada con una única operación pues existen dos salientes de material que deben perfilarse, impidiendo un

mecanizado completo de la superficie 1158. Para completar el mecanizado de la '1158' y de las superficies '1139' y '1216', se necesitará cambiar del Plano de Trabajo, es más, las superficies '1139' y '1158' no están a la misma altura, por lo que habrá más de un cambio (mecanizado no continuo).

La razón de que todas las superficies en azul estén en un mismo Volumen es la existencia de protusiones (salientes), situación que transforma a las superficies '1158' '1228' en Conflictivas Mayores, no existiendo solución posible para la eliminación del Volumen 'Padre 3' que las contiene, si no se descompone en subvolúmenes.

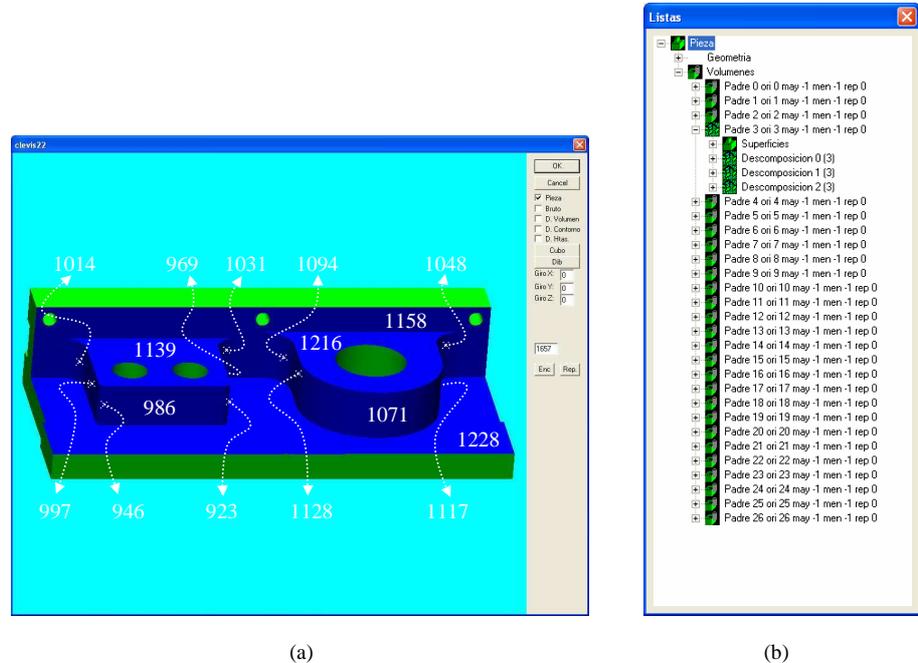


Figura 6–10. Volumen crítico en 'Clevis22' y listado de Volúmenes padre.

En la Figura 6–10 (b) se muestra el listado de los Volúmenes padre, resultado de aplicar la metodología propuesta. En este listado, el Volumen 'Padre 3' ha sido descompuesto en tres soluciones alternativas:

- La 'Descomposición 0' se corresponde con los Volúmenes generados eligiendo la primera Conflictiva Mayor, la '1158', y no recorriendo la otra, '1228', ver Figura 6–11 (a). Ambas se muestran con un icono rojo delante de su numeración, informando que son Conflictivas Mayores.
- En la 'Descomposición 1' se ha elegido a la Conflictiva Mayor '1228', no recorriendo a la otra, '1158', en busca de vecinas, ver Figura 6–11 (b).
- La última descomposición, la mostrada en la Figura 6–11 (c), se corresponde con la solución de máxima descomposición, donde no se recorre ninguna de las Conflictivas Mayores.

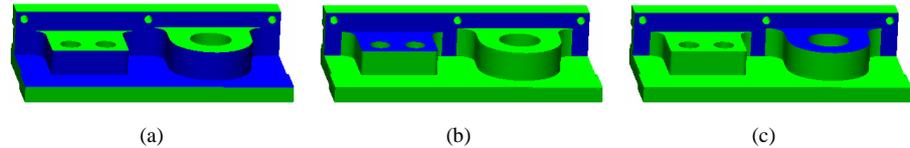


Figura 6–12. Volúmenes '27', '33' y '34' de la 'Descomposición 0' en 'Clevis22'.

En la 'Descomposición 1', se parte a la superficie Conflictiva Mayor '1228', base horizontal de la Zona de Mecanizado según la vista de la Figura 6–10 (a), generándose cinco Volúmenes, '28', '29', '30', '31' y '32'. La candidata a superficie 'semilla' será la otra Conflictiva Mayor, la '1158'.

El Volumen '28' deberá ser eliminado con una herramienta con eje normal a la superficie 'semilla', '1158', con un tramo curvo en su perfil y de radio, el común a los radios de las superficies '1014', '1031', '1094' y '1048'. De no tener alguna el mismo radio, la superficie implicada requerirá un mecanizado 3D, descartándose la solución. El problema aparece ante la existencia de esa transición curva (necesaria para mecanizar a '1014', '1031', '1094' y '1048'), que fuerza a que todas las transiciones con la superficie 'semilla' sean curvas, y esto no es así, ya que la transición entre la 'semilla' y las superficies, '1139' y '1216', es a 90°. El resultado es la imposibilidad de construir una herramienta capaz de satisfacer a todas las transiciones en la Zona de Mecanizado.

El resto de Volúmenes de esta descomposición, '29', '30', '31' y '32', tienen como objetivo mecanizar las superficies que por convexidad habían quedado fuera del Volumen '28'. En cada uno de estos Volúmenes se mecaniza un trozo de la Conflictiva Mayor, '1228', hasta quedar completada. Aunque no se muestren las herramientas en todos los Volúmenes, se obtendrá solución tomando un eje de herramienta normal a la 'semilla', superficie '1228', de radio cualquier valor, y de altura impuesta por el alto de cada una de las implicadas distinta a la 'semilla'.

Por último, la 'Descomposición 2', es la de máxima descomposición, a la que sólo debe recurrirse cuando ninguna de las anteriores fructifica. Será la última comprobación antes de poder afirmar que la Zona de Mecanizado estudiada no tiene solución con un proceso del grupo 'Fresado'. En la 'Descomposición 2' se han generado los Volúmenes de forma que, entre las superficies incluidas en cada uno de ellos, exista únicamente relación de concavidad. No sucede lo mismo en las descomposiciones anteriores, por ejemplo, en el Volumen '27' ('Descomposición 0') la superficie '946' es convexa a la '997'.

Esta pieza ha sido probada con el software comercial utilizado en la comparación. La detección de agujeros (Holes), ranuras (Slots) y escalones (Steps) ha sido completa y satisfactoria, mientras que se han encontrado problemas en el reconocimiento de los 'General Material Removals' (son Elementos Característicos de Mecanizado sin nombre conocido que los identifique).

En el ejemplo que nos ocupa se reconocen tres Volúmenes de mecanizado del tipo 'General Material Removals', que junto con el resto, no mecanizan por completo las superficies de la pieza y no son asociables a una única operación de mecanizado cada uno.

En la Figura 6–13 puede verse el primero de ellos. En la solución presentada se incluye a la superficie ‘1668’, referenciada en el árbol de soluciones como ‘Element-9’, la cual, para ser mecanizada con el resto de superficies del Volumen, requerirá un cambio en el Plano de Trabajo. Situación ésta que obliga a realizar dos operaciones, o a entrar en un mecanizado 3D donde la herramienta se adapta al Plano de Trabajo cambiante, dependiente éste de la geometría a mecanizar.

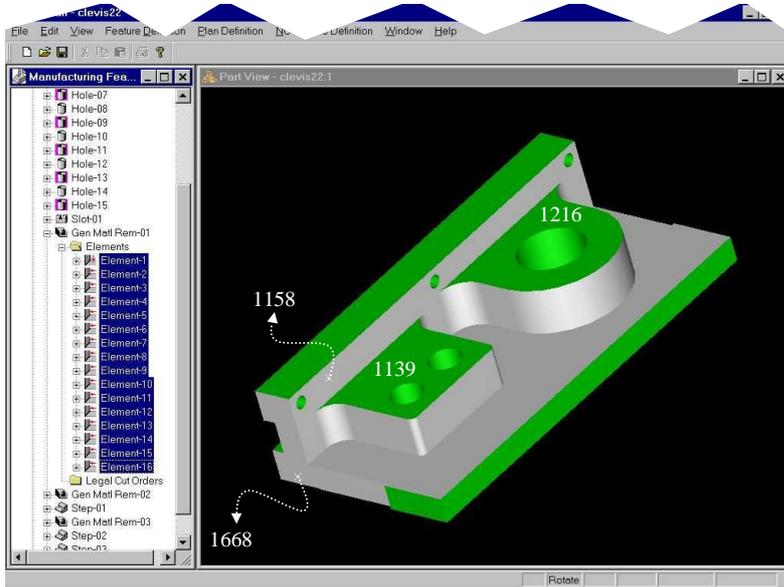


Figura 6–13. ‘Eliminación general de material’ número ‘1’ para ‘Clevis22’.

El resto de superficies que no se mecanizan, la ‘1139’, la ‘1216’ y parte de la ‘1158’, deberán mecanizarse en los otros ‘General Material Removals’.

