

# Proyecto Fin de Master Ingeniería Industrial

## Diseño y fabricación de un producto en un centro de mecanizado de alta velocidad en 5 ejes

Autor: Antonio José Páez Castillo

Tutor: Domingo Morales Palma

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Master  
Ingeniería Industrial

# **Diseño y fabricación de un producto en un centro de mecanizado de alta velocidad en 5 ejes**

Autor:

Antonio José Páez Castillo

Tutor:

Domingo Morales Palma

Profesor Contratado Doctor

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Master: Diseño y fabricación de un producto en un centro de mecanizado de alta velocidad en 5 ejes

Autor: Antonio José Páez Castillo

Tutor: Domingo Morales Palma

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a cada uno de los profesores que han aportado un granito de arena en mí, llegándome a convertir en el Ingeniero que soy hoy, un mero reflejo de cada uno de ellos.

También quiero dar las gracias a Domingo por la oportunidad que me ha brindado de poder completar mi carrera así, por su ayuda y apoyo, no llevándome con ello una relación de profesor-alumno, sino la de un amigo de verdad.

Por último, agradecerles a mis padres y hermana todo el apoyo mostrado durante esta etapa de mi vida, ya que aunque han sido meros espectadores de ella, han hecho posible que sea más fácil y llevadera, pues sin ellos no habría podido llegar hasta aquí.

*Antonio José Páez Castillo  
Sevilla, 2017*



## RESUMEN

En este proyecto se ha realizado un proceso completo de diseño, modelado, simulación y fabricación de un producto en el centro de mecanizado Mikron HSM 400U de alta velocidad en 5 ejes. El objetivo principal del trabajo es el estudio de las prestaciones de la máquina y del control de sus movimientos.

El producto consiste en tres piezas sencillas de geometría cúbica de 50, 30 y 16 mm de lado, respectivamente, de interior hueco y abierto en sus seis caras. Los cubos mayores contienen en su interior el siguiente cubo de menor tamaño, de tal forma que se pueden mover libremente pero sin poder sacarlos de su ubicación. Para su fabricación partiendo de una sola pieza, ha sido necesario diseñar un utillaje especial para asegurar el amarre de las tres piezas durante todo el proceso de mecanizado.

El diseño del producto y del utillaje se ha realizado con CATIA V5, así como el modelado y simulación del proceso de mecanizado. Se ha usado un postprocesador universal para generar el código en el lenguaje propio de la máquina y un simulador para analizar la cinemática de ésta durante el proceso y evitar posibles errores.

En la fase de fabricación se han realizado pruebas en vacío y un prototipo en un material más blando en un proceso iterativo para la optimización del código y el análisis de los problemas encontrados. Finalmente, el producto se ha fabricado en aluminio de acuerdo a las especificaciones de partida.



## ÍNDICE

<i>RESUMEN</i> .....	vii
<b>1. MOTIVACIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. EVOLUCIÓN HISTORICA</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2. MECANIZADO</b> .....	<b>9</b>
<b>3.2.1. Mecanizado alto rendimiento</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2.2. Mecanizado alta velocidad</b> .....	<b>11</b>
<b>3.3. TIPOLOGÍA MÁQUINAS</b> .....	<b>13</b>
<b>3.4. COMPONENTES MÁQUINA-HERRAMIENTA</b> .....	<b>17</b>
<b>3.5. TIPOLOGÍA HERRAMIENTAS DE CORTE</b> .....	<b>23</b>
<b>3.5.1. Material</b> .....	<b>24</b>
<b>3.5.2. Configuración geométrica</b> .....	<b>28</b>
<b>3.6. CONTROL NUMÉRICO COMPUTERIZADO</b> .....	<b>32</b>
<b>3.6.1. Componentes sistema CNC</b> .....	<b>33</b>
<b>3.6.2. Programación mecanizado</b> .....	<b>35</b>
<b>4. MEDIOS DISPONIBLES</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1. HERRAMIENTAS</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2. MÁQUINA</b> .....	<b>40</b>
<b>4.3. PREFORMA</b> .....	<b>42</b>
<b>4.4. UTILLAJE</b> .....	<b>42</b>
<b>5. DISEÑO</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1. MODELADO PIEZA</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1.1. Requisitos pieza</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1.2. Diseño</b> .....	<b>44</b>
<b>5.2. MODELADO DE UTILLAJE</b> .....	<b>46</b>
<b>5.2.1. Requisitos utillaje</b> .....	<b>47</b>
<b>5.2.2. Diseño</b> .....	<b>47</b>
<b>6. MECANIZADO</b> .....	<b>51</b>
<b>6.1. MECANIZADO AMARRE A</b> .....	<b>51</b>
<b>6.1.1. Fase I: Taladrado I - V</b> .....	<b>52</b>
<b>6.1.2. Fase II: Planeado I</b> .....	<b>56</b>
<b>6.1.3. Fase II: Cajeados I – II</b> .....	<b>59</b>
<b>6.1.4. Fase II: Planeados II-V y cajeados III-X</b> .....	<b>64</b>
<b>6.1.5. Fase II: Chaflanados I-VII</b> .....	<b>67</b>

6.1.6.	Fase III: Ranurados I-X.....	69
<b>6.2.</b>	<b>MECANIZADO AMARRE B .....</b>	<b>73</b>
6.2.1.	Fase I: Planeado VI.....	75
6.2.2.	Fase I: Cajeados XI-XII .....	76
6.2.3.	Fase I: Chaflanados IX-XII .....	78
6.2.4.	Fase II: Ranurados XI y XII .....	79
<b>7.</b>	<b>POSTPROCESAMIENTO .....</b>	<b>81</b>
<b>7.1.</b>	<b>PRUEBAS SIMULADOR.....</b>	<b>82</b>
7.1.1.	Optimización parámetros código APT .....	83
7.1.2.	Bloques iniciales .....	84
7.1.3.	Bloques finales.....	85
7.1.4.	Sistema de coordenadas tras giros .....	87
7.1.5.	Interpolaciones circulares.....	89
<b>7.2.</b>	<b>PRUEBAS EN MÁQUINA.....</b>	<b>90</b>
7.2.1.	Desplazamiento optimizado de ejes giratorios .....	91
7.2.2.	Activación giro a derechas husillo .....	91
7.2.3.	Velocidad de giro .....	92
7.2.4.	Recogida y cambio de herramienta .....	92
<b>8.</b>	<b>FABRICACIÓN.....</b>	<b>95</b>
<b>8.1.</b>	<b>MECANIZADO I AMARRE A .....</b>	<b>96</b>
8.1.1.	Problema desfase herramienta .....	97
8.1.2.	Problema utillaje.....	98
<b>8.2.</b>	<b>MODIFICACIÓN MECANIZADO I AMARRE A .....</b>	<b>99</b>
8.2.1.	Fase I – Planeado I .....	99
8.2.2.	Fase I – Contorneado I .....	100
8.2.3.	Fase I – Cajeadado I .....	101
8.2.4.	Fase I – Contorneado y cajeadado II .....	101
8.2.5.	Fase I – Planeados II-V, contorneados y cajeadados III-X .....	102
8.2.6.	Fase II – Ranurados I-X.....	102
<b>8.3.</b>	<b>MECANIZADO II AMARRE A .....</b>	<b>103</b>
<b>8.4.</b>	<b>AMARRE B.....</b>	<b>103</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>109</b>
<b>10.</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>111</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>113</b>

<b>ANEXO I. ESTUDIO TOLERANCIAS UTILLAJE .....</b>	<b>115</b>
1. INTRODUCCIÓN SISTEMA TOLERANCIAS Y AJUSTES.....	117
2. TOLERANCIAS PIEZA .....	119
3. TOLERANCIAS Y AJUSTES PARA LOS NEGATIVOS.....	122
4. TOLERANCIAS Y AJUSTES PARA CUERPO DEL UTIL .....	129
<b>ANEXO II. PLANOS .....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXO III. HERRAMIENTAS DE CORTE .....</b>	<b>141</b>
1. INTRODUCCIÓN HERRAMIENTAS DE CORTE .....	147
2. FRESA TOROIDAL .....	150
3. FRESA DE RANURAR.....	151
4. BROCA HELICOIDAL .....	153
<b>ANEXO IV. HOJA DE PROCESOS.....</b>	<b>157</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. Torno de pedal y rueda .....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2. Torno de Maudslay.....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 3. Fresadora Cincinnati de 1884 .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 4. Fresadora del MIT.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 5. Centro de mecanizado.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 6. Clasificación tipo de mecanizados .....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 7. Curvas temperatura vs velocidad de corte según Carl Salomon.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 8. Propiedades del MAV .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 9. Control punto a punto .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 10. Control paraxial .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 11. Control continuo o de contorneado.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 12. Interpolación control continuo .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 13. Sistema bucle abierto .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 14. Sistema bucle cerrado .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 15. Componentes máquina CNC.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 16. Sección husillo.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 17. Estructura máquina Mikron HSM 400U.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 18. Raíl carro maquina CNC.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 19. Tipos de portaherramientas .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 20. Portaherramientas y pinza de sujeción .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 21. Movimientos mesa de trabajo fresadora CNC.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 22. Movimientos mesa de trabajo máquina 5 ejes .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 23. Servomotor CNC .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 24. Encoder circular y lineal.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 25. Relación dureza según temperatura y material .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 26. Clasificación herramientas metal duro.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 27. Propiedades mecánicas según material .....</b>	<b>28</b>

<b>Figura 28.</b> <i>Fresas sin mango</i> .....	29
<b>Figura 29.</b> <i>Fresa esférica</i> .....	29
<b>Figura 30.</b> <i>Fresa tórica</i> .....	30
<b>Figura 31.</b> <i>Fresa plana</i> .....	30
<b>Figura 32.</b> <i>Fresa de ranurar</i> .....	30
<b>Figura 33.</b> <i>Fresa cónica</i> .....	31
<b>Figura 34.</b> <i>Fresas angulares</i> .....	31
<b>Figura 35.</b> <i>Broca helicoidal</i> .....	31
<b>Figura 36.</b> <i>Mandril</i> .....	32
<b>Figura 37.</b> <i>Escariador</i> .....	32
<b>Figura 38.</b> <i>Elementos básicos del sistema de CNC</i> .....	34
<b>Figura 39.</b> <i>Control Numérico Directo</i> .....	34
<b>Figura 40.</b> <i>Control Numérico Distribuido</i> .....	35
<b>Figura 41.</b> <i>Herramientas por defecto en catálogo</i> .....	38
<b>Figura 42.</b> <i>Configuración herramienta</i> .....	38
<b>Figura 43.</b> <i>Catálogo herramientas para MIKRON HSM 400U en Catia V5</i> .....	39
<b>Figura 44.</b> <i>Preforma real montada en utillaje y modelada</i> .....	42
<b>Figura 45.</b> <i>Utillaje base cónica modelado</i> .....	42
<b>Figura 46.</b> <i>Modelo pieza a fabricar</i> .....	44
<b>Figura 47.</b> <i>Secciones diferentes de la pieza</i> .....	45
<b>Figura 48.</b> <i>Pieza modelada</i> .....	45
<b>Figura 49.</b> <i>Preforma y pieza juntas</i> .....	46
<b>Figura 50.</b> <i>Pieza a medio mecanizar</i> .....	47
<b>Figura 51.</b> <i>Idea utillaje insertado en pieza</i> .....	48
<b>Figura 52.</b> <i>Vistas negativo lateral del util</i> .....	48
<b>Figura 53.</b> <i>Sección pieza y utillaje</i> .....	49
<b>Figura 54.</b> <i>Sistema para bloqueo de rotación</i> .....	49
<b>Figura 55.</b> <i>Versión final utillaje</i> .....	50
<b>Figura 56.</b> <i>Preforma sobre util base en amarre A</i> .....	51
<b>Figura 57.</b> <i>Punto de referencia de mecanizado y planos de seguridad</i> .....	52
<b>Figura 58.</b> <i>Esquema taladro profundo</i> .....	53
<b>Figura 59.</b> <i>Trayectoria herramienta taladrado inicial</i> .....	54
<b>Figura 60.</b> <i>Taladrado lateral</i> .....	55
<b>Figura 61.</b> <i>Trayectorias restantes taladrado y resultado</i> .....	55
<b>Figura 62.</b> <i>Mecanizado en concordancia</i> .....	57
<b>Figura 63.</b> <i>Trayectoria herramienta planeado I</i> .....	58
<b>Figura 64.</b> <i>Zoom trayectorias herramienta planeado I</i> .....	58
<b>Figura 65.</b> <i>Análisis material remanente planeado I</i> .....	59
<b>Figura 66.</b> <i>Resultado final planeado I</i> .....	59
<b>Figura 67.</b> <i>Macro entrada cajeadado I</i> .....	61
<b>Figura 68.</b> <i>Macro salida cajeadado I</i> .....	61
<b>Figura 69.</b> <i>Visualización vertical y completa de la trayectoria cajeadado I</i> .....	62
<b>Figura 70.</b> <i>Trayectorias herramienta cajeadado II</i> .....	63
<b>Figura 71.</b> <i>Resultado acumulativo del mecanizado</i> .....	63
<b>Figura 72.</b> <i>Análisis material remanente cajeadado II</i> .....	64
<b>Figura 73.</b> <i>Trayectorias planeado II</i> .....	64
<b>Figura 74.</b> <i>Trayectorias cajeadados III y IV</i> .....	65
<b>Figura 75.</b> <i>Resultado planeados y cajeadados laterales</i> .....	65