En el segundo ‘General Material Removal’, Figura 6–14, se trata a la superficie ‘1139’ y la parte correspondiente de la ‘1158’, sin embargo, sigue apareciendo en el mismo Volumen la superficie ‘1668’. También se han incluido de nuevo las superficies ‘1094’, ‘1128’, ‘1071’, ‘1117’ y ‘1048’, que ya se habían tratado. Viendo las superficies de este Volumen, tampoco se encuentra una operación capaz de generarlas a todas, sigue necesitándose un cambio en el Plano de Trabajo.

Al observar el tercer ‘General Material Removal’, Figura 6–15, sorprende la solución mostrada, pues lejos de tomar a la superficie aún no considerada, la ‘1216’, aparecen superficies ajenas a la Zona que se estaba tratando. Es en un elemento aparte, el ‘Step-01’, donde se incluye a la superficie ‘1216’, introduciendo de nuevo a la ‘1668’ ya completada.

En lo que respecta al reconocimiento de agujeros (Holes), se especifica que superficie es el cuerpo, fondo, o la superficie de referencia sobre la que se sitúa el agujero. En las ranuras (Slots) también se aporta información sobre que superficie es pared o fondo, con lo cual cabe pensar que tiene elegida una orientación para el eje de la herramienta que los generará, aunque no se muestre.

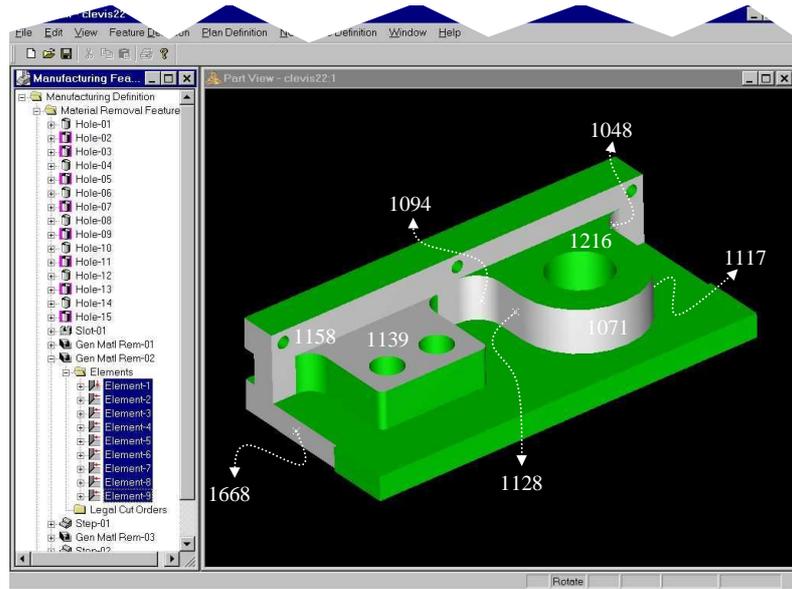


Figura 6–14. 'Eliminación general de material' número '2' para 'Cleviss22'.

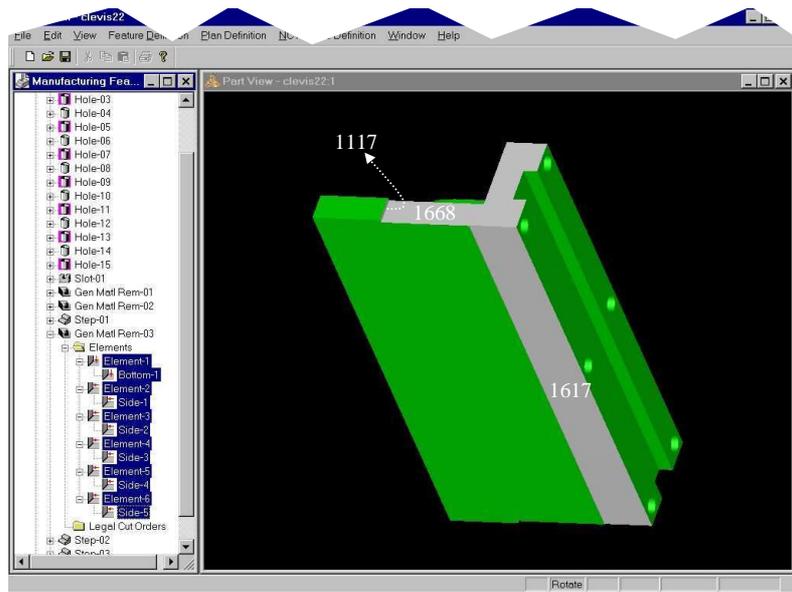


Figura 6–15. 'Eliminación general de material' número '3' para 'Cleviss22'.

6. Ejemplo de protusión sobre una superficie no plana

Esta pieza aparentemente simple, Figura 6–16 (a), se corresponde a una de las mostradas y discutidas en un artículo técnico de McMinn, G., [Ref. 74], de la empresa 'Engineering Geometry Systems', adquirida en la actualidad por la corporación 'DELICAM'. En este artículo, se comenta el reconocimiento automático llevado a cabo sobre distintos tipos de agujeros, y la necesidad de establecer un control más fino en el reconocimiento de piezas como la mostrada en la Figura 6–16 (a), de la que se dice: "La pieza es geoméricamente simple, pero ésta puede ser difícil de tratar para un reconocimiento de Elementos Característicos...".

La razón argumentada es la existencia del saliente situado en la cara exterior del cilindro principal, que incluye a su vez una caja en una de sus superficies. Esta forma geométrica complica la especificación de una trayectoria de corte a partir de las superficies de la pieza, ya que existen diferentes Planos de Trabajo apoyados en una misma superficie. Dicho de otra forma, existen superficies que deben partirse y no se sabe por donde. Como solución, propone un método que se ampara en la intervención del usuario, a través de selecciones sobre el modelo 3D de la pieza.

Ante geometrías que, bajo una apariencia simple, ocultan varios de los problemas comentados en el capítulo dedicado al 'Estado del arte', se pasa a un reconocimiento interactivo (IFR), ayudado por el usuario,

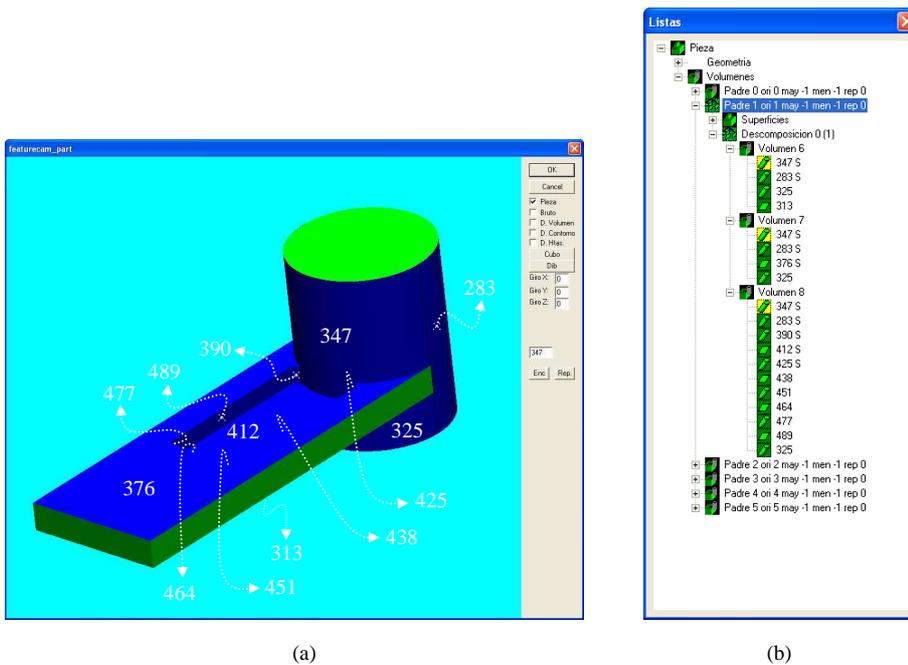


Figura 6–16. 'Cylinder_with_boss' y árbol de Volúmenes obtenido.

Analizando la Figura 6–16 (a) con más detalle, se aprecian las siguientes complicaciones:

- El saliente (boss) es una protusión, al que da paso una superficie del tipo Conflictiva Menor, la '347'.
- El cuerpo cilíndrico de la pieza, está compuesto por tres cilindros, el '347', '283' y el '325'. Estos cilindros mantienen entre si una relación de 'tangencia entre superficies iguales' y deben ser considerados como si de una única superficie se tratara.
- Las normales topológicas de las superficies cilíndricas, '390' y '425', tienen sentido opuesto al de sus correspondientes normales geométricas, siendo tangentes a la superficie '347', en la que su normal topológica tiene igual sentido que su geométrica. Dicho de forma práctica, en las superficies '390' y '425' interesa su parte interna y en la '347' la externa. Deben tratarse como superficies convexas, por lo tanto, al estar en el recorte exterior de la superficie #347 hacen que ésta se convierta en Conflictiva Menor.

Para poder mecanizar el cilindro formado por las superficies '347', '283' y '325', éste deberá partirse, mecanizándose un trozo en cada Volumen resultado de la descomposición. A efectos prácticos será la superficie '283' la que se partirá.

En la protusión (saliente), existe una 'cajera' en contacto con la superficie '347' que obliga también a partir a esta superficie, quedándose con el trozo de ella que cierra la 'cajera'.

Se ha probado el funcionamiento del software desarrollado, en base a la teoría expuesta en la Tesis, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 6–16 (b). A continuación se comentan algunos aspectos de la solución.