<b>Figura 76.</b> <i>Protuberancias en la base de la pieza durante amarre A</i> .....	66
<b>Figura 77.</b> <i>Análisis material remanente planeados y cajeados laterales</i> .....	66
<b>Figura 78.</b> <i>Trayectoria herramienta del chaflanado I</i> .....	67
<b>Figura 79.</b> <i>Trayectoria herramienta chaflanado lateral</i> .....	68
<b>Figura 80.</b> <i>Resultado acumulativo del mecanizado tras los chaflanados</i> .....	68
<b>Figura 81.</b> <i>Resultado análisis de material remanente tras chaflanado</i> .....	68
<b>Figura 82.</b> <i>Trayectoria herramienta ranurado I</i> .....	70
<b>Figura 83.</b> <i>Trayectoria herramienta ranurado II</i> .....	70
<b>Figura 84.</b> <i>Resultado acumulativo de los cajeados I y II</i> .....	71
<b>Figura 85.</b> <i>Resultados análisis material remanente cajeados I y II</i> .....	71
<b>Figura 86.</b> <i>Trayectorias herramienta ranurados laterales III-X</i> .....	72
<b>Figura 87.</b> <i>Resultados acumulativos ranurados laterales</i> .....	72
<b>Figura 88.</b> <i>Análisis de material remanente cajeados III-X</i> .....	73
<b>Figura 89.</b> <i>Diferentes vistas pieza intermedia para amarre B</i> .....	73
<b>Figura 90.</b> <i>Conjunto pieza-utillaje amarre B</i> .....	74
<b>Figura 91.</b> <i>Plano de seguridad y punto cero pieza intermedia en amarre B</i> .....	74
<b>Figura 92.</b> <i>Trayectorias herramienta planeado VI</i> .....	75
<b>Figura 93.</b> <i>Simulación intermedia y final del planeado VI</i> .....	75
<b>Figura 94.</b> <i>Análisis material remanente planeado VI</i> .....	76
<b>Figura 95.</b> <i>Trayectoria entrada helicoidal cajeadado XI</i> .....	76
<b>Figura 96.</b> <i>Trayectoria herramienta cajeadado XI</i> .....	77
<b>Figura 97.</b> <i>Trayectoria herramienta cajeadado XII</i> .....	77
<b>Figura 98.</b> <i>Resultado acumulativo de los cajeados XI y XII</i> .....	78
<b>Figura 99.</b> <i>Análisis material remanente cajeados XI y XII</i> .....	78
<b>Figura 100.</b> <i>Trayectorias herramienta chaflanes IX-XII</i> .....	79
<b>Figura 101.</b> <i>Resultado y análisis material remanente tras achaflanado</i> .....	79
<b>Figura 102.</b> <i>Trayectoria herramienta ranurados XI y XII</i> .....	79
<b>Figura 103.</b> <i>Resultado pieza final en amarre B</i> .....	80
<b>Figura 104.</b> <i>Resultados análisis material remanente</i> .....	80
<b>Figura 105.</b> <i>Maquina y entorno virtual del simulador</i> .....	82
<b>Figura 106.</b> <i>Configuración código APT en Catia V5</i> .....	83
<b>Figura 107.</b> <i>No interpretación del M140 en simulación</i> .....	86
<b>Figura 108.</b> <i>Función RTCP desactivada y activada</i> .....	87
<b>Figura 109.</b> <i>Error al activar M128 sobre código postprocesado</i> .....	88
<b>Figura 110.</b> <i>Pruebas en máquina de amarre A y B</i> .....	90
<b>Figura 111.</b> <i>Pieza intermedia mecanizada en material blando</i> .....	95
<b>Figura 112.</b> <i>Preforma inicial en amarre A</i> .....	96
<b>Figura 113.</b> <i>Resultado mecanizado pieza en amarre A</i> .....	97
<b>Figura 114.</b> <i>Montaje cuerpo de util en pieza intermedia</i> .....	98
<b>Figura 115.</b> <i>Trayectoria herramienta planeado</i> .....	99
<b>Figura 116.</b> <i>Trayectoria herramienta contorneado</i> .....	100
<b>Figura 117.</b> <i>Trayectoria herramienta cajeadado superior</i> .....	101
<b>Figura 118.</b> <i>Trayectorias herramienta contorneado y cajeadado inferiores</i> .....	101
<b>Figura 119.</b> <i>Trayectoria herramienta ranurados</i> .....	102
<b>Figura 120.</b> <i>Pieza rectificada con y sin cuerpo del util montado en un lateral</i> .....	103
<b>Figura 121.</b> <i>Pieza intermedia del amarre A</i> .....	104
<b>Figura 122.</b> <i>Utillaje diseñado y montado en pieza intermedia</i> .....	104
<b>Figura 123.</b> <i>Medición posición cero pieza en amarre B</i> .....	105

<b>Figura 124.</b> <i>Prueba mecanizado amarre B</i> .....	105
<b>Figura 125.</b> <i>Pieza intermedia montada en amarre B</i> .....	106
<b>Figura 126.</b> <i>Pieza final montada en utillaje</i> .....	106
<b>Figura 127.</b> <i>Pieza final mecanizada</i> .....	107
<b>Figura 128.</b> <i>Rebabas en aristas de los cubos interiores</i> .....	108
<b>Figura 129.</b> <i>Posición tolerancia agujeros (Gráfica superior) y ejes (Gráfica inferior)</i> .....	118
<b>Figura 130.</b> <i>Conjunto utillaje</i> .....	119
<b>Figura 131.</b> <i>Tolerancia mecanizado</i> .....	119
<b>Figura 132.</b> <i>Trayectoria real y teorica del mecanizado circular</i> .....	120
<b>Figura 133.</b> <i>Trayectoria real y teórica en plano vertical</i> .....	121
<b>Figura 134.</b> <i>Medidas a estudiar del negativo</i> .....	122
<b>Figura 135.</b> <i>Medidas secundarias a estudiar en negativo</i> .....	127
<b>Figura 136.</b> <i>Medidas cuerpo del util</i> .....	129
<b>Figura 137.</b> <i>Medidas secundarias a estudiar en cuerpo del util</i> .....	131
<b>Figura 138.</b> <i>Gráfica energía específica de corte, Método de Boothroyd</i> .....	149
<b>Figura 139.</b> <i>Espesor de viruta indeformada en procesos de fresado</i> .....	149
<b>Figura 140.</b> <i>Representación gráfica parámetros geométricos fresas toroidales</i> .....	150
<b>Figura 141.</b> <i>Representación gráfica parámetros geométricos fresa de ranurar</i> .....	152
<b>Figura 142.</b> <i>Representación gráfica parámetros geométricos broca helicoidal</i> .....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Base de herramientas</i> .....	40
<b>Tabla 2.</b> <i>Parámetros cinemáticos MIKRON HSM 400U</i> .....	41
<b>Tabla 3.</b> <i>Comparación parámetros de corte planeado y limites máquina</i> .....	57
<b>Tabla 4.</b> <i>Aplicaciones grado de tolerancias</i> .....	123
<b>Tabla 5.</b> <i>Parámetros geométricos fresa toroidal</i> .....	150
<b>Tabla 6.</b> <i>Parámetros de corte fresa toroidal</i> .....	151
<b>Tabla 7.</b> <i>Parámetros geométricos fresa de ranurar</i> .....	152
<b>Tabla 8.</b> <i>Parámetros de corte fresa de ranurar</i> .....	152
<b>Tabla 9.</b> <i>Parámetros geométricos broca helicoidal</i> .....	154
<b>Tabla 10.</b> <i>Parámetros de corte broca helicoidal</i> .....	154

### 1. MOTIVACIÓN

A día de hoy los procesos de mecanizado se constituyen como una técnica fundamental en la mayoría de los sectores industriales, tanto por sus características técnicas que aportan precisión, rapidez y flexibilidad, así como por su economía competitiva.

Esto se ha visto traducido en un incremento de la producción, así como de la capacidad para fabricar cualquier elemento independiente de su geometría, aumentando la repetitividad y la calidad de los mismos. A todo ello sumar, una mayor flexibilidad a la hora de adaptarse a la fabricación de nuevos componentes, siendo desplazadas otras técnicas de fabricación como el forjado o moldeo ante las limitaciones o elevados costos y/o tiempos que presentan.

Entre algunos de los sectores industriales con aplicación directa, encontramos el sector médico, el aeroespacial e incluso el automovilístico entre otros, industrias en la que la componente del mecanizado presenta un gran peso con respecto al producto final. Por ello, el avance y desarrollo continuo que afecta a este campo es de gran importancia, el cual se extiende desde la mejora de las herramientas de corte hasta la generación de nuevos medios de producción o herramientas de control más sofisticadas.

Profundizando aún más dentro de las diferentes ramas del mecanizado, encontramos el mecanizado por arranque de viruta, campo en el cual las máquinas de CNC (Control Numérico Computarizado) son un pilar fundamental, constituyéndose como uno de los principales signos identificativos del mecanizado. Este tipo de mecanizado presenta un largo y complejo proceso de fabricación que se extiende desde el diseño de la pieza hasta el control de la máquina-herramienta, pasando por la definición de las operaciones de mecanizado y parámetros de corte necesarios. Todo ello se ve facilitado por el papel desempeñado por los software de CAD/CAM, los cuales engloban la teoría y técnica asociada al mecanizado, así como su puesta en práctica mediante la generación del control pertinente de las máquinas que hacen posible la fabricación.

Así pues, teniendo en cuenta la gran importancia que posee el mecanizado en la industria y la complejidad asociada a ello, ha sido seleccionado este tema como proyecto fin de master con el objeto de dar a conocer cada una de las fases que implica un proceso de mecanizado complejo, desde el diseño del utillaje necesario, selección de parámetros de corte, generación de trayectorias de mecanizado hasta el postprocesamiento de la información y control de la máquina-herramienta.

Destacar también, que otra de las motivaciones del proyecto reside en la puesta en práctica de cada uno de los conocimientos a desarrollar en el proyecto sobre la máquina de CNC, Mikron HSM 400U, la cual posee el departamento de Ingeniería Mecánica y de Fabricación en sus instalaciones. Como se puede suponer no se trata de una máquina convencional, sino una máquina avanzada que une una cinemática compleja con la posibilidad del mecanizado de alta velocidad, lo cual constituye una motivación extra para el proyecto.

En resumen, el proyecto se presenta como todo un reto, en el cual se recogerán las pautas, análisis y soluciones a los diferentes problemas a afrontar en un proceso de mecanizado complejo real, estando en nuestro caso supeditado por los medios que disponemos y del compromiso de potenciar al máximo las posibilidades que nos brinda la máquina a emplear.



### 2. OBJETIVOS

La idea principal del proyecto reside en la fabricación y desarrollo de cada una de las fases de mecanización de una pieza compleja aleatoria, la cual contemple el uso de los 5 ejes, así como del mecanizado de alta velocidad mediante el empleo de la máquina Mikron HSM 400U. A todo ello, hemos de sumarle el estudio de los problemas a afrontar con respecto a las limitaciones que presentan tanto la máquina en sí respecto a su controlador y cinemática, así como el software de CAD/CAM y de postprocesamiento a la hora de llevar a cabo el mecanizado.

Así pues, para la consecución de dicha idea general, el proyecto se compondrá de una serie de objetivos principales y complementarios, siendo estos los citados a continuación:

- Definición completa de cada una de las fases que componen todo proceso de mecanización, recogiendo la teoría pertinente en la que se fundamenta, así como la justificación de cada una de las elecciones realizadas de cara a conseguir un mecanizado óptimo y potenciador de las capacidades de la máquina.
- Diseño de pieza mediante software CAD que implique el uso de una máquina de CNC de 5 ejes, ya sea por la geometría compleja que presente la pieza, o bien, por la reducción del tiempo de fabricación al no requerir múltiples amarres, así como diferentes máquinas.
- Diseño del utillaje necesario dependiendo de la geometría de la pieza y/o del mecanizado a realizar para la sujeción completa de esta, caracterizándose por una gran robustez y estabilidad del conjunto pieza-útil, además de su eficiencia y eficacia.
- Diseño completo de cada una de las operaciones de mecanizado necesarias para la fabricación de la pieza, definiendo trayectorias de entrada, salida y de mecanizado, sistemas de referencia, distancias de seguridad, así como la selección de parámetros de corte y herramientas óptimas, todo ello realizado mediante el uso de software CAD/CAM.
- Simulación de cada una de las operaciones de mecanizado con objeto de analizar trayectorias, material remanente, colisiones e incluso tolerancias dimensionales de la pieza final con respecto al diseño.
- Postprocesamiento de las operaciones diseñadas en el programa en instrucciones de control, es decir, la traducción de los movimientos de la herramienta al lenguaje conversacional propio de la máquina, siendo realizado la simulación de dichas instrucciones en búsqueda de posibles fallos producidos en el postprocesamiento.
- Configuración de la máquina-herramienta en lo que respecta a información relativa a puntos de referencia, herramientas de corte, carga del programa, ubicación del utillaje sí procede y amarre completo de la pieza. A todo ello sumarle el control y supervisión continua de la máquina durante el mecanizado.
- Análisis dimensional y del acabado superficial de la pieza para asegurar el cumplimiento de los requisitos geométricos del diseño inicial.
- Obtención de la documentación gráfica necesaria para la comprensión y seguimiento completo del proceso de fabricación de la pieza.



### 3. ANTECEDENTES

Para facilitar la comprensión del proyecto, así como ubicar en contexto al lector menos conocedor de la materia, se recogerán a continuación todos aquellos aspectos relacionados con el mundo del mecanizado, haciendo especial hincapié en el mecanizado mediante arranque de viruta.

Así pues, para ello será expuesto desde el devenir de la técnica hasta los fundamentos básicos sobre los cuales se sustenta la técnica, citando todos aquellos elementos envueltos en su aplicación, dentro de los cuales encontraremos tanto las máquinas, herramientas como los programas empleados para ello.

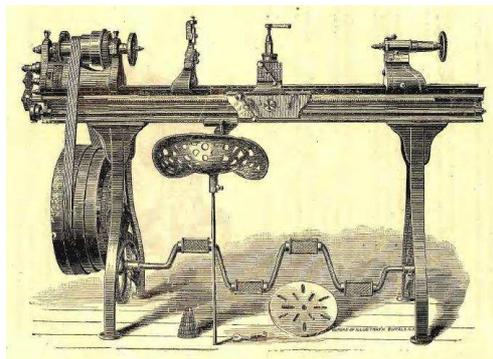
#### 3.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Con el objetivo de comprender mejor el devenir de esta técnica, a continuación se comentará su transcurso en el tiempo [1, 2, 3,4], describiendo la evolución de esta y sobretodo el desarrollo sufrido principalmente por las máquinas-herramientas que la llevan a la práctica.

Así pues, mirando en la evolución del mecanizado podemos decir que la fabricación de objetos mediante eliminación de material ha ido acompañando al hombre desde su inicio, de tal forma que para poder hablar de su comienzo debemos de remontarnos a la prehistoria, época en la que el hombre primitivo a base de herramientas rudimentarias daba forma a objetos, tales como la punta de una lanza o el tallado de figuras.

Siempre, la evolución del mecanizado ha ido marcada por la estrecha relación entre herramienta y máquina, siendo durante los primeros siglos de la historia la herramienta una prolongación de la mano del hombre hasta la aparición de las primeras máquinas-herramientas.

Remontándonos hacia finales del siglo XV, encontramos las primeras máquinas cuales eran accionadas mecánicamente mediante un arco o pedales, transfiriéndole el movimiento a un eje donde se encontraba la pieza a mecanizar. Nació de esta forma los primeros rudimentarios tornos de la historia, accionados con los pies y permitiendo por tanto tener las manos libres para poder mecanizar la pieza mientras esta rotaba. Este tipo de torno de giro continuo era llamado torno de pedal y rueda, el cual como ya se ha comentado, implicaba el uso de biela-manivela combinado junto con un volante de inercia para poder superar los puntos muertos.



**Figura 1.** Torno de pedal y rueda

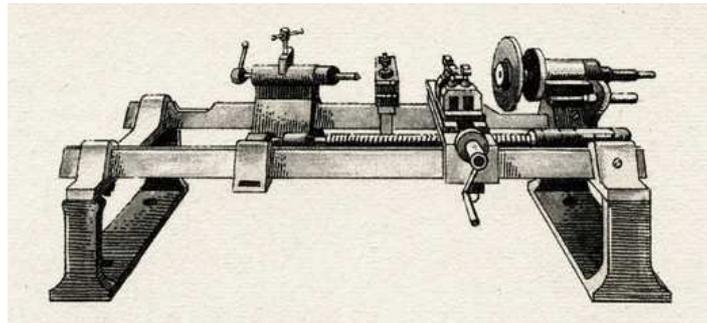
Con el paso del tiempo se fue mejorando la técnica de este tipo de máquina gracias a la aparición de los engranajes, aplicados en aquel entonces en relojes. Junto con este avance y el estudio de las relaciones de engranajes y forma de los dientes de los mismos por parte de Leonardo DaVinci,

se propició un gran desarrollo de este proceso de fabricación, siendo a pesar de ello todavía difícil mecanizar piezas de metal.

Sería a finales del siglo XVIII, cuando comenzaría a fabricarse piezas con relativa precisión gracias a la invención del torno de roscar del inglés Jesse Ramsden, el cual estaba constituido en parte por acero fundido y madera, y era accionado mediante una manivela que hacía girar la pieza a mecanizar de tal forma que gracias al juego de engranajes se podía generar un gran torque. Además de ello, la herramienta se podía desplazar longitudinalmente, pudiendo fabricar piezas de cierta precisión.

Pero no sería hasta el siglo XIX, con la aparición de la máquina de vapor y por tanto la revolución industrial, cuando las máquinas-herramientas cobrarían gran importancia y desarrollo. En gran parte, esto se debe al destacado desarrollo industrial de este tiempo, el cual exigía de procesos de fabricación más precisos, potentes y de la manipulación de materiales metálicos para la generación de nuevas maquinarias e instrumentos.

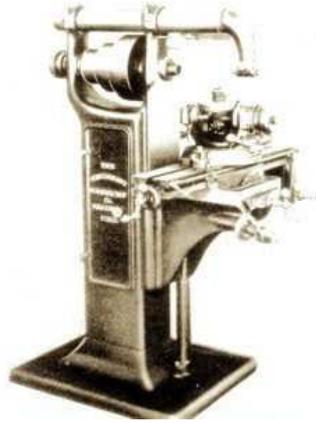
Un claro ejemplo de ello, se puede apreciar en la fabricación de los cilindros y pistones de por aquel entonces nueva máquina de vapor, los cuales necesitaban de tolerancias muy estrechas para evitar el escape del vapor. A raíz de ello, Maudslay fabricaría la primera máquina-herramienta de gran precisión debido ello a estar constituida en su totalidad de metal, a la introducción de guías planas para un mayor y preciso desplazamiento del carro porta-herramientas y así como por los husillos roscados de gran precisión con los que contaba para el desarrollo de los avances. A continuación podemos ver un boceto del torno de Maudslay.



**Figura 2.** *Torno de Maudslay.*

Paralelamente, se iría desarrollando las primeras máquinas de fresar, siendo el precursor de ellas el americano Ely Whitney por el año de 1818. Todo ello se produjo gracias al encargo recibido de fabricar un gran lote de fusiles para el estado Americano, lo cual le obligo a diseñar una máquina-herramienta que facilitará y acelerará el proceso de fabricación. Compuesta de madera e hierro forjado, poseía una mesa porta-piezas que se desplazaba longitudinalmente sobre unas guías en forma de cola de milano, lo que le aportaba cierta robustez y precisión.

Sin embargo, sería en 1848 cuando Howe introduciría una serie de mejoras a la fresadora de Whitney, dotándola de la capacidad de desplazarse en sentido vertical, longitudinal y transversal, además de ser fabricada totalmente en acero fundido y accionada mecánicamente mediante correas movidas por las máquinas de vapor existentes en esa época. Posteriormente, se le introduciría un divisor y avance automático a la mesa longitudinal gracias a la aplicación de la transmisión Cardan entre otras mejoras destacables, siendo plasmado toda esta tecnología en la fresadora universal creada en 1884 por Cincinnati, siendo mostrada en la siguiente figura.



**Figura 3.** *Fresadora Cincinnati de 1884*

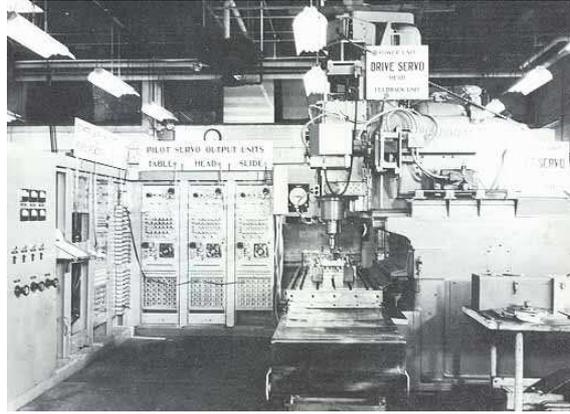
Mientras tanto Whitworth, uno de los aprendices de Maudslay llevaría a cabo avances relacionados con la precisión de las máquinas-herramientas, sobretodo en la fabricación de piezas con rosca, siendo esto plasmado en el perfeccionamiento del torno paralelo monopolea hasta la aparición de la caja Norton, la cual sustituiría los avances realizados por Whitworth. Este mecanismo consistía en un juego de varios engranajes que permitían cambiar el paso de las piezas a roscar, permitiendo crearlas con diferentes tipos de rosca.

No solo las máquinas sufrieron grandes avances en el siglo XIX, sino que también las herramientas fueron impulsadas gracias a la generación de nuevos materiales tales como el acero aleado por parte de Robert Mushet en 1865, el cual permitía doblar la velocidad de mecanizado en relación con las herramientas de acero al carbono existentes hasta entonces. Posteriormente, se desarrollaría el carburo de silicio, llamado Carborundum por parte de Edward Goodrich en 1891 y el acero rápido por parte de Taylor y White en 1898. Todos estos descubrimientos permitirían triplicar la velocidad periférica de corte y por tanto las prestaciones del mecanizado.

A principios del siglo XX, se introducirían ligeras modificaciones en las máquinas y herramientas, por un lado en gran parte de nuevo a la sustitución de las formas de energía existentes, desarrollándose en aquel entonces la electricidad y la aplicación de motores eléctricos en las máquinas-herramientas. Y por otro lado, el descubrimiento de nuevos materiales de mayores prestaciones, entre los que encontramos el carburo cementado o widia por parte de la empresa Krupp.

Sin embargo, el mayor de los avances de este siglo se produce a partir de la década de los cuarenta, una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, periodo en el cual John Parson, fabricante de alabes de rotor de helicópteros, inicia los primeros pasos del control numérico.

Los alabes de helicóptero se caracterizan por presentar un perfil y unas formas muy complejas, de tal forma que para poder mecanizarlos con cierta precisión se necesitaría de un elevado número de puntos de su geometría. Estos puntos necesitaban ser obtenidos de cálculos muy tediosos y complejos, por lo que apoyándose en una computadora numérica de IBM, calcularía la geometría de los alabes con un elevado número de puntos, los cuales serían posteriormente comunicados a dos operarios, quienes controlarían el eje X e Y para mecanizar.



**Figura 4.** *Fresadora del MIT.*

A raíz de esto, Parson pensó en desarrollar una técnica que pudiera introducir los puntos calculados directamente en la máquina sin tener que introducirlos manualmente, lo cual reduciría el tiempo y la posibilidad de fallo. Sin embargo ante la falta de fondos para desarrollar tal idea se estancó la investigación hasta 1949, fecha en la cual Parson recibiría apoyo por parte del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) para desarrollar una máquina capaz de controlar los movimientos de una fresadora. Apoyándose en los conocimientos que poseían sobre el control de servomotores y la automatización de sistemas de seguimiento generarían la primera máquina de control numérico a finales de 1952, la cual poseía una computadora de tamaño superior a la propia fresadora, estando compuesta en su gran mayoría por válvulas de vacío. Esta máquina era capaz de controlar el movimiento de los tres ejes simultáneamente mediante código binario, almacenándolo en cintas perforadas. Nació de esta forma el inicio del control numérico (NC), sentando las bases de las máquinas de mecanizado que hoy en día conocemos. Posteriormente, Parson recibiría un contrato por parte de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos para la producción de más de 150 máquinas.

A partir de la década de los sesenta, el precio y tamaño de las maquinas decrece debido en gran parte al desarrollo de la electrónica, apareciendo los primeros transistores que sustituirían a las grandes válvulas de vacío y como consecuencia se fabricarían computadoras de mayor potencia y menor tamaño. Además de ello, se comenzó a desarrollar los primeros lenguajes de programación de control numérico entre los que encontramos el lenguaje APT (Automatically Programmed Tool), así como también el lenguaje de Código-G estándar, conocido hoy en día como código ISO por su internalización.

Entre la década de los setenta y ochenta, se produce un gran impulso de la informática y la electrónica, apareciendo los primeros microprocesadores y circuitos impresos. Estos permitieron integrar computadoras completamente en el interior de las máquinas de mecanizado, de tal forma que estas dejaron de seguir ciegamente las instrucciones de los programas sin tener en cuenta otra serie de factores, siendo el caso de las máquinas de control numérico (NC). Estas nuevas podían calcular mecanizados tridimensionales, trayectorias óptimas, analizar movimientos, comunicarse con el usuario... surgiendo de esta forma lo que hoy en día conocemos como control numérico computarizado (CNC). Como podemos observar, la gran diferencia entre control numérico y control numérico computarizado radica en la capacidad del controlador, es decir, las máquinas de CN solo se limitan a seguir instrucciones mientras que las de CNC analizan además la información.