En la Figura 6–16 (b) pueden verse los seis Volúmenes iniciales o padre, 'Padre 0', ..., 'Padre 5', que propone la aplicación ante la geometría de la pieza. En el Volumen 'Padre 1' se incluye a la superficie Conflictiva Menor, '347', cuyo icono aparece en amarillo, y que es precisamente la que da paso a la protusión rectangular que se aprecia en la pieza.

La zona mostrada en azul en la Figura 6–16 (a), cuyas superficies aparecen identificadas, representa al Volumen 'Padre 1', que como se deduce a simple vista no puede ser eliminado con una única operación de mecanizado en un proceso tipo 'Fresado'. En su eliminación será necesario cambiar de Plano de Trabajo para poder generar todas las superficies del Volumen, además, habrá que voltear la pieza para acceder al resto.

Detectado este problema, la aplicación descompone al Volumen 'Padre 1' en los Volúmenes necesarios, donde no se recorrerá la Conflictiva Menor, dando como resultado tres Volúmenes, Volumen '6' (Figura 6–17 (a)), Volumen '7' (Figura 6–17 (b)) y Volumen '8' (Figura 6–17 (c)), no excluyentes, cuya eliminación cubre por completo al padre.

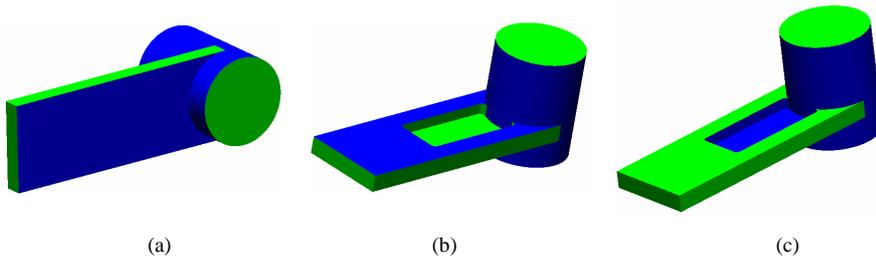


Figura 6-17. Volúmenes '6', '7' y '8' de la descomposición de 'Padre 1'.

La forma de partir la Conflictiva Menor viene determinada por las aristas de las superficies del Volumen en contacto con ella. En la Figura 6-18 (a), (b) y (c), se muestra por donde se realiza la partición para los Volúmenes, '6', '7' y '8', respectivamente. La zona rayada corresponde al trozo de superficie que no se genera al eliminar el Volumen tratado, se elimina en los otros.

El motivo de aparecer el tercer Volumen en la descomposición, Volumen '8', se debe a la existencia de la 'cajera' en la protusión rectangular, ya que posee una "pared" que es parte de la Conflictiva Menor.

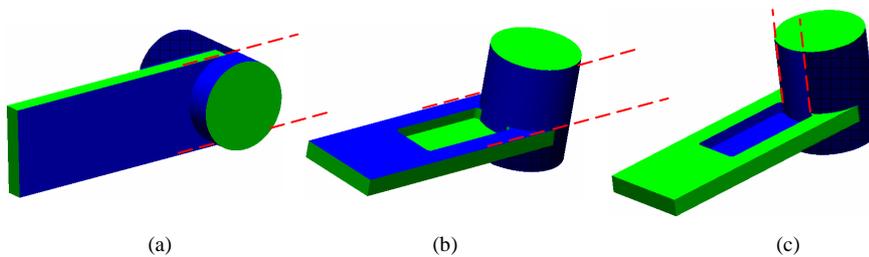


Figura 6-18. Líneas de partición para los Volúmenes '6', '7' y '8'.

7. Ejemplo de saliente/protusión debida a una superficie Conflictiva Menor

La pieza de la Figura 6-19 (a), obtenida también del 'NIST Repository', es un buen ejemplo para comprobar el comportamiento ante una Conflictiva Menor, la superficie '787'. En este caso no existe solución para el Volumen 'Padre 0' (en azul oscuro, Figura 6-19), pero si en la descomposición propuesta, Volúmenes '20' (Figura 6-20 (a)), '21' (Figura 6-20 (b)), '22' (Figura 6-20 (c)) y '23' (Figura 6-20 (d)). En cada uno de ellos se mecanizará parte de esta Conflictiva Menor, hasta quedar completada.

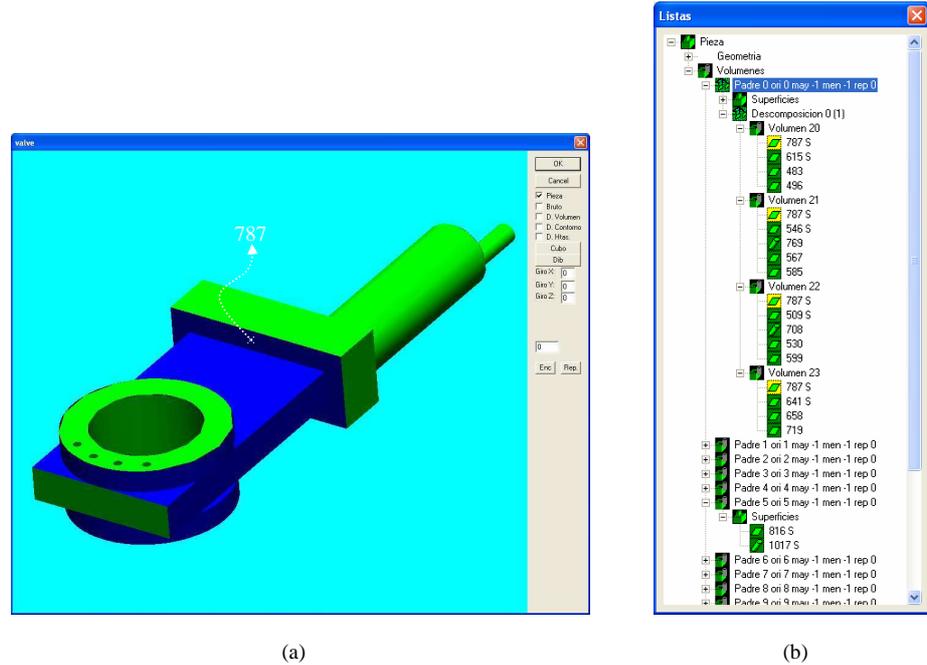


Figura 6–19. 'Valve' y parte del árbol de sus Volúmenes de Mecanizado.

Otra de las características de la pieza que la hacen interesante para probarla en un reconocedor automático, es la existencia del gran cilindro central que divide a las superficies planas en las que se aloja, ya que las rebasa en tamaño. Por lo tanto, lo que en el modelo 3D de la pieza parecen superficies planas continuas, no mantienen continuidad, y ni siquiera relación de vecindad directa entre si. Una vez más, lo que a simple vista parece fácil de asignar a operaciones de mecanizado, resulta complejo ante un tratamiento informático (automático) del modelo.

El Volumen '21', Figura 6–20 (c), aparenta estar formado por dos superficies planas (una de ellas la '787') y una cilíndrica, aunque en realidad la superficie plana distinta a la '787', está formada por tres superficies planas independientes y sin relación de vecindad directa, la '546', la '567' y la '585'. De hecho, el cilindro representado por la '769' no es una protusión (acorde a la definición dada) ya que parte en tres superficies al plano que se había creído continuo, no quedando completamente incluida en ninguno.

En este caso la superficie cilíndrica se ha definido como una única superficie, la '769', y es la que enlaza con los dos planos que quedan por detrás, '567' y '585'. Este Volumen si puede eliminarse en una sola operación, tomando como superficie 'semilla' a la '546' y utilizando una herramienta cilíndrica de punta plana.

Debe indicarse, que de estar formado el cilindro central por varias superficies cilíndricas, dos semicilindros por ejemplo, también dará el mismo resultado, ya que estas partes del cilindro son completamente compatibles entre si, actuando como si de una única superficie cilíndrica se tratara.

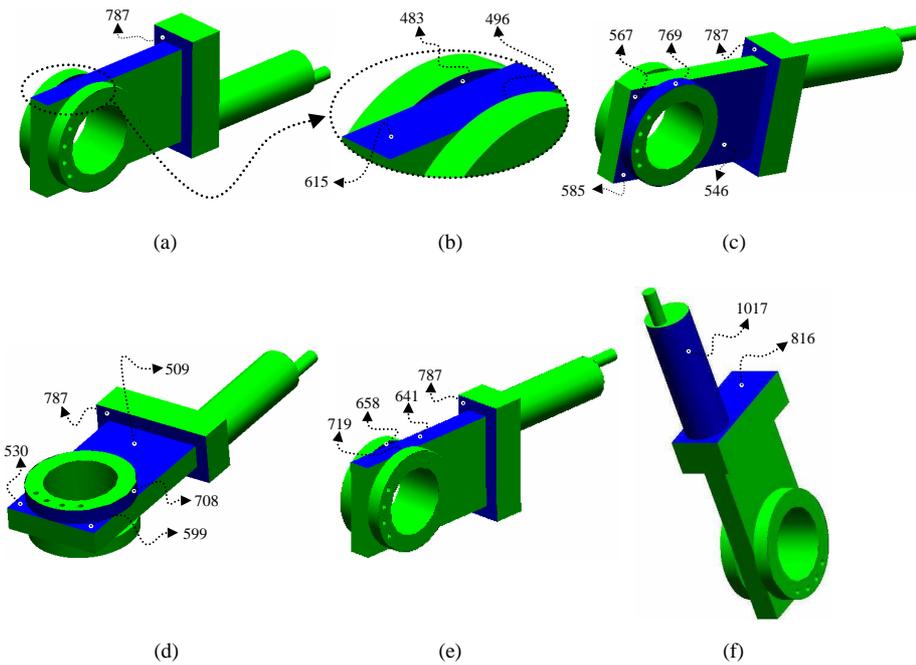


Figura 6-20. Algunos Volúmenes de la pieza 'Valve'.