**Figura 5.** Centro de mecanizado.

Este avance no solo se extendió a las fresadoras, sino que fue también aplicado a otras máquinas de control numérico como tornos, taladradoras, mandrinadoras... surgiendo la idea de combinar todas ellas en una única máquina. De esta forma surgiría lo que hoy en día conocemos por centros de mecanizado, una máquina capaz de mandrinar, fresar, tornear, taladrar... en una misma, reduciendo el tiempo de fabricación, el número de utillaje y el espacio en talleres. En la figura 5 podemos observar un ejemplo de dicha máquina.

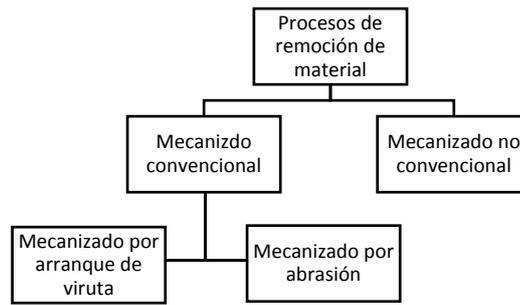
Durante los últimos veinte años se han producido ciertos avances en el campo del mecanizado gracias al desarrollo de máquinas capaces de mecanizar a altas velocidades, lo que supone poder fabricar a velocidades de corte entre 5 y 10 veces superiores a las que se utiliza de manera convencional. Paralelamente, con respecto a las herramientas de corte se han generado nuevas formas de herramientas no enterizas, constituidas a base de pequeñas plaquitas, las cuales poseen determinadas geometrías en función de las características del material y del proceso de mecanizado, mejorando notablemente el rendimiento del mecanizado. Cabe destacar también, el desarrollo de nuevos materiales como el nitruro de boro cúbico, que permite el mecanizado de piezas de alta dureza, pudiendo ser sometidas las herramientas a mayores esfuerzos continuados.

En general, en las últimas décadas se ha producido un gran avance del campo del mecanizado, gracias a la creación de software que permiten aunar diseño y mecanizado, nuevas formas de comunicación con la máquina, nuevos controladores... convirtiendo esta técnica de fabricación en un elemento esencial en cualquier industria.

### **3.2. MECANIZADO**

El mecanizado se concibe como un proceso de fabricación que tiene como objetivo la generación de piezas mediante operaciones que conllevan la remoción de material, ya sea por arranque de viruta o simplemente por abrasión, consiguiendo el tamaño y la forma deseada.

Este proceso se realiza principalmente a partir de piezas semielaboradas tales como lingotes o tochos de material bruto, pudiendo también aplicarse a piezas no terminadas mediante otros procesos como el forjado o moldeo debido a la dificultad para la obtención de la geometría y acabado deseado mediante dichas técnicas.



**Figura 6.** Clasificación tipo de *mecanizados*

Así pues, en función del tipo de tecnología empleada, así como de sus fundamentos técnicos, podemos diferenciar básicamente tres tipos de mecanizado [3] clasificados a su vez en dos grandes grupos. Por un lado encontramos el **mecanizado convencional**, basado en la rotación de la herramienta, o bien, de la pieza para la remoción de material, de tal forma que en función de la cantidad de material a eliminar respecto al volumen de la pieza inicial y de los parámetros de corte definidos, este grupo se encuentra dividido a su vez en:

- **Mecanizado por abrasión:** trata de la eliminación de material mediante el desprendimiento en pequeñas porciones de este al entrar en contacto con la herramienta, la cual suele caracterizarse por estar compuesta de material de gran dureza unido mediante aglutinante. A diferencia del mecanizado por arranque de viruta, la fuerza a aplicar es mucho menor y en consonancia menor vibración, consiguiendo una mayor calidad superficial, en detrimento de un elevado tiempo de mecanizado.
- **Mecanizado por arranque de viruta:** a diferencia del mecanizado por abrasión, este se caracteriza por la eliminación de grandes cantidades de material de la pieza inicial mediante el empleo de herramientas con uno o varios filos de corte, realizando múltiples pasadas para ello. Mayoritariamente este proceso suele estar compuesto de dos fases, una primera de desbaste, es decir, eliminación de la mayor cantidad de material posible y seguidamente, una pasada de acabado con el objetivo de obtener superficies sin imperfecciones y con buenas tolerancias dimensionales.

Paralelamente, encontramos el **mecanizado no convencional**, grupo que se caracteriza principalmente por la eliminación o remoción de material mediante medios no mecánicos, basándose su tecnología en el empleo de la química, la electricidad o haces de alta energía para su fin.

El hecho por el cual se requiere este tipo de mecanizado se debe a la imposibilidad de la fabricación mediante métodos convencionales debido a diversos motivos que van desde la alta dureza de los materiales, la posible fragilidad de estos, la complejidad de la pieza, hasta la posibilidad de presentar partes con cierta flexibilidad, pasando por requerimientos de acabado superficial y dimensional muy exigentes. Todo ello hace que las técnicas de mecanizado electroquímico, por rayo láser, por haz de electrones, por chorro de agua o por descarga eléctrica supongan unas alternativas muy competitivas frente a las convencionales.

Centrándonos de nuevo en la técnica de mecanizado convencional mediante arranque de viruta, hemos de destacar dos variantes paralelas que conviven con el mecanizado convencional en lo que respecta a los parámetros de corte. Estas técnicas, conocidas como mecanizado de alto rendimiento y de alta velocidad, son consideradas como técnicas avanzadas de mecanización,

las cuales suponen una cierta mejora del mecanizado convencional. A continuación, para obtener un conocimiento mayor de ellas, serán explicadas brevemente.

### **3.2.1. Mecanizado alto rendimiento**

Tradicionalmente el mecanizado de alto rendimiento [6] ha sido relacionado con la técnica de arranque de viruta caracterizada por el empleo de grandes avances y profundidades, manteniendo constante la velocidad de corte convencional. Como consecuencia del empleo de grandes profundidades, las fuerzas de corte también lo serán, siendo esto una de las principales condiciones limitantes al ser necesario el empleo de máquinas de gran rigidez y potencia, además de herramientas de gran dureza.

Ante estas condiciones, este tipo de técnica quedaría relegada solamente a la mecanización de materiales blandos como aleaciones ligeras, aceros de baja resistencia y no templados, con el objeto de evitar posibles problemas como la rotura de la máquina y/o de la herramienta.

A día de hoy, gracias al desarrollo continuo de las máquinas, así como la generación de herramientas de mayor dureza y resistencia al desgaste, el concepto de mecanizado de alto rendimiento ha sido re-definido, refiriéndose actualmente a toda aquella tecnología de mecanizado que mejora aspectos como la productividad y/o la calidad de las piezas, aportándole a estas un valor añadido.

Entrando en profundidad, la mejora de la productividad debe de entenderse como el incremento de la tasa de arranque de viruta por unidad de tiempo, sin producirse el incremento de la pérdida de vida de la herramienta. Por otro lado, con respecto a la calidad de este tipo de técnicas llevarán asociado una mejora tanto dimensional como superficial de la pieza a fabricar, estando siempre comparando dichos resultados con respecto al mecanizado convencional.

En resumen, este término es referido a cualquier técnica de mecanizado que lleve implícito una mejora notable de la forma tradicional de mecanizar en aspectos como la productividad y/o calidad. Dentro de tales técnicas identificamos tanto el mecanizado de alta velocidad, como la técnica que lleva su mismo nombre, es decir, el mecanizado de alto rendimiento o mejor dicho, mecanizado de alta tasa de remoción, el cual ha sido ya comentado.

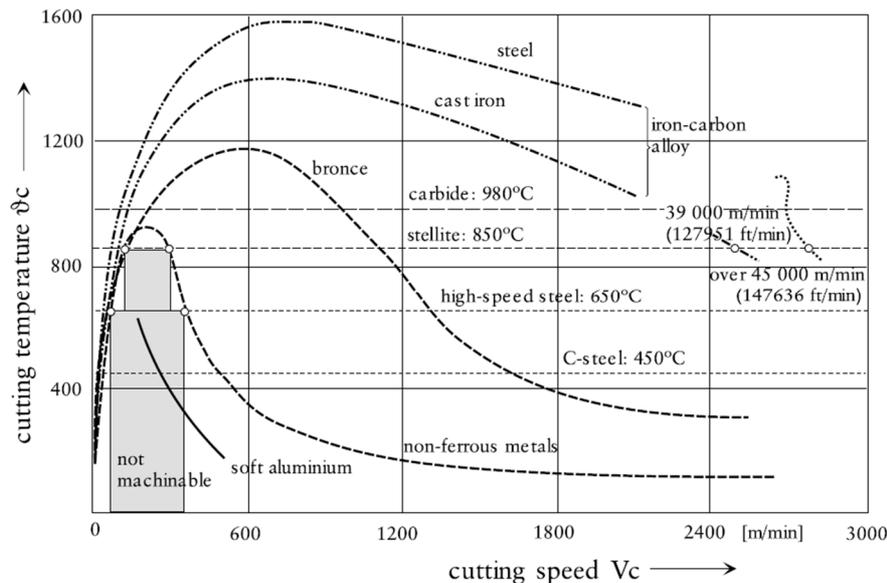
### **3.2.2. Mecanizado alta velocidad**

Gracias a los avances tecnológicos producidos durante las últimas décadas en las máquinas de mecanizado, se ha podido desarrollar una variante paralela a la tecnología convencional de fabricación mediante arranque de viruta, caracterizada principalmente por el incremento de la velocidad de corte. Esta variante conocida como mecanizado de alta velocidad o por las siglas MAV (HSM, High Speed Machining en inglés) posee diversas definiciones, siendo una de las más conocidas [5,6], aquella que la describe como la técnica de mecanizado que emplea altas velocidades de corte y avance con el objetivo de conseguir elevadas tasas de eliminación de material, sin la pérdida de precisión y calidad de la pieza, en detrimento de emplear bajas profundidades axiales y radiales.

Por otro lado, otras de las definiciones según Pasko [7], consistiría en comprender el mecanizado de alta velocidad como un proceso de fabricación en el que las operaciones se llevan a cabo mediante métodos y equipos específicos, no relacionándolo simplemente con altas velocidades de giro del husillo. En general, no existen definiciones en las que se recojan que régimen de velocidad de corte o avance son considerados de alta velocidad, ya que esto dependerá de

diversos factores tales como el material, la herramienta, el tipo de operación... siendo únicamente aceptado que dichos parámetros son superiores a los del mecanizado convencional, salvo la profundidad radial y axial que son bastante más inferiores, en especial esta última.

Sería por primera vez en 1931, año en el que Carl Salomón enunciara los primeros pilares del MAV, basados en el hecho de que al ir incrementando la velocidad de corte en torno a 5 o 10 veces la convencional, encontraríamos un punto de inflexión a partir del cual la temperatura alcanzada en la zona viruta-herramienta disminuiría progresivamente, así como el desgaste de la misma. Esto se traduciría en un aumento de la durabilidad de las herramientas como de la productividad del mecanizado.



**Figura 7.** Curvas temperatura vs velocidad de corte según Carl Salomón

Sin embargo, dicha teoría no ha podido ser verificada en toda su extensión en base a los recientes estudios experimentales [7], existiendo aportaciones de otros investigadores como McGee quien argumentaría que a partir de una determinada velocidad, la temperatura de corte no decrece, sino que tiende a estabilizarse, contradiciendo así la hipótesis de Salomón.

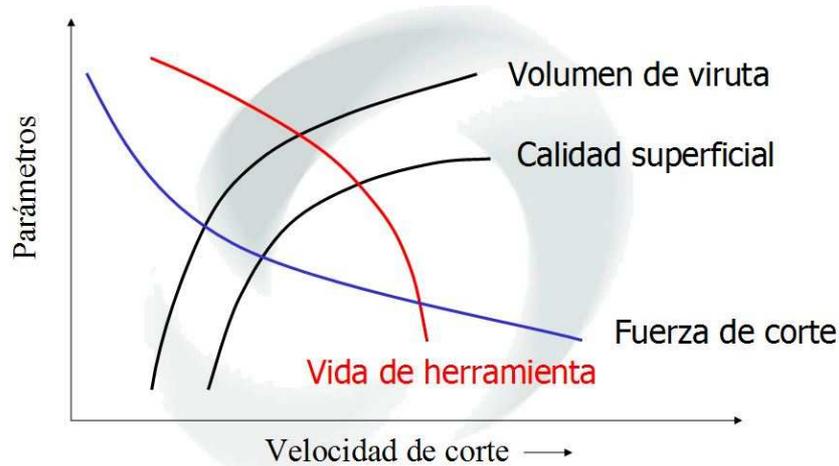
A esta hipótesis anterior, hemos de sumar el argumento de Pasko [7], quien aseguraría además la existencia de un decremento relativo de la temperatura del material mecanizado, dependiendo de su composición. Teniendo en cuenta esta hipótesis como otras, podemos llegar a caracterizar esta técnica de mecanizado como aquella que permite la obtención de buenos acabados superficiales, buen comportamiento en la mecanización de materiales templados, reducidos tiempos de fabricación y una gran precisión dimensional debido al escaso calentamiento de la pieza.

Este fenómeno de no calentamiento, se debe al hecho de que al poseer una elevada velocidad de corte, el tiempo de contacto es mínimo, no dando tiempo que se produzca la conducción del calor a la pieza. Esto convierte la generación de viruta en un proceso casi adiabático. A todo ello, hemos de sumarle que todo el calor generado es atrapado en la viruta y en una pequeña proporción en el filo de corte, lo que evita la dilatación del material y por ende, permite mecanizar estrechas y esbeltas paredes con gran precisión dimensional.

Volviendo de nuevo a la reducción de tiempos de mecanizado, hemos de argumentar que esto no es solo conseguido gracias a parámetros de corte más elevados, sino que la no necesidad de

realizar dobles pasadas, es decir, una primera pasada de desbaste y una segunda de acabado, hace reducir considerablemente el tiempo. Esto se debe al hecho de que los parámetros de corte empleados además de ser seleccionados para desbaste, son idóneos para conseguir un acabado superficial óptimo, lo cual reduce el tener que realizar más pasadas.

En contra, para desarrollar este tipo de mecanizado es necesario de unas programaciones más exhaustiva y compleja, ya que se deberán de generar trayectorias cuyos giros o cambios de dirección sean lo menos pronunciados posibles, con el objeto de contrarrestar las fuerzas inerciales de los rápidos movimientos.



**Figura 8.** *Propiedades del MAV*

Según como se ha comentado anteriormente, en el mecanizado de alta velocidad las pasadas se caracterizan por poseer pequeñas profundidades axiales, lo que se traduce en un tamaño de viruta más pequeño y por tanto, menores fuerzas de corte a medida que la velocidad aumenta, siendo reflejada esta propiedad como otras en la figura anterior.

Destacar también que este tipo de técnica, debido al estado de desarrollo en la que se encuentra como a la complejidad que lleva asociada, el costo de las herramientas como de la máquina son elevadas, siendo justificado este hecho en el caso de las herramientas por la necesidad de requerir ciertos recubrimientos especiales de TiAlN para minimizar el elevado desgaste mediante el fenómeno de difusión.

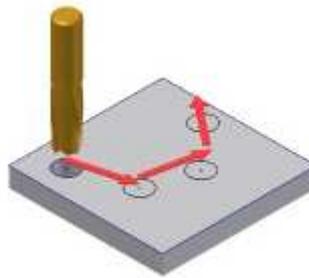
En general, a pesar de los elevados costes asociados, estos son contrarrestados con la reducción de tiempos y la elevada productividad, convirtiéndose esta técnica en una competitiva forma de fabricar complejas piezas con materiales de gran dureza, pudiendo llegar a desbancar a otras técnicas como el mecanizado convencional en determinados casos, dependiendo de factores como número de lotes, geometría, tipo de operación...

### 3.3. TIPOLOGÍA MÁQUINAS

Hoy en día existe tantas configuraciones de máquina-herramientas como necesidades de fabricación hay, las cuales dependerán desde la geometría de la pieza a fabricar hasta el tipo de trayectoria a seguir por la herramienta, pasando incluso por el tipo de control de esta.

Teniendo esto en cuenta, podremos clasificar las máquinas-herramientas [1, 2, 3] según cuatro grupos, los cuales no deben considerarse excluyentes, sino complementarios entre ellos para la definición completa de la máquina. A continuación se comenta en detalle cada grupo,

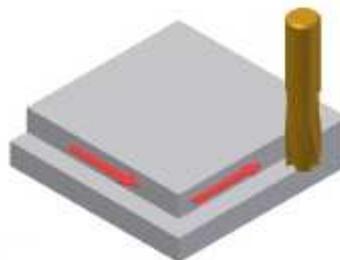
- **Según tipo de trayectoria:** para poder llevar a cabo las operaciones de mecanizado es necesario controlar el movimiento de la herramienta a lo largo de la geometría definida o de los puntos donde se llevará a cabo la operación de mecanizado. Así pues, dependiendo del tipo de máquina, el movimiento de la herramienta podrá ser diferente, encontrando los siguientes tipos:
  - **Punto a punto:** se basa principalmente de operaciones de mecanizado en la que la herramienta solamente mecaniza perpendicularmente a la superficie de la pieza, de tal forma que hasta que no se encuentre retraída la herramienta hasta su posición de seguridad, esta no se podrá desplazar de un punto a otro.



**Figura 9.** Control punto a punto

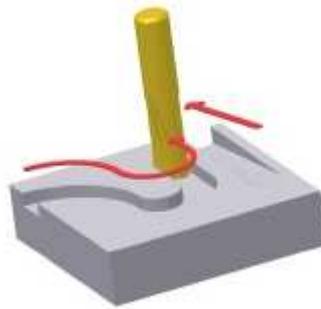
Los desplazamientos entre puntos se caracterizan por ser movimientos simples los cuales son rectilíneos, no pudiendo controlar avance ni velocidad del movimiento en ellos y por tanto, no pudiendo mecanizar durante el desplazamiento de punto a punto. Además, puntualizar que el movimiento solo lo realiza la herramienta y no simultáneamente la mesa de trabajo como veremos más adelante en otros casos. Su empleo suele realizarse en máquinas de taladrado o punzonadoras, caracterizándose por ser un tipo de control propio de máquinas de 0 ejes.

- **Control paraxial:** a diferencia del control anterior, este permite realizar operaciones de mecanizado cuando la herramienta se desplaza, pudiendo controlar la velocidad y avance de esta. La peculiaridad que posee es que solamente puede desplazarse paralelamente a los ejes de la máquina, lo cual permite encasillarla en máquinas de un solo eje, siendo principalmente utilizada en fresadoras.



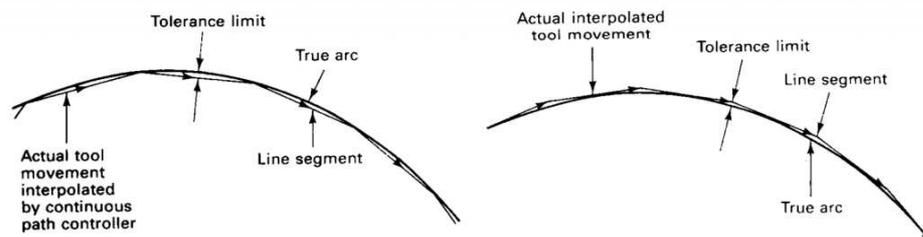
**Figura 10.** Control paraxial.

- **Control continuo o de contorneado:** se caracteriza por poder controlar no solo la posición final de la herramienta, sino también el movimiento de esta en cada instante, alternando no solo movimientos a lo largo de un único eje, sino coordinar movimientos entre varios ejes simultáneamente. Esta coordinación simultanea entre varios ejes se realiza gracias a técnicas de interpolación lineal, circular, helicoidal, parabólica y/o cúbica, las cuales permiten realizar movimientos circulares, lineales con variación en la profundidad, contorneados tridimensionales... todo ello dependiendo a su vez, como veremos adelante, del número de ejes que se disponga, siendo aplicado este tipo de control principalmente desde máquinas de 2.5 ejes hasta de 5 ejes.



**Figura 11.** Control continuo o de contorneado.

En general estas interpolaciones se pueden tratar como aproximaciones lineales a una determinada geometría, de tal forma que una trayectoria no rectilínea se puede definir por movimientos rectilíneos de muy pequeño tamaño, siendo la distancia existente entre la trayectoria de la herramienta y la geometría original, la tolerancia del mecanizado. A tolerancia menor, mayor número de puntos serán tenidos en cuenta y por tanto mayor precisión en el mecanizado. El cálculo de estos puntos intermedios se realiza mediante interpoladores, compuestos por microprocesadores que realizan el cálculo de la trayectoria de la herramienta respecto a la geometría a seguir. A continuación se muestra un ejemplo de interpolación circular tanto interna como externa, aunque también podría realizarse sobre la propia trayectoria.

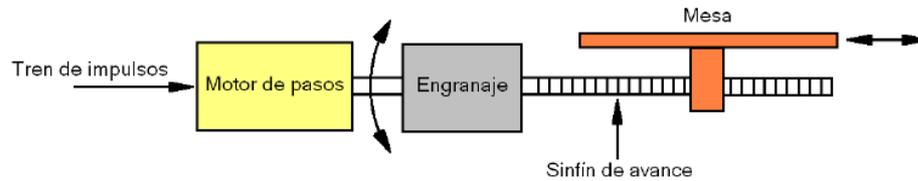


**Figura 12.** Interpolación control continuo.

Este tipo de control es mayoritariamente utilizado hoy en día en casi todas las máquinas de control numérico, desde fresadoras hasta centro de mecanizados, pasando por tornos, máquinas punzonadoras, de corte por láser... es decir, todas aquellas máquinas que necesiten del control de movimiento de una herramienta.

- **Según tipo de control:** para poder conocer con exactitud la posición de la herramienta en cada instante, la máquina-herramienta cuenta con diferentes tipos de tecnologías de control, las cuales son:

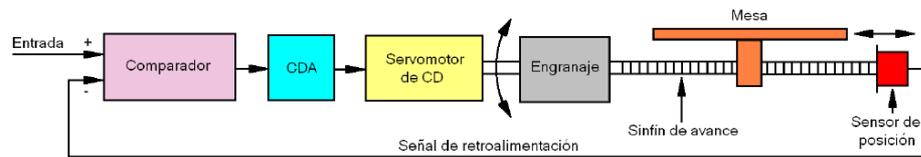
- **Bucle abierto:** en este tipo de control, el procesador de la máquina envía instrucciones convertidas en señales eléctricas al servo motor de esta, el cual se encarga del desplazamiento de la herramienta y/o de la mesa de trabajo, de tal forma que al ser un sistema de control abierto no se puede saber con exactitud si la herramienta o la mesa de trabajo ha llegado a alcanzar su posición deseada y los parámetros de velocidad o avance definidos.



**Figura 13. Sistema bucle abierto.**

Es por ello, que este tipo de control suele emplearse en máquinas donde no es necesario tener una precisión muy elevada, siendo usualmente utilizado este control en máquinas de control punto a punto.

- **Bucle cerrado:** este sistema de control posee encoders/sensores de posición los cuales realimentan al controlador de la máquina para asegurarse que la herramienta ha alcanzado la posición deseada con sus correspondientes parámetros de movimiento.



**Figura 14. Sistema bucle cerrado.**

Este sistema de control se caracteriza por ser más preciso y potente que el anterior, siendo capaz automáticamente de compensarse para salvar las posibles variaciones que se produzcan en los movimientos.

- **Según número de ejes:** cada máquina posee diferentes grados de movimiento dependiendo principalmente de su configuración cinemática, de tal forma que en función del número de estos podremos realizar diferentes operaciones y movimientos, siendo necesario para ello disponer microprocesadores de interpolación para el control entre dos o más ejes simultáneamente. A continuación se muestra las configuraciones que podemos llegar a encontrarnos:
  - **Sistemas de control de 0 eje:** máquinas que mayoritariamente se emplean para el posicionamiento, compuestas de hasta tres posibles ejes pero no pudiendo controlar la herramienta en sus desplazamientos y por tanto, no mecanizando en ellos. Simplemente cuando la herramienta se posiciona en un determinado punto, esta podrá desplazarse perpendicularmente realizando orificios o taladros. Por norma general emplea un control de trayectoria de tipo punto a punto como se comentó anteriormente.

- **Sistemas de control de 1 eje:** máquinas compuestas hasta de tres ejes, pudiendo solamente la herramienta o la mesa de trabajo desplazarse a lo largo de un único eje debido a las limitaciones que presenta el interpolador. Este tipo de control puede considerarse como sinónimo de las máquinas paraxiales.
- **Sistema de control de 2 ejes:** se trata principalmente de máquinas que son capaces de desplazar la herramienta a lo largo de dos ejes, siendo el caso de un torno, en el cual la herramienta puede desplazarse paralelamente al eje de giro de la pieza, perpendicularmente a este o en ambas direcciones simultáneamente gracias a interpolaciones entre ambos ejes.
- **Sistemas de control de 2.5 ejes:** en este caso la máquina-herramienta posee hasta tres ejes, no pudiendo desplazarse simultáneamente a lo largo de ellos. En otras palabras, el interpolador de la máquina solamente podrá controlar el movimiento a lo largo de un único plano, ya sea X-Y, X-Z o Y-Z, de tal forma que una vez alcanzado un determinado punto en dichos planos, la herramienta podrá desplazarse perpendicularmente a ellos. Este tipo de máquina suele emplearse en fresadoras, máquinas de electroerosión y de corte por láser entre otras.
- **Sistemas de control de 3 ejes:** al igual que en el caso anterior la máquina-herramienta posee tres ejes, con la excepción de que en este caso podría desplazarse la herramienta simultáneamente por los tres ejes gracias al interpolador que posee. Como consecuencia de ello, podrán generarse movimientos con trayectorias 3D, siendo muy ampliamente utilizado en la industria en forma de fresadoras o centros de mecanizado.
- **Sistemas de control de 4 y 5 ejes o superior:** poseen básicamente tres ejes de traslación y dependiendo del número total de ejes, tendrán un único eje de rotación como en el caso de las máquinas de 4 ejes o hasta de dos ejes de rotación en el caso de las de 5 ejes. En estos casos dependiendo de la configuración cinemática de la máquina, las posibles rotaciones podrán ser llevadas a cabo por la mesa de trabajo, la herramienta o ambas. Por norma general, este tipo de máquinas pueden reproducir cualquier tipo de superficie, traduciéndose en un menor tiempo de mecanizado necesario frente al resto de tipos, en parte por el bajo número de amarres empleados para la fabricación. Además, debido a su cinemática poseen una mayor facilidad para el acceso a cajeados o geometrías complejas, pudiendo estar siempre la herramienta en contacto con la pieza durante los movimientos, lo que aumenta el tiempo de vida de esta.