El mismo razonamiento se aplica al Volumen '22', Figura 6-20 (d), formado por las superficies planas '787' (Conflictiva Menor), '509', '599' y '530'.

Otro aspecto importante, es la existencia de las pequeñas superficies planas ('483' y '496') incluidas en el Volumen '20', Figura 6-20 (a) y (b), que obligan a tomar como superficie 'semilla' a la '615' y a un eje de herramienta normal a ella. Situación que se repite en el Volumen '23', Figura 6-20 (e).

Otra configuración especial se encuentra en la Figura 6-20 (f), que representa al Volumen 'Padre 5'. Este Volumen está formado por la superficie plana '816', en cuyo interior se encuentra un saliente, superficie cilíndrica '1017', que a diferencia del saliente de la superficie '787' no introduce nuevas superficies cóncavas, no convirtiendo a la '816' en una Conflictiva Menor. Tampoco se comporta igual que los salientes cilíndricos '708' y '769', pues no parten al plano que los aloja.

En el caso de la Figura 6-20 (f) se trata de un simple saliente, una isla de material, en el que la herramienta no encontrará problema alguno para rodearlo, generando al conjunto de superficies del Volumen.

'Padre 5', perfectamente podría corresponderse con un Elemento Característico de Mecanizado del tipo, 'cajera con isla y sin paredes', 'protuberancia' (boss), o 'planeado con isla', entre otros.

Al aplicar el reconocimiento automático de Elementos Característicos de Mecanizado sobre 'Valve' con la aplicación comercial, ésta sólo fue capaz de reconocer los agujeros como se muestra en la Figura 6-21, sacando con posterioridad

un mensaje de error que no permitió, ni siquiera, entrar en el reconocimiento interactivo sobre el resto de la geometría.

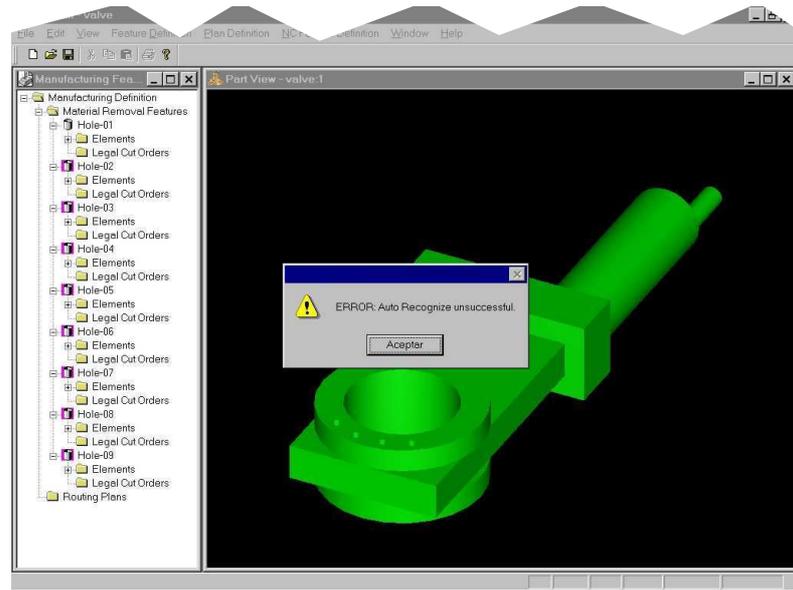


Figura 6–21. Resultado sobre 'Valve' con una aplicación comercial.

8. Capacidades del desarrollo

Toda exposición teórica sobre una nueva metodología o forma de proceder suele ir acompañada de un desarrollo práctico, que fiel a la misma, corrobore lo que en ella se cuenta y demuestre que es posible llevarlo a la práctica para su futura utilización.

Lo importante en la etapa de desarrollo, es comprobar que aquellas acciones que deben llevarse a cabo en el reconocedor son factibles para ser realizadas de forma automática por un ordenador. Como se ha comentado al principio del capítulo, se ha trabajado sobre el grupo de procesos más completo y con el que más variedad geométrica se consigue. Al ser el reconocedor explicado en la Tesis, de aplicación general, existen partes comunes y otras de posible adaptación al resto de grupos. La razón de centrarse en un solo grupo ha sido comprobar sobre él la validez de lo propuesto.

A continuación se realiza una exposición de las principales partes desarrolladas, acompañadas de unos breves comentarios. Estas son:

- La creación de una estructura de clases que de soporte al manejo del formato B-Rep según STEP. Con especial mención a las referidas a las entidades geométricas manejadas en un formato propio, donde se han ampliado las entidades procedentes de la norma (Parte 42) y se han añadido aquellas necesarias en el reconocimiento.
- La elaboración de los procedimientos imprescindibles para el tratamiento y

cálculo con las entidades geométricas básicas, enfocados al reconocimiento. Por citar algunos ejemplos representativos de estos procedimientos, se encuentran los destinados a, intersectar líneas, curvas y superficies, recortar superficies, reconstruir topologías, proyectar tramos y superficies, identificar pertenencias a las distintas entidades, facilitar el trabajo con los parámetros 'U' y 'V', etc.

- El desarrollo de un conversor de piezas, del formato STEP al formato propio. Necesario para que el reconocedor pueda trabajar con las entidades geométricas y topológicas de B-Rep, ampliadas y modificadas.

- La realización del procedimiento encargado de generar el Delta-Volumen. El reconocedor en su versión final trabaja suponiendo que el bruto o material de partida mayor a la pieza por todas partes, dicho de otra forma, hay que generar todas las superficies de la pieza, no necesitando apoyarse en el Delta-Volumen. En los comienzos se creó una aplicación que genera de forma automática en B-Rep, un bruto rectangular o cilíndrico pasándole sus dimensiones numéricas, y a partir de él y del modelo B-Rep de la pieza, obtiene el Delta-Volumen. En caso de no necesitar trabajar toda la pieza, pueden marcarse las superficies que no deben generarse, y apoyarse en el Delta-Volumen para el caso de superficies que no se mecanizarán por completo. Puede consultarse una propuesta de generación del bruto de partida, en uno de los puntos del artículo de Kim y Wang, [Ref. 58], en el que ajustan las dimensiones del material de partida a la pieza final, en vistas a solicitar una preforma fundida.

- La realización del algoritmo principal y todos los procedimientos y funciones empleadas en la obtención/generación de Volúmenes básicos. Debe recordarse que el resultado que se obtiene es completamente independiente de cualquiera de los grupos de procesos, y todos los usan para realizar el proceso de reconocimiento, tal como se ha explicado.

- Otro elemento común desarrollado, es el algoritmo encargado de obtener el rango angular sobre cualquier Zona de Mecanizado. Se ha preparado para aceptar ciertas restricciones angulares impuestas por el usuario, relacionadas con las formas de herramientas a admitir/rechazar.

- La confección de los algoritmos encargados de construir el perfil de la herramienta a partir de las superficies de una Zona de Mecanizado, para el grupo de procesos tipo 'Fresado'. Por ejemplo, la validación geométrica del perfil en función de los movimientos disponibles en el proceso de mecanizado, también existen otros trozos de código comunes o fácilmente adaptables al resto de grupos, como, el algoritmo de recorrido de la 'semilla', o los de proyección lineal/radial, entre otros. En el desarrollo de esta parte se ha contemplado la futura reutilización, separándolos y dejándolos accesibles a través de llamadas o herencia entre clases.

- La creación del algoritmo de proyección y recorte de superficies para el análisis de la accesibilidad. Se ha desarrollado la parte principal, común a todos, para comprobar su viabilidad, guardando el resultado en las estructuras de datos adecuadas. Falta trabajar con los datos resultado para obtener los accesos laterales y las nuevas restricciones para las herramientas, en función de cada grupo de procesos por separado. Como se ha señalado en la Tesis, pueden emplearse y adaptarse algoritmos de uso público que resuelven problemas similares.

- El desarrollo de un interfaz gráfico. Aunque en las primeras pruebas del

reconcedor automático se sacaban resultados en modo texto, realizar un seguimiento de lo obtenido, se hace casi imposible ante piezas de complejidad moderada, si se iban a probar piezas sin importar su complejidad, hacía falta un mecanismo más rápido y cómodo para analizar los resultados. Esto se solucionó con la creación de un interfaz gráfico capaz de presentar los modelos 3D en el formato propio, y a través del cual lanzar las peticiones de reconocimiento. Los resultados se muestran en forma de árbol, en el que se puede realizar una fácil asociación entre entidades, además, se incorpora en los nodos del árbol unos símbolos y colores que permiten una rápida discriminación de casos y situaciones. Aprovechando la capacidad de visualización de la pieza, permite seleccionar partes (Volúmenes, superficies) del árbol de resultados, destacándolos en el modelo 3D mediante un cambio de color. Incluye además una serie de utilidades gráficas, rotaciones, ampliaciones, etc., que facilitan la comprobación de resultados y la depuración del código. Las imágenes mostradas en este capítulo, salvo las referidas a la aplicación comercial probada, pertenecen al interfaz gráfico desarrollado.

Capítulo 7. Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros

Recordando el capítulo dedicado al 'Estado del arte', pueden extraerse la serie de conclusiones que a continuación se exponen.