### 3.4. COMPONENTES MAQUINA-HERRAMIENTA

Con el objetivo de tener un mayor conocimiento sobre la anatomía de las máquinas-herramientas, así como facilitar la comprensión del proyecto, se describirán a continuación cada una de las partes o componentes que podemos llegar a encontrar en un centro de mecanizado [3], siendo la mayoría de ellas extrapolables a los diferentes tipos de máquinas existentes.

Para ello, se enumeraran las distintas partes como podemos ver en las figuras siguientes, siendo posteriormente descritas en detalle.



**Figura 15.** Componentes máquina CNC

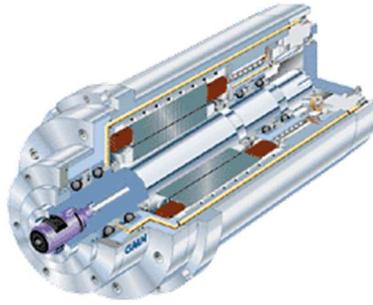
- **Panel de control [1]:** se constituye como la interfaz de comunicación entre usuario y máquina-herramienta, existiendo una bidirección de la información, ya sea por los datos aportados por parte de la propia máquina en lo que a parámetros de corte e información de las herramientas respecta, así como de las instrucciones dadas por parte del usuario.

Es por ello que es considerado como el cerebro de la máquina, ya que en el existe la posibilidad de almacenar todos los programas de mecanizado, realizar la propia modificación de los mismos e incluso la programación de forma manual de estos. Además, otras de las funciones que alberga relacionadas con los parámetros de mecanizado, es la posibilidad del control de los movimientos y acciones tales como operaciones de interpolación, graduación de la velocidad de corte, avance, potencia e incluso el sentido de arranque del husillo, comienzo-parada del mecanizado, ubicación/almacenaje de las herramientas de corte...

Así pues, como podemos ver es un elemento esencial para cualquier máquina-herramienta, siendo hoy en día formado por una gran pantalla donde se plasma la información y una botonera para el control de las diferentes funciones de la máquina. En el caso de las antiguas máquinas de CN, ciertas de las funciones descritas no aplicarían, siendo el panel de control un conjunto de botones y palancas para el control manual de la misma.

- **Husillo [2]:** elemento electro-mecánico compuesto principalmente por un motor eléctrico y un conjunto de cojinetes ubicados de forma concéntrica en el, de tal forma que por el interior de estos se encuentra alojado el eje mecánico encargado de llevar a cabo el movimiento de rotación, teniendo como función principal la transmisión del movimiento a la herramienta de corte. Para llevar a cabo la sujeción de la herramienta con respecto al

husillo, son empleados varios elementos mecánicos tales como el portaherramientas y los anillos o pinzas de sujeción.



**Figura 16.** *Sección husillo*

Además de la función comentada, otra de las funciones asociadas frecuentemente a este componente es su posible desplazamiento total a lo largo de la dirección Z e incluso su pivotamiento. Estas funcionalidades dependerán principalmente de la configuración de la máquina, encontradas frecuentemente en centros de mecanizado y en fresadoras.

En el caso de los tornos, el funcionamiento del husillo es prácticamente idéntico, salvo que en lugar de rotar la herramienta, se produce la rotación del material a mecanizar, no teniendo asociado ningún movimiento de traslación. En su extremo no poseerá ningún elemento mecánico como portaherramientas, sino unas mordazas o plato de sujeción para el agarre del material a mecanizar.

Con respecto a las condiciones de trabajo del husillo, estas son reguladas por la normativa [8] de Máquinas eléctricas rotativas, UNE-EN 60034-1. En dicha normativa es especificada la codificación para expresar la carga a la que puede ser sometido el motor eléctrico, en nuestro caso el husillo, incluyendo los periodos de arranque, frenado, funcionamiento en vacío y en reposo, así como las duraciones y secuencias en tiempo admisibles.

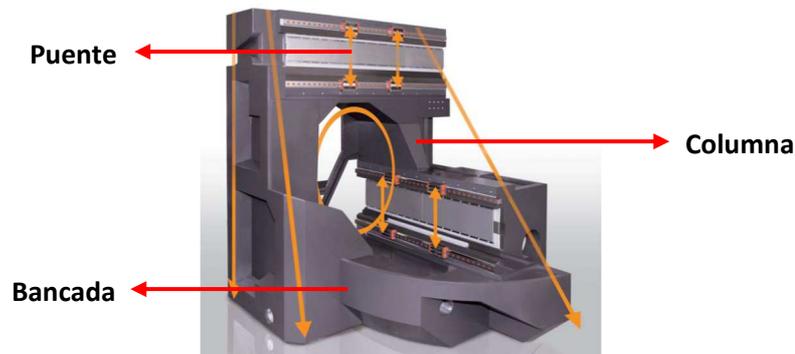
Así pues, según dicha normativa el servicio se podría clasificar en 10 diferentes tipos, los cuales van desde el S1 al S10. En nuestro caso, al tratarse del motor eléctrico empleado para el husillo, los dos servicios tipo mayoritariamente usados en máquinas de CNC son S1 y S6, cuya definición es:

- **Servicio tipo S1 – Servicio continuo:** permite el funcionamiento con carga constante y máxima durante un tiempo suficiente para que se establezca el equilibrio térmico, es decir, puede operar continuamente al máximo a pesar de llegar a alcanzar la temperatura máxima.
- **Servicio tipo S6 – Servicio ininterrumpido periódico con carga intermitente:** en este caso se trata de poder operar de forma continuada con la excepción de no poder trabajar a carga constante máxima, es decir, hay que alternar estados de carga máxima y en vacío. Alcanzada la máxima temperatura se deberá de iniciar un estado en vacío durante un determinado intervalo de tiempo hasta que la temperatura decrezca. O bien se puede trabajar con una carga alejada de la máxima pero de forma constante, no alcanzando la temperatura máxima.

Esta nomenclatura suele ir acompañada de un tanto por ciento que es conocido como factor de marcha, por ejemplo S6 40% ED. El significado del factor de marcha se trata del tanto por ciento de tiempo de un ciclo de servicio de 10 min, salvo que se especifique otros valores, en el que podrá la máquina estar funcionando a máxima potencia, de tal forma que el tanto por ciento restante del ciclo de servicio representa el tiempo que deberá de estar en reposo. El estar en reposo no conlleva parar la máquina por completo, sino realizar ningún trabajo de corte, pudiendo llevar a cabo cambios de herramienta o desplazamientos de la misma.

En caso de no llegar a operar al máximo de potencia, repito, la máquina podrá trabajar de forma continuada para un determinado valor de potencia alejado del máximo al no llegar a alcanzar la temperatura máxima.

- **Estructura [3]:** cuerpo sobre el cual se sustentan cada uno de los componentes de la máquina, pudiendo estar compuesta de diversas partes tales como bancada, columna y/o puente, dependiendo de la configuración física de esta.



**Figura 17.** Estructura máquina Mikron HSM 400U

Dichos componentes desempeñan un papel fundamental en la precisión, calidad y repetitividad de la fabricación, al aportar la rigidez y el amortiguamiento suficiente para ello. Como consecuencia, para lograr bajas vibraciones y distorsiones térmicas se suele recurrir a la fabricación de la estructura mediante un elevado número de uniones, ya sea de forma atornillada o mediante resinas, además de emplear materiales con matriz polímero o hierros fundidos.



**Figura 18.** Raíl carro máquina CNC

En este elemento encontraremos también los raíles o guías sobre los cuales se desplazan tanto la mesa de trabajo como el carro del husillo, presentando diversas formas como colas de milano o raíles circulares entre otros, con el objetivo de obtener la mayor rigidez y precisión posible. Este tipo de elementos suelen estar fijados al cuerpo de la estructura

mediante resina y elementos atornillados para transmitir lo mínimo posible las fuerzas inerciales al conjunto.

- **Cambiador y cargador de herramientas [4]:** dispositivo encargado del remplazo de herramientas, así como del almacenaje de las mismas de forma automática. Pueden llegar a albergar hasta 200 herramientas según su diseño, pudiendo ser este con forma de carrusel, tambor o cadena.

Este tipo de dispositivo suele contar con palpadores de contacto o laser para el control de las herramientas, existiendo una comunicación directa con la computadora de la máquina para informar desde posibles variaciones en el ajuste o desgaste de las mismas, hasta de los parámetros dimensionales y de posición de estas.

En general, este tipo de tecnología ha supuesto un gran avance en el mecanizado, ya que permite reducir tiempos, así como aportar una mayor autonomía ante la no necesidad de contar con una persona para el cambio de las herramientas.

- **Herramienta de corte y portaherramienta [5]:** elemento con uno o varios filos de corte destinado a la remoción de material mediante procesos mecánicos basados en la diferencia de velocidad. Esta herramienta podrá presentar tantas configuraciones de dimensiones, geometría y materiales como materiales y geometrías a mecanizar existan. Es por ello, que existe una gran variedad de herramientas, clasificadas desde la operación a realizar hasta la configuración física de la misma, siendo explicadas en detalle en el apartado 3.5.



**Figura 19.** Tipos de portaherramientas

Destacar también que la unión entre herramienta y máquina se lleva a cabo mediante el portaherramientas, dispositivo mecánico al cual se fija la herramienta y este a su vez al husillo de la máquina. La unión entre el portaherramientas y la herramienta puede producirse bien por fijaciones atornilladas, como pinzas de sección variable, hasta por presión hidráulica o dilataciones térmicas, siendo este último mecanismo aquel de mejor resultado en el mecanizado de alta velocidad.

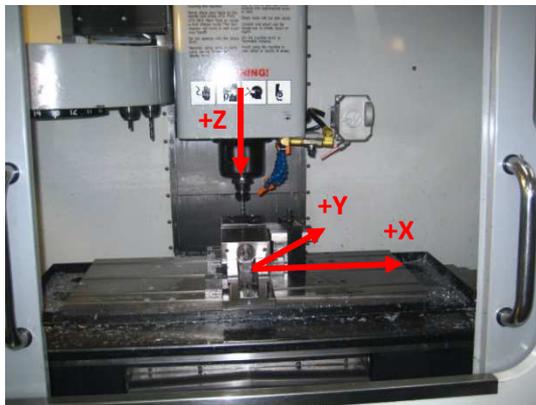


**Figura 20.** Portaherramientas y pinza de sujeción

En el lado opuesto, la unión entre portaherramientas y husillo se realiza principalmente mediante el enclavamiento de una serie de pestañas e inmovilización mecánica del tentón ubicado en el extremo opuesto del portaherramientas por parte del husillo.

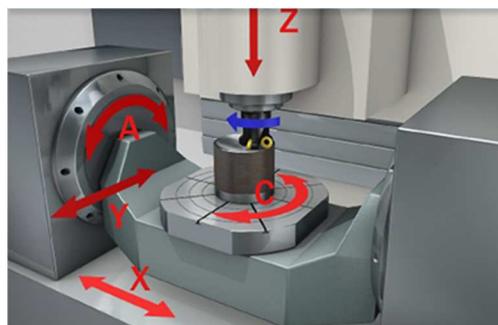
- **Mesa de trabajo [6]:** conjunto de elementos mecánicos encargados tanto de la sujeción del material a mecanizar, así como de la translación y/o rotación del mismo. Así pues, dependiendo de la configuración de la máquina, estos podrán ser principalmente de dos tipos.

Por un lado, en el caso de las fresadoras CNC las mesas de trabajo se caracterizan por poseer la capacidad de realizar movimientos traslacionales y no rotacionales. En este caso, los movimientos se producirán a lo largo del eje X e Y, aportando el movimiento en Z el cabezal del husillo, pudiendo ser atribuido también a la mesa.



**Figura 21.** *Movimientos mesa de trabajo fresadora CNC*

Por otro lado, en el caso de los centros de mecanizado de 5 ejes la mesa de trabajo puede tener la capacidad de realizar los movimientos traslacionales de las fresadoras, así como las posibles rotaciones de la misma, a lo largo del eje A, B y/o C, aunque tales rotaciones podrían también realizarlas el cabezal de la máquina. A continuación mostramos una de las posibles configuraciones de los movimientos de la mesa de trabajo para máquinas de 5 ejes.



**Figura 22.** *Movimientos mesa de trabajo máquina 5 ejes*

Antes de continuar, hemos de aclarar que la mesa de trabajo solo está presente en fresadoras y centros de mecanizado, ya que en el caso de los tornos, la mesa de trabajo es el plato de garras encargado de la sujeción de la pieza, la cual como ya se ha comentado producirá la rotación continua de esta y no de la herramienta.