Los métodos de reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado puramente algorítmicos, pierden toda referencia sobre el ámbito de aplicación, presentando resultados inviables, como por ejemplo, Elementos Característicos de Mecanizado no accesibles.

Aquellas propuestas que tratan el problema de la accesibilidad, lo suelen hacer de forma independiente al reconocimiento, incluyendo otros déficit, como la imposibilidad de tratar intersecciones aleatorias entre Elementos Característicos de Mecanizado, debido al uso de técnicas relacionadas con el 'pattern matching'. El análisis de la fabricabilidad queda, en el mejor de los casos, incluido en los patrones dependientes del proceso usado en el 'matching'. En lo referente a la herramienta, suelen dejar asociadas a los patrones varias herramientas 'tipo', perdiendo una vez más generalidad al no permitir formas de herramienta no contempladas, que por lo general no son estándares, [Ref. 15].

Las técnicas basadas en conocimientos tecnológicos, en su mayoría trabajan sin excesivos problemas sobre piezas prismáticas (sólo con superficies planas). Algunas de ellas manejan otro tipo de superficies regulares (cilíndrica, cónicas, tóricas, esféricas), presentando serios problemas para completar el proceso de reconocimiento, puesto que no son capaces de obtener el Volumen a eliminar cuando se incluye a este tipo de superficies, o necesitan limitar las geometrías para poderlas

tratar, por ejemplo, únicamente para geometrías obtenidas por barrido.

En aspectos clave, como encontrar una herramienta adecuada, siguen realizando su búsqueda una vez obtenido el Volumen, normalmente a través de comparaciones con herramientas estándares, aunque algún método permite comparar con herramientas definidas por el usuario. El tratamiento general de las herramientas no debe dejarse para una etapa posterior a la de obtención del Volumen, hace falta asegurar que existe una forma geométrica de herramienta válida, que junto con los movimientos propios del proceso de corte implicado, genera las superficies de la Zona de Mecanizado. Por supuesto, pueden existir otras formas igualmente válidas, de lo que se trata es de legitimar al Volumen de Mecanizado, encontrando al menos una herramienta, lo más genérica posible, capaz de eliminarlo.

Referente a la accesibilidad, se sigue un planteamiento similar al de las herramientas, se comprueba una vez obtenido el Volumen. Esta situación no es del todo aconsejable, ya que al igual que sucede con las herramientas, un Volumen de Mecanizado lo será si se puede eliminar, esto es, si se puede recorrer por completo y existe una orientación adecuada para el eje de la herramienta encargada de su mecanizado. Por lo tanto, la accesibilidad debería influir en la obtención del Elemento Característico de Mecanizado, sobre todo cuando está directamente relacionada con la herramienta, que como se ha comentado, influye en la obtención del Volumen.

En la Tesis, se ha realizado un especial esfuerzo en plantear una propuesta aplicable sobre cualquier proceso de mecanizado. Existen elementos comunes importantes que así lo sugieren, por ejemplo, el hecho de que con cualquiera de ellos se generen unas superficies arrancando material por contacto mediante unas herramientas con formas y características similares. La metodología aplicada trabaja con cualquier superficie regular (plana, cilíndrica, tórica, cónica y esférica), no viéndose afectada por intersecciones entre Elementos Característicos o por variaciones geométricas en ellos. Para conseguirlo, se trabaja con Volúmenes de Mecanizado previamente analizados y descompuestos (Volúmenes básicos), y se utiliza como núcleo esencial de validación, la construcción, a partir del Volumen, de una herramienta capaz de eliminarlo, sirviéndose de los movimientos propios del proceso tratado.

Tal como se ha comentado, en la validación del volumen debe comprobarse la accesibilidad de la herramienta. En la Tesis, esta comprobación se descompone en dos, una, relacionada con la orientación de la herramienta (concretamente su eje) y el acceso para la generación de todas las superficies de la Zona/Volumen de Mecanizado (acceso local), y otra, relacionada con el acceso a la zona de trabajo a través del resto de la geometría de la pieza (acceso global). La primera de ellas no debe desligarse del proceso de validación del Volumen de Mecanizado. La segunda puede verificarse con posterioridad, para llevar a cabo una comprobación de lo obtenido.

El resultado final lo compone un conjunto de Elementos Característicos de Mecanizado, conteniendo cada uno la Zona/Volumen de Mecanizado al que representa, una forma genérica de herramienta válida para la generación de la Zona, un acceso adecuado para esa generación, y el Proceso Tipo de mecanizado a aplicar. Es precisamente este contenido el que los distingue, ya que no se asocian directamente a operaciones de mecanizado conocidas, evitando caer en selecciones de condiciones y modos de trabajo propios de otras etapas de la Planificación.

En resumen la metodología presentada tiene en cuenta los conocimientos tecnológicos del mecanizado y se apoya en datos geométricos, evitando los problemas comentados y manteniendo como máxima la comprobación de la posible fabricación por mecanizado. De hecho, establece una clara separación del reconocimiento en pasos o etapas con unos objetivos parciales, que una vez satisfechos son utilizados en las etapas posteriores, evitando mezclar información y operativa, para no complicar el proceso o perder generalidad.

Entre los conocimientos tecnológicos que se manejan destacan:

- Los tipos de herramienta y las geometrías con ellas generables.
- La determinación de la superficie sobre la que se realiza la trayectoria de corte.
- La obligación de no cambiar de Plano de Trabajo, en un mismo volumen.
- Los movimientos característicos de los procesos.
- Las posibles orientaciones de las herramientas, condicionadas por el proceso de mecanizado.
- El proceso de construcción del perfil de la herramienta.
- La generación de superficies por solape en la punta de la herramienta.
- El corte vinculado.
- La influencia de la tangencia entre superficies en el proceso de corte, tanto en la obtención de los Volúmenes, como en la determinación de la superficie sobre la que se realiza la trayectoria de corte.
- La similitud entre la sistemática propuesta y el razonamiento llevado a cabo por el planificador humano.
- ...

1. Aportaciones de la Tesis

Una vez comentadas las principales técnicas y métodos de reconocimiento, y expuesto el trabajo realizado en la Tesis, pueden observarse unos avances que sin duda constituyen un paso más en la difícil consecución de un reconocedor automático de Elementos Característicos de Mecanizado, capaz de operar ante cualquier geometría de entrada. Enmarcado en la, no menos compleja, consecución de un planificador de procesos asistido por ordenador automático.

Entre las aportaciones más importantes cabe destacar:

- El haber aislado y tratado aquellas geometrías, dentro de la técnica de reconocimiento basada en concavidades, que la hacen fallar y que obligaban a la utilización de “parches”, o simplemente a no tratarlas. Estas geometrías, a las que se ha llamado protusiones, han sido clasificadas aportando un tratamiento acorde al objetivo final: eliminar el Volumen por mecanizado, permitiendo continuar el proceso de reconocimiento automático.

- La elaboración de una clasificación diferente de Elementos Característicos de Mecanizado, orientada a los procesos de mecanizado y a como generan las geometrías, donde no se busca una equivalencia con operaciones concretas, sino con operaciones posibles desde un punto de vista tecnológico. Se ha considerado importante no asignar un nombre propio al Elemento Característico reconocido, por ejemplo, ... se trata de una 'ranura' (operación de ranurado) o de una 'cajera' (operación de cajeteado). De esta forma se evita seleccionar aspectos relacionados con el corte, como por ejemplo, la dirección y sentido de la trayectoria de la herramienta, la profundidad de pasada, el proceso concreto de mecanizado a aplicar, ..., que no deberían establecerse en esta etapa de la Planificación, pues falta información clave referida a, máquinas disponibles, herramientas, utillajes, tolerancias, criterios económicos, etc.

- El desarrollo de un método capaz de trabajar con Elementos Característicos de Mecanizado no establecidos previamente, ni asociados a operaciones de mecanizado específicas. Para conseguirlo se manejan tres conceptos estrechamente relacionados, pero con entidad propia. A través de estos conceptos puede seguirse la evolución de la información durante el transcurso del reconocimiento, estos son:

- *Zona de Mecanizado*, es el conjunto de superficies extraídas del modelo 3D de la pieza y que son candidatas a ser generadas todas a la vez por mecanizado.
- *Volumen de Mecanizado*, se trata de una *Zona de Mecanizado* delimitada por todas partes, a partir de sus propias superficies, y de la forma y recorrido de la herramienta en las partes abiertas, tomando como límite el bruto de partida. Representa el Volumen de material a eliminar.
- *Elemento Característico de Mecanizado*, incluye al Volumen de Mecanizado que a su vez se encuentra limitado en parte por la Zona de Mecanizado, y sobre el que se sabe el proceso de mecanizado a aplicar, el perfil (definido con parámetros) de la herramienta que lo permite y el acceso (rango disponible) a la zona de trabajo.

- La construcción y comprobación de existencia de herramienta de corte, como garantía de la posible aplicación de un proceso de mecanizado para la eliminación de un Volumen. La diferencia fundamental con otros métodos que también usan a la herramienta de corte como condición determinante, es el hecho de ir construyendo su perfil, en función de las restricciones geométricas que impone la Zona de Mecanizado, y a partir de la configuración y grados de libertad del proceso de corte implicado. El resto de métodos se limitan a comprobar la posible utilización, una a una, de las herramientas previamente almacenadas en una base de datos.

- La incorporación al método de la comprobación de acceso a la zona de trabajo para aceptar al Elemento Característico de Mecanizado. Debe recordarse, que la comprobación del acceso local a la Zona de Mecanizado se lleva a cabo durante la construcción del perfil de la herramienta, es más, una falta de acceso traería como resultado un perfil físicamente imposible. Al igual que otros métodos, el acceso global, en el que se tiene en cuenta a la totalidad de la pieza, se realiza con posterioridad.

- La definición de una sistemática general, aplicable a cualquier proceso de mecanizado. Para lograrlo se ha realizado una caracterización y clasificación de los

procesos de mecanizado por arranque de viruta en función de sus movimientos, y por tanto, del tipo de geometrías que se pueden conseguir.

- La obtención de alternativas en el mecanizado de una pieza, gracias a que el método contempla a los diferentes procesos (según la clasificación) para construir los distintos Elementos Característicos de Mecanizado.

- El proceso de reconocimiento desarrollado no ofrece soluciones únicas ni cerradas, se buscan los Volúmenes básicos de mayor tamaño, dejando indicadas otras alternativas relacionadas con: descomposiciones en Volúmenes básicos alternativos, diferentes superficies 'semilla' a considerar, cambios en la orientación de herramienta, etc. Estas soluciones alternativas ofrecen la flexibilidad necesaria en el resto de etapas de la Planificación.

- La propuesta de un método de reconocimiento que no se ve afectado, en su correcto funcionamiento, por la existencia de Elementos Característicos incompletos o de intersecciones entre ellos.

- La posibilidad de aplicación del método sobre cualquier tipo de superficie regular, sin estar limitados exclusivamente a superficies planas y por tanto a piezas prismáticas.

Es importante volver a recordar, que uno de los objetivos principales ha sido la realización de un reconocedor no exclusivamente para un proceso de mecanizado concreto. La solución, como se ha comentado, debe ser aplicable a todos y contar con todos, entre otras cosas, porque lo normal es el empleo de más de un proceso de mecanizado para la consecución de una pieza.

Junto a esto, se ha visto la necesidad de no dar un único resultado, sino presentar la solución más "razonable" y dar unos rangos de validez para la forma de la herramienta, el acceso, etc., que permitan otras opciones, en caso de ser necesarias, debidas a cuestiones que evidentemente no pueden decidirse en la etapa de reconocimiento, por ejemplo, tener en cuenta las tolerancias, los amarres, los acabados superficiales, etc.

Todas estas consideraciones ofrecen un abanico de soluciones igual, al que mentalmente haría un Planificador humano, con la certeza de que será completo, puesto que el ordenador recorre sistemáticamente todas las posibles opciones.

2. Trabajos y desarrollos futuros

Debido a la magnitud del tema tratado, y a su utilidad bajo el punto de vista de la automatización y mejora en la preparación del trabajo para la fabricación, quedan abiertas varias líneas de trabajo, que sin lugar a dudas, conllevarán un análisis profundo en busca de una solución satisfactoria, permitiendo emprender nuevas líneas de investigación, como:

- Adaptar las soluciones obtenidas para su utilización en el resto de etapas de la Planificación, enlazando con el planificador automático en desarrollo en el Área y del que ciertas etapas han sido, o son, objeto de Tesis.

- Permitir la inclusión de reglas y heurísticos que afecten a la obtención de los

Elementos Característicos de Mecanizado, por ejemplo, actuando sobre la 'semilla' para favorecer la obtención de unos concretos (o excluir a aquellos poco habituales), aceptar sólo unas herramientas específicas, prefijar ciertas condiciones y estrategias en el corte, etc. Esta inclusión podría realizarse a través de un sistema experto, que permite mantener una base de conocimiento modificable y adaptable a cualquier entorno, sin tener que cambiar directamente los algoritmos desarrollados.

- Optimizar los algoritmos implementados para reducir tiempos de ejecución, sobre todo en piezas extremadamente complejas. Durante el desarrollo de la Tesis, se ha sido consciente de la necesidad de un análisis más profundo en alguno de los algoritmos más costosos, para obtener mejoras computacionales.

- Extrapolar el reconocimiento de Elementos Característicos, al mecanizado de más de tres ejes (donde se aprovecha el mayor número de grados de libertad de la herramienta para obtener geometrías más complejas), buscando aquellos Volúmenes parametrizables y asociables a operaciones de mecanizado.

- Adecuar el reconocimiento de Elementos Característicos de Mecanizado a otros procesos de fabricación, por ejemplo, a procesos tipo forja, fundición, inyección de plásticos, electroerosión, mecanizado por láser, etc. Esto implicaría un estudio de las geometrías que se pueden conseguir con cada uno de ellos, buscando los aspectos coincidentes con los procesos de mecanizado para aprovechar el trabajo. Además, se trabajaría con un concepto de un nivel superior respecto al Elemento Característico de Mecanizado, el "Elemento Característico de Fabricación". En esta misma línea, se podría extender el reconocimiento a otros ámbitos de aplicación dentro de la Planificación, por ejemplo, la inspección, la sujeción, ...

Apartándose un poco de las posibles líneas de investigación arriba expuestas, resultaría interesante completar el trabajo con las siguientes tareas de desarrollo:

- Integración con software comercial. En vista de los resultados obtenidos y del nivel de desarrollo alcanzado respecto a otras soluciones comerciales y no comerciales, se puede pensar en integrarlo en las aplicaciones CAD/CAM comerciales, en la parte dedicada a la Planificación de Procesos, en busca de un entorno CAPP automático y efectivo. Para ello se usarán los "kits" de desarrollo software que incorporan la gran mayoría de aplicaciones y que permiten, a través de un lenguaje de programación, utilizar su núcleo de cálculo geométrico e incorporar el reconocedor en sus menús desplegables, a la vez que se comparten datos y recursos.

- Generación automática de programas de control numérico. En las últimas etapas de la Planificación de Procesos se encuentra la dedicada a la confección de los programas de Control Numérico (CN). Con la aparición en 2003 del nuevo estándar de programación (STEP-NC): ISO 14649, [Ref. 54], que enlaza/complementa al ISO 10303 AP-224, sería una buena línea de trabajo la generación automática de programas de CN a partir de los Elementos Característicos de Mecanizado obtenidos. Puede encontrarse más información sobre esta línea de trabajo, así como sobre los distintos proyectos que a nivel mundial trabajan en ello, en los artículos de Xu et al. y Allen et al., [Ref. 110] y [Ref. 1], respectivamente.

Referencias bibliográficas

- Ref. 1. Allen, R. D., Harding, J. A., & Newman, S. T. 2005, "The application of STEP-NC using agent-based process planning", *International Journal of Production Research*, vol. 43, no. 4, pp. 655-670.
- Ref. 2. anonymous. PTC. The Product Development Company. www.ptc.com. 2005. 10-11-0005.
- Ref. 3. anonymous. STEP Tools, Inc. www.steptools.com. 2005. 11-11-0005.
- Ref. 4. anonymous. Geometric Software Solutions. People Building Partnerships. www.gibbscam.com. 2005. 11-11-0005.
- Ref. 5. anonymous. Desselault Systemes. SolidWorks. www.solidwork.com. 2005. 11-11-0005.
- Ref. 6. anonymous. GibbsCAM. Powerfully Simple. Simply Powerful. www.gibbscam.com. 2005. 11-11-0005.
- Ref. 7. anonymous. Desselault Systemes. Catia, Enovia, Smarteam,... www.3ds.com. 2005. 10-11-0005.
- Ref. 8. anonymous. FeatureCAM (Engineering Geometry Systems). www.featurecam.com. 2005. 11-11-0005.
- Ref. 9. anonymous. DELCAM. CAD/CAM Software Solutions for Industry. www.delcam.com. 2005. 11-11-0005.
- Ref. 10. anonymous. UGS. Transforming the process of innovation (Unigraphics: NX, Solid Edge, ...). www.ugs.com. 2005. 11-11-0005.

- Ref. 11. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE 116-001-88. Control numérico de máquinas. Nomenclatura y movimientos. 1-11. 1988.
- Ref. 12. Bhandarkar, M. P. & Nagi, R. 2000, "STEP-based feature extraction from STEP geometry for agile manufacturing", *Computers in Industry*, vol. 41, no. 1, pp. 3-24.
- Ref. 13. Bronsvort, W. F., van den Berg, E., Bidarra, R., & Noort, A. "Essential developments in feature modelling", CAD/Graphics'2001 edn, International Academic Publishers.
- Ref. 14. Bronsvort, W. F. & Noort, A. 2004, "Multiple-view feature modelling for integral product development", *Computer-Aided Design*, vol. 36, no. 10, pp. 929-946.
- Ref. 15. Case, K. & Gao, J. 1993, "Feature Technology - An Overview", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 6, no. 1-2, pp. 2-12.
- Ref. 16. Chen, L., Pu, J., & Wang, X. K. 2002, "A general model for machinable features and its application to machinability evaluation of mechanical parts", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 3, pp. 239-249.
- Ref. 17. Chep, A. & Tricarico, L. 1999, "Object-oriented analysis and design of a manufacturing feature representation", *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 10, pp. 2349-2376.
- Ref. 18. Choi, B. K. & Ko, K. 2003, "C-space based CAPP algorithm for freeform die-cavity machining", *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 2, pp. 179-189.
- Ref. 19. Cicirello, V. 1999, *Intelligent Retrieval of Solid Models*, Master of Science in Computer Science, Drexel University.
- Ref. 20. Cicirello, V. & Regli, W. C. "Machining Feature-based Comparisons of Mechanical Parts", IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, International Conference on Shape Modeling, Genova, Italy, p. 176.
- Ref. 21. Coma, O., Mascle, C., & Veron, P. 2003, "Geometric and form feature recognition tools applied to a design for assembly methodology", *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 13, pp. 1193-1210.
- Ref. 22. Corney, J. 1997, *3D Modeling with the ACIS Kernel and Toolkit*, John Wiley & Sons. ISBN 0471965359.
- Ref. 23. Dereli, T. & Filiz, H. 2002, "A note on the use of STEP for interfacing design to process planning", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 14, pp. 1075-1085.
- Ref. 24. Di Stefano, P., Bianconi, F., & Di Angelo, L. 2004, "An approach for feature semantics recognition in geometric models", *Computer-Aided Design*, vol. 36, no. 10, pp. 993-1009.
- Ref. 25. Dimov, S., Brousseau, E., & Stchi, R. 5 A.D., "Automatic formation of rules for feature recognition in solids models.", *Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS) 2005*. edn.