Debido a la dificultad para la observación del resto de componentes en la figura 15, estos serán citados a continuación y acompañados de su representación pertinente:

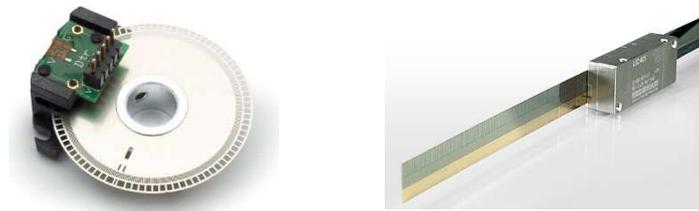
- **Servomotor:** motor eléctrico utilizado para la transferencia de movimiento a los carros del husillo y mesa de trabajo, transformando su movimiento rotatorio en lineal gracias a un tornillo sin fin.



**Figura 23.** Servomotor CNC

La principal característica de este tipo de motor reside en su capacidad para controlar tanto su velocidad como posición, siendo ubicados uno por cada eje de rotación y/o translación que posea la máquina. Así pues, las características diferenciadoras entre los servomotores se basan tanto en su precisión posicional, como en el rango de velocidades que posee, siendo más caro contra mayor sean estas.

- **Encoders:** también conocidos como sensores de posición, se tratan de dispositivos encargados de la transducción del movimiento lineal o rotatorio de una escala en señales eléctricas.



**Figura 24.** Encoder circular y lineal

Así pues, estos dispositivos se componen básicamente de reglas lineales o circulares las cuales se encuentran graduadas o codificadas para cada posición, de tal forma que mediante la lectura de las mismas se puede saber la posición exacta o la translación sufrida por los carros.

Según como se ha comentado, en el caso de que las reglas se encuentren graduadas se realizará una medición incremental y en caso contrario, absoluta. Además de ello, si el lector acompaña al movimiento del carro, el encoders será de medición directa y de lo contrario, indirecto, siendo mayormente este de menor precisión.

### 3.5. TIPOLOGIA HERRAMIENTAS DE CORTE

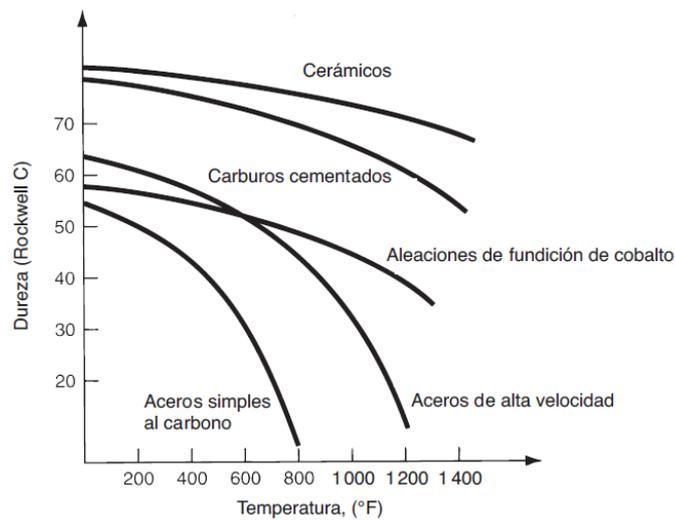
Al igual que la máquina, las herramientas de corte juegan un papel fundamental en las operaciones de mecanizado, de tal forma que la correcta elección de la misma será un elemento clave con el objeto de evitar posibles roturas, desgastes avanzados o mecanizados no óptimos.

Así pues, antes de describir cada tipo, hemos de destacar que se entiende por herramienta aquel elemento con uno o varios filos de corte encargados de la remoción de material, siendo definida básicamente una herramienta a partir del tipo de operación a realizar, dimensiones, configuración geométrica y material de la misma. Con respecto a los parámetros de corte idóneos, estos serán aportados por parte del fabricante o de la experiencia, teniendo en cuenta todas las variables anteriormente mencionadas.

En nuestro caso, debido al gran abanico de información existente citaremos aquellas variables determinantes a considerar a la hora de seleccionar una herramienta [2,3], siendo estas las citadas a continuación.

### 3.5.1. Material

La herramienta es aquel elemento del mecanizado sometido a grandes esfuerzos mecánicos, altas temperaturas y elevados desgastes, de tal forma que la correcta elección del material de la misma será un elemento a tener muy en cuenta, ya no solo respecto al mecanizado sino por seguridad y economía también.



**Figura 25.** Relación dureza según temperatura y material

Principalmente, toda herramienta deberá de presentar una serie de características básicas, estando estas generalmente condicionadas por el material de la pieza a mecanizar. Así pues, es esencial que toda herramienta presente cierta dureza a elevadas temperaturas con objeto de que no se produzcan deformaciones plásticas de la misma, no perdiendo su forma geométrica, ni filos de corte ante tal temperatura. Además de ello, ha de soportar cambios bruscos de temperatura generados por el corte interrumpido del mecanizado, evitando dilataciones térmicas no deseadas.

Por otro lado, debe poseer cierta tenacidad, ya que al producirse interrupciones en las operaciones de mecanizado, esta ha de soportar grandes vibraciones a consecuencia del impacto mecánico generado al comenzar de nuevo a mecanizar. Por último, destacar la resistencia al desgaste y a reacciones químicas en el sentido de evitar cualquier posible reacción de adhesión y difusión.

Es por ello, que para responder a cada una de estas variables han sido desarrollados herramientas de corte de diversos materiales, ajustándose estas al tipo de material a mecanizar. Los materiales que encontramos son:

- **Aceros de alta velocidad:** conocido por las siglas HSS (High Speed Steel), se tratan de aceros altamente aleados cuyo nombre proviene de poder mecanizar a elevadas velocidades en comparación con los antiguos aceros al carbono empleados. Se caracterizan por poseer buena resistencia al desgaste, buena tenacidad en mecanizados con interrupciones y grandes ángulos de ataque, además de ser relativamente económicos. Sin embargo, su principal limitación es el no poder emplearse a elevadas velocidades de corte debido a la pérdida de su resistencia ante altas temperaturas.

Suelen alearse principalmente con molibdeno o tungsteno entre otros, existiendo la posibilidad de recubrir estas herramientas de corte con una capa dura de óxido negro o someterlos a tratamientos térmicos de endurecimiento para mejorar su desempeño. Finalmente, comentar que su principal aplicación se encuentra en herramientas tales como brocas, terrajas, fresas y escariadores

- **Aleaciones de cobalto fundido:** se trata de una fundición cuyos principales aleantes son el cobalto, cromo y tungsteno en el orden nombrado. Poseen unas propiedades intermedias entre los aceros rápidos y las herramientas de metal duro, es decir, son capaces de mecanizar a una velocidad de corte superior a las herramientas de HSS, pero por contra presentan una mayor tenacidad que los carburos, no tan buena como la de los aceros rápidos.

En consonancia, se suelen emplear en operaciones de desbaste que conllevan mecanizados profundos y continuos, con avances y velocidades de corte relativamente altas, empleadas principalmente para la retirada de grandes cantidades de material. Sin embargo, debido a que ha sido un material ampliamente superado por los carburos, no ha sufrido un gran desarrollo y por tanto no presenta costo competitivo alguno.

- **Carburos:** con el objetivo de obtener herramientas de prestaciones superiores a las de acero rápido o a las aleaciones de cobalto fundido, fueron desarrollados diferentes materiales englobados todos ellos por la pareja formada de carburo de tungsteno más metal, incluyendo también el binomio formado por materiales cerámicos y metal, conocidos como cermets. Así pues, los principales materiales que encontramos dentro de este grupo son:

- **Carburos cementados:** también conocidos como metal duro, se caracterizan por estar formados por carburo de tungsteno más cobalto como aglutinante, pudiendo llegar a presentarse otros compuestos como carburo de titanio y de tantalio.

El carburo de tungsteno se presenta como un material de gran dureza, alta conductividad térmica y baja dilatación térmica en detrimento de una ductilidad muy baja, lo cual obliga recurrir a la metalurgia de polvos para la fabricación de estas herramientas. Aquí aparece el cobalto, elemento empleado como aglutinante, el cual se caracteriza por aportar una mayor tenacidad, a costa de una cierta pérdida de la dureza.

Se observó en su aplicación que el comportamiento presentado era a medias el deseado, es decir, velocidades de corte mayores con la excepción de un desgaste prematuro de la herramienta al mecanizar materiales de acero. Como consecuencia, tras largos estudios, se descubrió que la adición de TiC y TaC sobre la base de WC-Co aumentaba la resistencia y por consecuencia retardaba la velocidad de desgaste, propiciando la división de los carburos cementados en dos grupos, unos compuestos por WC-TiC-TaC-Co para el mecanizado de aceros y otros por WC-Co para materiales no acerosos.

Así pues, profundizando principalmente en este último grupo, la composición de cobalto presente en la herramienta afectará al comportamiento de la misma, ya que grandes cantidades de cobalto harán que está presente una mayor tenacidad y por ende, resistencia a la fractura pudiendo realizar desbastes burdos. Sin embargo, baja cantidad de cobalto hará que la herramienta tenga una gran dureza, siendo apta para operaciones de acabado.

Así pues, teniendo en cuenta la división de las herramientas de metal duro en dos grupos y el comportamiento de las mismas en función de la concentración de cobalto, se han creado algunas clasificaciones en función del material a mecanizar y de la composición de las herramientas, siendo estas el sistema de grados C de ANSI y el sistema ISO 513:2014.



Figura 26. Clasificación herramientas metal duro

Este sistema de clasificación último se divide en 6 grupos de materiales para la herramienta, cada uno propio para la mecanización de un material determinado, estando subdividido a su vez un mismo grupo en función de la tenacidad o dureza del material.

- **Cermet:** se caracteriza por la combinación de partículas de material cerámico en una matriz metálica. Generalmente se encuentran compuestos de combinaciones de TiC, TiN o TiCN (Carbonitruro de titanio) más un aglutinante que puede ser níquel y/o molibdeno, siendo excluidos principalmente el carburo de tungsteno en su composición.

Esta composición aporta a la herramienta una gran dureza y como consecuencia, la capacidad de mecanizar a muy altas velocidades, superiores a los de los carburos cementados, aplicándose principalmente en operaciones de acabado y semiterminado

de aceros y fundiciones de hierro. Sin embargo, debido a su elevado costo y fragilidad no han sido muy extendidas.

- **Carburos recubiertos:** con el objetivo de aportar a las herramientas una mejora en sus propiedades relativas a una mayor resistencia al desgaste, al agrietamiento y a una mayor dureza en caliente, se llevaría a cabo el recubrimiento de las herramientas en las zonas de corte y próximas, mediante la deposición de una o varias finas capas delgadas de material como carburo de titanio, nitruro de titanio y/u óxido de alúmina sobre una base de carburo cementado. Este recubrimiento es realizado mediante las técnicas de deposición química de vapor (CVD), o bien, mediante la deposición física (PVD).

Este tipo de herramientas, se emplean principalmente en operaciones de mecanizado de hierro y acero fundidos donde las velocidades de corte son muy altas y las interrupciones del mecanizado apenas existen, ya que al presentar cierta fragilidad, tienden a desconcharse con facilidad en operaciones severas, siendo preferible en estos casos emplear herramientas sin recubrimiento.

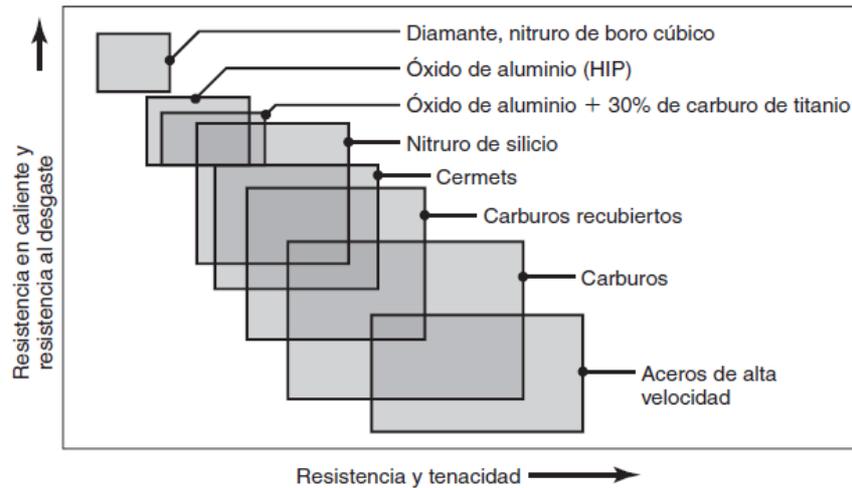
- **Cerámicas:** se trata de herramientas de gran dureza y durabilidad pero que presentan baja tenacidad, estando principalmente compuestas de polvos de alúmina (óxido de aluminio), los cuales son prensados a muy altas presiones para conformarlas y mejorar en la medida de lo posible su tenacidad. Además de emplear alúmina, se suelen emplear nitruro de silicio y carburo de titanio.