- Ref. 26. Ding, L. & Yue, Y. 2004, "Novel ANN-based feature recognition incorporating design by features", *Computers in Industry*, vol. 55, no. 2, pp. 197-222.
- Ref. 27. Dong, J. & Vijayan, S. 1997, "Features extraction with the consideration of manufacturing processes", *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 8, pp. 2135-2155.
- Ref. 28. Elliott, L. CAM Steps Up To Meet International Competitive Challenges. www.deskeng.com (Desktop Engineering) . 11-11-0005. DE (Desktop Engineering).
- Ref. 29. Faheem, W., Castaño, J. F., Hayes, C. C., & Gaines, D. M. "What is a manufacturing interaction?", Proceedings of DETC'98, 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, Atlanta, Georgia, USA.
- Ref. 30. Fu, M. W., Ong, S. K., Lu, W. F., Lee, I. B. H., & Nee, A. Y. C. 2003, "An approach to identify design and manufacturing features from a data exchanged part model", *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 11, pp. 979-993.
- Ref. 31. Gaines, D. M., Castano, F., & Hayes, C. C. 1999, "MEDIATOR: A resource adaptive feature recognizer that intertwines feature extraction and manufacturing analysis", *Journal of Mechanical Design*, vol. 121, no. 1, pp. 145-158.
- Ref. 32. Gaines, D. M. 1999, "A Tool-Centric Approach to Designing Composable Feature Recognizers", Fifth Symposium on Solid Modeling an Arbor MI edn, ACM.
- Ref. 33. Gaines, D. M. & Hayes, C. C. 1999, "CUSTOM-CUT: a customizable feature recognizer", *Computer-Aided Design*, vol. 31, no. 2, pp. 85-100.
- Ref. 34. Gao, J., Zheng, D. T., & Gindy, N. 2004, "Mathematical representation of feature conversion for CAD/CAM system integration", *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 20, no. 5, pp. 457-467.
- Ref. 35. Gian, P. R., Lin, T. W., & Lin, A. C. 2003, "Planning of tool orientation for five-axis cavity machining", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, no. 1-2, pp. 150-160.
- Ref. 36. Gindy, N. N. Z., Huang, X., & Ratchev, T. M. 1993, "Feature-Based Component Model for Computer-Aided Process Planning Systems", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 6, no. 1-2, pp. 20-26.
- Ref. 37. González-Contreras, F. 2001, *Propuesta funcional y estructuración de información y conocimiento para planificación de procesos asistida por computador. Aplicación a la determinación de procesos, operaciones y máquinas para piezas mecanizadas.*, Doctor en Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ref. 38. Gueorguieva, S. & Marcheix, D. 1994, *Non-Manifold Boundary Representation for Solid Modelling* Univ. Bordeaux I, 351, Cours de la

libération, 33405 Talence, France.

- Ref. 39. Gupta, S. K., Kramer, T. R., Nau, D. S., Regli, W. C., & Zhang, G. M. 1994, "Building Mrsev Models for Cam Applications", *Advances in Engineering Software*, vol. 20, no. 2-3, pp. 121-139.
- Ref. 40. Gupta, S. K. 1995, *Automated Manufacturability Analysis of Machined Parts*, Doctor of Philosophy, ISR (Institute for Systems Research), University of Maryland.
- Ref. 41. Han, J. H. 1996, *3D Geometric reasoning algorithms for feature recognition*, Doctor of Philosophy (Computer Science), University of Southern California.
- Ref. 42. Han, J. H. & Requicha, A. A. G. 1997, "Integration of feature based design and feature recognition", *Computer-Aided Design*, vol. 29, no. 5, pp. 393-403.
- Ref. 43. Han, J. H. & Rosen, D. 1998, "Special panel session for feature recognition at the 1997 ASME Computers in Engineering Conference", *Computer-Aided Design*, vol. 30, no. 13, pp. 979-982.
- Ref. 44. Han, J. H., Pratt, M., & Regli, W. C. 2000, "Manufacturing Feature Recognition from Solid Models: A Status Report", *Ieee Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 782-796.
- Ref. 45. Han, J. H., Kang, M. J., & Choi, H. G. 2001, "STEP-based feature recognition for manufacturing cost optimization", *Computer-Aided Design*, vol. 33, no. 9, pp. 671-686.
- Ref. 46. Han, J. W., Han, I. H., Lee, E., & Ti, J. 2001, "Manufacturing feature recognition toward integration with process planning", *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics*, vol. 31, no. 3, pp. 373-380.
- Ref. 47. Hoffman, C. M. & Joan-Arinyo, R. 1998, "CAD and the product master model", *Computer-Aided Design*, vol. 30, no. 11, pp. 905-918.
- Ref. 48. Huang, Z. & Yip-Hoi, D. 2002, "High-level feature recognition using feature relationship graphs", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 8, pp. 561-582.
- Ref. 49. Ibrahim, R. N. & McCormack, A. D. 2004, "Robustness and generality issues of feature recognition for CNC machining", *Advanced Manufacturing Technology* pp. 1-8.
- Ref. 50. Ismail, N., Abu Bakar, N., & Juri, A. H. 2002, "Feature recognition patterns for form features using boundary representation models", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 20, no. 8, pp. 553-556.
- Ref. 51. Ismail, N., Abu Bakar, N., & Juri, A. H. 2004, "Recognition of cylindrical-based features using edge boundary technique for integrated manufacturing", *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 20, no. 5, pp. 417-422.
- Ref. 52. ISO. ISO 10303-42 Industrial automation systems and integration -Product data representation and exchange-. Part 42: Integrated generic resources: Geometric and Topological representation. 15-12-1994. Switzerland,

- International Organization for Standardization.
- Ref. 53. ISO. ISO 10303-224 Industrial automation systems and integration -Product data representation and exchange-. Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features. 13-7-1997. Switzerland, International Organization for Standardization.
- Ref. 54. ISO. ISO 14649-1 Industrial automation systems and integration -Physical device control - Data model for computerized numerical controllers -. Part 1: Overview and fundamentals principles. 1-3-2003. Switzerland, International Organization for Standardization.
- Ref. 55. Jain, P. K. & Kumar, S. 1998, "Automatic feature extraction in PRIZCAPP", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 11, no. 6, pp. 500-512.
- Ref. 56. Jha, K. & Gurumoorthy, B. 2000, "Multiple feature interpretation across domains", *Computers in Industry*, vol. 42, no. 1, pp. 13-32.
- Ref. 57. Joo, J. & Cho, H. 1999, "Efficient sculptured pocket machining using feature extraction and conversion", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 100-112.
- Ref. 58. Kim, Y. S. & Wang, E. 2002, "Recognition of machining features for cast then machined parts", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 1, pp. 71-87.
- Ref. 59. Kramer, T. R. 1992, *A Library of Material Removal Shape Element Volumes (MRSEVs)*, National Institutud of Standards and Technology, NISTIR 4809. Report.
- Ref. 60. Kramer, T. R. 1992, "Pocket Milling with Tool Engagement Detection", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 114-123.
- Ref. 61. Lee, J. Y. & Kim, K. 1999, "Generating alternative interpretations of machining features", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 38-48.
- Ref. 62. Li, B. F. & Liu, J. 2002, "Detail feature recognition and decomposition in solid model", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 5, pp. 405-414.
- Ref. 63. Li, W. D., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. 2002, "Recognizing manufacturing features from a design-by-feature model", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 11, pp. 849-868.
- Ref. 64. Li, W. D., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. 2003, "A hybrid method for recognizing interacting machining features", *International Journal of Production Research*, vol. 41, no. 9, pp. 1887-1908.
- Ref. 65. Lim, T., Corney, J., & Clark, D. E. R. 2000, "Exact tool sizing for feature accessibility", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16, no. 11, pp. 791-802.
- Ref. 66. Lim, T., Corney, J., Ritchie, J. M., & Clark, D. E. R. 2001, "Optimizing tool selection", *International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 6, pp. 1239-1256.

- Ref. 67. Lim-Ann-Thien, T. 2000, *Lamina-based Feature Recognition and Applications in Manufacturing*, Doctor of Philosophy, Heriot-Watt University (UK).
- Ref. 68. Lin, A. C., Lin, S. Y., & Cheng, S. B. 1997, "Extraction of manufacturing features from a feature-based design model", *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 12, pp. 3249-3288.
- Ref. 69. Lin, A. C. & Lin, S. Y. 1998, "A volume decomposition approach to process planning for prismatic parts with depression and protrusion design features", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 11, no. 6, pp. 548-563.
- Ref. 70. Lu, Y., Gadh, R., & Tautges, T. J. 2001, "Feature based hex meshing methodology: feature recognition and volume decomposition", *Computer-Aided Design*, vol. 33, no. 3, pp. 221-232.
- Ref. 71. Marefat, M. & Kashyap, R. L. 1990, "Geometric Reasoning for Recognition of 3-Dimensional Object Features", *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 10, pp. 949-965.
- Ref. 72. McCormack, A. D. & Ibrahim, R. N. 1 A.D., *Advanced Feature Extraction and Recognition from Boundary Representation Models*, IAMOT (International Association for Management of Technology). Report.
- Ref. 73. McCormack, A. D. & Ibrahim, R. N. 2002, "Process planning using adjacency-based feature extraction", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 20, no. 11, pp. 817-823.
- Ref. 74. McMinn, G. Accelerating Toolpath Generation for 3D solid Models. www.featurecam.com. 2005. 22-11-0005.
- Ref. 75. Meeran, S. & Zulkifli, A. H. 2002, "Recognition of simple and complex interacting non-orthogonal features", *Pattern Recognition*, vol. 35, no. 11, pp. 2341-2353.
- Ref. 76. Meeran, S., Taib, J. M., & Afzal, M. T. 2003, "Recognizing features from engineering drawings without using hidden lines: a framework to link feature recognition and inspection systems", *International Journal of Production Research*, vol. 41, no. 3, pp. 465-495.
- Ref. 77. Miao, H. K. K., Sridharan, N., & Shah, J. J. 2002, "CAD-CAM integration using machining features", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 15, no. 4, pp. 296-318.
- Ref. 78. NIST. National Design Repository. www.designrepository.org (Drexel University, Philadelphia, EEUU) . 14-1-2005. 27-7-0006.
- Ref. 79. Noort, A. 2002, *Multiple-View Feature Modelling with Model Adjustment*, Doctor, Technische Universiteit Delft. Netherlands.
- Ref. 80. Owodunni, O. & Hinduja, S. 2002, "Evaluation of existing and new feature recognition algorithms - Part 1: theory and implementation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 6, pp. 839-851.

- Ref. 81. Owodunni, O. & Hinduja, S. 2002, "Evaluation of existing and algorithms new feature recognition - Part 2: experimental results", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 6, pp. 853-866.
- Ref. 82. Öztürk, N. & Öztürk, F. 2004, "Hybrid neural network and genetic algorithm based machining feature recognition", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 15, no. 3, pp. 287-298.
- Ref. 83. Park, S. C. & Choi, B. K. 2001, "Boundary extraction algorithm for cutting area detection", *Computer-Aided Design*, vol. 33, no. 8, pp. 571-579.
- Ref. 84. Patil, L. & Pande, S. S. 2002, "An intelligent feature-based process planning system for prismatic parts", *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 17, pp. 4431-4447.
- Ref. 85. Potts-Steves, M. & Frechette, S. 2005, *Viewing Technologies for Computer-Aided Design Models*, Software Engineering Institute. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, CMU/SEI-2003-TN-022. Report.
- Ref. 86. Prabhu, B. S. & Pande, S. S. 1999, "Automatic extraction of manufacturable features from CADD models using syntactic pattern recognition techniques", *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 6, pp. 1259-1281.
- Ref. 87. Regli, W. C., Gupta, S. K., & Nau, D. S. Feature Recognition for Manufacturability Analysis. 1994. Report.
- Ref. 88. Regli, W. C., Gupta, S. K., & Nau, D. S. An application of Distributed Solid Modeling: Feature Recognition. 1994. Report.
- Ref. 89. Regli, W. C. & Nau, D. S. 1994, *Recognition of Volumetric Features from CAD Models: Problem Formalization and Algorithms* Department of Computer Science and Institute for Systems Research. University of Maryland, College Park, MD 20742 USA. Report.
- Ref. 90. Regli, W. C. & Gaines, D. M. 1997, *A Repository of Designs for Process and Assembly Planning*, Manufacturing Systems Integration Division. National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899. Report.
- Ref. 91. Ríos-Chueco, J. 1996, *Integración de las funciones de programación de máquinas herramientas de control numérico mediante una aplicación orientada a objetos basada en un modelo de información de operaciones de mecanizado.*, Doctor Ingeniero Industrial, Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid. España.
- Ref. 92. Rosen, D. W., Dixon, J. R., & Finger, S. 1994, "Conversions of Feature-Based Design Representations Using Graph Grammar Parsing", *Journal of Mechanical Design*, vol. 116, no. 3, pp. 785-792.
- Ref. 93. Rossignac, J. R. & Requicha, A. A. G. 1997, *Solid Modeling*. Report.
- Ref. 94. Sahay, A., Graves, G. R., Parks, C. M., & Mann, L. 1990, "A Methodology for Recognizing Features in 2-Dimensional Cylindrical Part Designs", *International Journal of Production Research*, vol. 28, no. 8, pp. 1401-1416.

- Ref. 95. Sandiford, D. & Hinduja, S. 2001, "Construction of feature volumes using intersection of adjacent surfaces", *Computer-Aided Design*, vol. 33, no. 6, pp. 455-473.
- Ref. 96. Schneider, P. J. & Eberly, D. H. 2003, *Geometric Tools for Computer Graphics*, Elsevier Science. ISBN 1558605940. Morgan Kaufmann, Amsterdam.
- Ref. 97. Several Authors 1994, *Advances in Feature Based Manufacturing*, ISBN 0-444-81600-3. Elsevier Science B.V., Amsterdam (Netherlands).
- Ref. 98. Shah, J. J. & Mäntylä, M. 1995, *Parametric and Feature-Based CAD/CAM*, ISBN 0-471-00214-3. John Wiley & Sons, New York.
- Ref. 99. Sormaz, D. N., Arumugam, J., & Rajaraman, S. 2004, "Integrative process plan model and representation for intelligent distributed manufacturing planning", *International Journal of Production Research*, vol. 42, no. 17, pp. 3397-3417.
- Ref. 100. Sridharan, N. & Shah, J. J. 2004, "Recognition of multi axis milling features: Part I - Topological and geometric characteristics", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 242-250.
- Ref. 101. Sundararajan, V. & Wright, P. K. 2004, "Volumetric feature recognition for machining components with freeform surfaces", *Computer-Aided Design*, vol. 36, no. 1, pp. 11-25.
- Ref. 102. UGS, C. 2005, *Parasolid. World-class geometric modeling for demanding 3D applications*. Report.
- Ref. 103. Vandenbrande, J. H. & Requicha, A. A. G. 1993, "Spatial Reasoning for the Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models", *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 12, pp. 1269-1285.
- Ref. 104. Venkataraman, S., Shah, J. J., & Summers, J. D. An investigation of integrating design by features and feature recognition. 1-19. 2000. Arizona State University. Design Automation Lab., CiteSeer.IST (Scientific Literature Digital Library). Report.
- Ref. 105. Venkataraman, S. & Sohoni, M. "Reconstruction of feature volumes and feature suppression", ACM Press New York, NY, USA, Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications. Saarbrücken, Germany, pp. 60-71.
- Ref. 106. Wong, T. N. & Lam, S. M. 2000, "Automatic recognition of machining features from computer aided design part models", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, vol. 214, no. 6, pp. 515-520.
- Ref. 107. Woo, Y. & Lee, S. H. "Destructive Modeling by volume decomposition and its applications", ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA.
- Ref. 108. Woo, Y. & Sakurai, H. 2002, "Recognition of maximal features by volume

- decomposition", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 3, pp. 195-207.
- Ref. 109. Woo, Y. 2003, "Fast cell-based decomposition and applications to solid modeling", *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 11, pp. 969-977.
- Ref. 110. Xu, X. W., Wang, H., Mao, J., Newman, S. T., Kramer, T. R., Proctor, F. M., & Michaloski, J. L. 2005, "STEP-compliant NC research: the search for intelligent CAD/CAPP/CAM CNC integration", *International Journal of Production Research*, vol. 43, no. 17, pp. 3703-3743.
- Ref. 111. Yang, M.-H. & Marefat, M. M. "Constraint-Based Feature Recognition: Handling Non-uniqueness in Feature Interactions", In Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation edn, 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Ref. 112. Yang, M.-H. "Recognizing Machining Features Through Partial Constraint Satisfaction", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.
- Ref. 113. Yang, Y., Loh, H. T., Fuh, J. Y. H., & Wong, Y. S. 2003, "Feature extraction and volume decomposition for orthogonal layered manufacturing", *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 12, pp. 1119-1128.
- Ref. 114. Yang, Z.-X. & Joneja, A. "OSCAP: An Environment for Manufacturing Planning of Mechanical Products", Proceedings os ASME/DFM 97, Sacramento, CA, USA.
- Ref. 115. Yang, Z. X., Joneja, A., & Zhu, Z. M. 2001, "Recognizing generalized pockets for optimizing machining time in process planning - Part 1", *International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 15, pp. 3377-3397.
- Ref. 116. Yang, Z. X., Jonej, A., & Zhu, S. M. 2001, "Recognizing generalized pockets for optimizing machining time in process planning - Part 2", *International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 16, pp. 3601-3621.
- Ref. 117. Zhengming, C., Ji, M., Shuming, G., & Qunsheng, P. "An incremental approach to converting design feature model to machining feature model", CAD/Graphics'2001.
- Ref. 118. Zhou, X. H. & Gaines, D. M. 2003, "ARM: A tool for identifying and repairing un-machinable shapes in designs", *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 19, no. 4, pp. 343-353.
- Ref. 119. Zhu, H. & Menq, C. H. 2002, "B-Rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition", *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 2, pp. 109-123.