Como es de esperar, este tipo de herramientas se emplean en materiales de gran dureza como aceros e hierros fundidos a muy altas velocidades y pequeños avances, no siendo empleadas en operaciones bastas con grandes desbastes donde haya posibles impactos e interrupciones con el objetivo de evitar roturas de la herramienta.

- **Diamante sintético y nitruro de boro cúbico:** se presentan como las herramientas de mayor dureza, las cuales poseen ciertas limitaciones. En el caso del diamante policristalino sinterizado se genera a partir del prensado a muy altas presiones y temperaturas de polvos de cristal de diamante, siendo su principal aplicación en el mecanizado de alta velocidad de materiales no ferrosos, ni aceros, debido a la afinidad química existente entre el diamante y estos materiales, ya que ambos están compuestos de carbono.

Por otro lado encontramos el nitruro de boro cúbico, material empleado para cubrir las limitaciones del diamante sintético. Así pues, la técnica empleada para su fabricación es la misma que para el diamante sintético, presentando la diferencia de que al poseer una composición diferente a la del diamante, no reaccionara con el hierro, ni el acero, empleándose para la mecanización de dichos materiales y aleaciones de níquel.

A modo de resumen, es recogido en la gráfica siguiente el comportamiento de cada uno de los materiales con respecto a variables como la resistencia, tenacidad y desgaste entre otras.



**Figura 27.** *Propiedades mecánicas según material*

Se observa que dependiendo del material a mecanizar y por ende, de la temperatura alcanzada durante el mecanizado, se deberán de emplear unos materiales u otros. Por ejemplo, los aceros de alta velocidad serán idóneos para grandes desbastes broncos donde la temperatura de corte no sea muy elevada debido a su tenacidad y resistencia, siendo por el contrario, ampliamente empleado herramientas de carburo cuando la temperatura sea elevada y el material a mecanizar presente cierta dureza. El resto de materiales serán empleados en casos muy concretos debido a su alto coste y aplicabilidad, teniendo aplicación directa sobre la mecanización de materiales de gran dureza.

### 3.5.2. Configuración geométrica

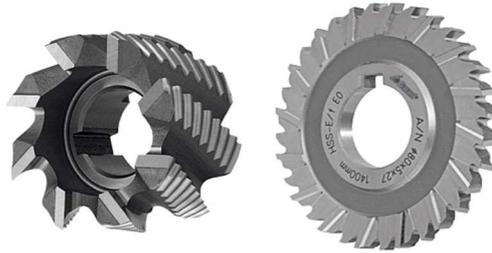
Para la definición completa de la herramienta no solo basta con el tipo de material de la misma, sino también de la forma geométrica que está presente, la cual determinará el tipo de operación de mecanizado a poder realizar. Así pues, una primera clasificación de las herramientas en función de su configuración sería según el número de filos de corte que presenten, existiendo dos grandes grupos: de un único filo y de múltiples filos de corte.

Dentro del primer grupo, identificamos operaciones básicas como el torneado, mientras que en el segundo encontramos el fresado y el taladrado, operaciones caracterizadas por llevarse a cabo mediante herramientas rotatorias. Debido a la amplia variedad de las configuraciones existentes, nos centraremos principalmente en el grupo de múltiples filos de corte, ya que serán estas las herramientas que nos encontraremos mayoritariamente en un centro de mecanizado, siendo además nuestro caso a estudiar.

Por lo tanto, a continuación será descrita las geometrías características de cada herramienta dentro de este grupo según su operación de mecanizado:

- **Fresado:** las herramientas empleadas en este tipo de operación se caracterizan por presentar filos de corte en su periferia y/o en su cara frontal según su aplicación. La ventaja que presenta respecto a las herramientas monofilas se basa en que no se calientan, ni se desgastan tanto, ya que el tiempo de mecanizado de cada filo de corte supone una pequeña fracción de la revolución completa de la herramienta.

Dentro de los diferentes tipos de fresas, encontramos herramientas con y sin mango, siendo este primer grupo mayoritariamente utilizado entre las máquinas de CNC, ya que las herramientas sin mango son empleadas principalmente en el mecanizado de grandes piezas debido a sus dimensiones.



**Figura 28.** Fresas sin mango

Comentar brevemente que las fresas sin mango requieren de sistemas de sujeción basados en ejes pasantes, de tal forma que dependiendo del tipo de fresa, necesitará sujeción a ambos extremos del eje o no, siendo el primer caso el detectado en la fresa de disco de la figura anterior. Esto limita en cierto sentido el control de movimiento de la fresa por parte de la máquina de CNC, problema no existente para la fresa de la izquierda de la figura, la cual a pesar de necesitar de un eje pasante por uno de sus extremos, puede ser implementada en una máquina de CNC con un control completo.

Debido a que en nuestro caso, la máquina está limitada para el mecanizado de pequeñas piezas y preferentemente el empleo de herramientas con mango, realizaremos hincapié dentro de este grupo, donde los diferentes tipos de fresas a encontrar serán las citadas a continuación:

- **Fresa esférica:** se caracteriza por presentar filos de corte dispuestos a lo largo de un contorno esférico o semiesférico, lo que le permite realizar operaciones de fresado radial, axial y mixto.



**Figura 29.** Fresa esférica

Es por ello que son empleadas en operaciones de desbaste y acabado de superficies con formas complejas (Superficies curvas), así como en menor medida en cajeados y perfilados donde se requiere que la esquina inferior entre las superficies perpendiculares presenten un determinado redondeo. Como consecuencia, son preferentemente empleadas en máquinas de 5 ejes donde se puede llegar a exprimir su geometría, no siendo idóneas para mecanizado de superficies rectas debido a las ondulaciones o crestas que genera.

- **Fresa tórica:** a diferencia de la fresa esférica, se trata de una fresa cilíndrica en la que el borde entre la parte inferior y la periférica de esta se presenta un determinado radio menor que el diámetro de corte de la herramienta.



**Figura 30.** Fresa tórica

Debido a esta geometría, este tipo de fresa es mucho mejor para el mecanizado de cajas o contornos, ya que además de tener una buena capacidad de penetración radial y axial, tiende a generar mejores acabados superficiales en el plano perpendicular al eje de revolución con respecto a la fresa esférica, pudiendo ser empleada por tanto en operaciones de planeado. Destacar también su capacidad para la generación de esquinas redondeadas, empleadas habitualmente en moldes.

- **Fresa plana:** herramienta similar a la fresa tórica con la peculiaridad de no presentar ningún radio en su borde inferior, lo que la hace idónea para operaciones de fresado con escasa penetración axial, estando diseñadas para aguantar principalmente fuerzas de corte perpendiculares al eje de revolución.



**Figura 31.** Fresa plana

Entre sus principales operaciones de fresado, destacamos el contorneado, planeado e incluso cajeados en los cuales previamente se ha realizado un orificio de entrada a los diferentes niveles. Por último, destacar la obtención de superficies de gran acabado con apenas ondulaciones, además de la generación de esquinas completamente rectas.

- **Fresa de ranurar:** herramienta caracterizada por poseer una geometría en T invertida, estando ubicados los filos de corte en toda su periferia (No hay filos de corte en la zona frontal), los cuales pueden estar inclinados o rectos.



**Figura 32.** Fresa de ranurar

Debido a su geometría, no puede realizarse operaciones de fresado axiales, solamente radiales, siendo empleada en operaciones que como su propio nombre indica de ranurado e incluso de contorneado.

- **Fresa cónica:** herramienta con forma de cono, cuyos filos de corte están ubicados en toda la periferia, zona donde encontramos profundas ranuras para la evacuación de la viruta. Su aplicación principal reside en la realización de avellanados.



**Figura 33.** Fresa cónica

- **Fresa angular:** al igual que la fresa anterior, esta presenta un cuerpo cónico invertido o no, donde encontramos un elevado número de filos de corte rectos. Su uso principal es la realización de ranuras con formas especiales como de cola de milano, así como operaciones de achaflanado de bordes.



**Figura 34.** Fresas angulares

- **Taladrado:** las herramientas de este tipo de mecanizado se caracterizan por ser empleadas solamente para la realización de agujeros cilíndricos, de tal forma que su forma geométrica se caracteriza en que la relación entre longitud y diámetro es elevada. Dependiendo de sí se trata de una operación de taladrado profunda, de ensanchamiento o de acabado, encontraremos una herramienta u otra, siendo estas las citadas a continuación.
- **Broca:** es la herramienta inicial a emplear cuando se realiza un agujero inicial debido a que al presentar un borde de ataque muy pronunciado, es decir, de gran ángulo de incidencia, la remoción de material será muy alta en comparación con otras herramientas como las fresas.



**Figura 35.** Broca helicoidal

Además de los filos de corte que presenta en su extremo, existen filos secundarios ubicados en la periferia de la herramienta sobre los bordes de las ranuras helicoidales con el objetivo de poder agrandar y obtener un cierto acabado superficial de los agujeros. Con respecto a las ranuras, éstas son principalmente empleadas para la evacuación de la viruta.

Destacar también, que este tipo de herramientas pueden poseer refrigeración interna, así como estar compuestas a base de plaquitas en su extremo, siendo empleadas principalmente para agujeros de gran diámetro y profundidad.

- **Mandril:** herramienta empleada para el ensanchamiento de agujeros, de tal forma que para llevar a cabo esta función su geometría se caracteriza por presentar un ángulo de incidencia mínimo, es decir, apenas encontramos filo de corte en la zona frontal, siendo más predominante en toda su zona periférica. Esto se debe a que como el agujero ya está realizado, simplemente hay que mecanizar las paredes laterales de este para agrandar el diámetro del taladro realizado.



**Figura 36.** *Mandril*

Habitualmente el número de filos de corte no suelen ser muy elevados, los cuales van desde un único filo de corte para diámetros pequeños hasta varios filos de corte para diámetros mayores. Generalmente, este tipo de herramientas se encuentran compuestas por plaquitas de corte como podemos observar en la figura anterior.

- **Escariador:** herramienta empleada para la obtención de óptimos acabados superficiales con ajustadas tolerancias dimensionales de los agujeros previamente realizados con brocas y mandriles. Así pues, su geometría se caracteriza por presentar un elevado número de filos de corte en toda su periferia, los cuales se encuentran ubicados alrededor de la herramienta de forma inclinada, recta o ligeramente helicoidal.



**Figura 37.** *Escariador*

Como es de esperar, apenas hay filos de corte en la zona frontal, siendo mayoritariamente fabricadas de forma enteriza como podemos observar en la figura anterior.

### 3.6. CONTROL NUMÉRICO COMPUTERIZADO

Surgió entre la década de los cuarenta y cincuenta el inicio de la tecnología de control de las máquinas-herramientas [9], componente principal para el desarrollo del mecanizado. Esto se llevaría a cabo gracias a la generación de un determinado lenguaje de programación, así como de los equipos que hacían posible su interpretación, siendo con el tiempo y el avance de las tecnologías evolucionado y extendido a nuevas formas, tales como impresoras 3D, máquinas de corte por láser, brazos robóticos... siendo hoy en día el resultado ello conocido como control numérico computarizado (CNC).

Dicha tecnología se fundamenta en los pilares del control numérico (CN), forma de automatización programable en las que las acciones mecánicas y funciones de una máquina-herramienta o equipo están controlados por un programa de códigos alfanuméricos, siendo capaz el sistema de interpretar tales instrucciones codificadas y transformarlas a su vez en señales eléctricas de salida para la realización de las operaciones.

Con respecto al termino computarizado, el cual aparece en el nombre de esta tecnología, es introducido en la década de los setenta gracias a la aparición de los microprocesadores, hecho que permitió que las máquinas dejaran de seguir ciegamente las instrucciones del código

programado, así como emplear nuevas formas de transferencia de información, dejando de emplear tarjetas o cintas perforadas, las cuales poseían grandes limitaciones con respecto al tamaño de los programas.

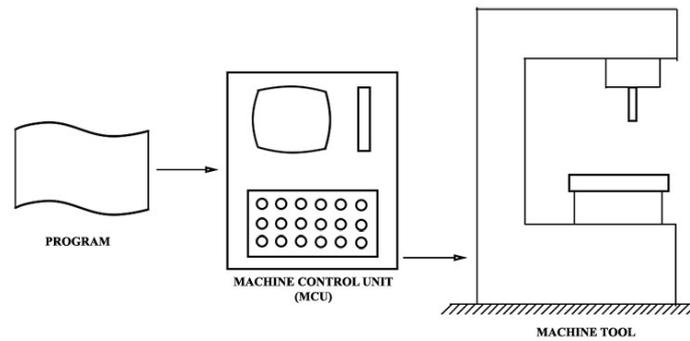
Por otro lado, este avance aportó a las máquinas la capacidad de calcular y realizar movimientos complejos, analizar trayectorias en busca de colisiones, controlar la vida de la herramienta, modificar el código en la propia máquina, comunicarse con el usuario y otras computadoras... En general, aportó una mayor eficiencia y flexibilidad en lo que respecta al proceso de programación del mecanizado.

### 3.6.1. Componentes sistema CNC

Desde la generación del programa de mecanizado hasta la fabricación de la pieza, encontramos una serie de elementos básicos los cuales constituyen el flujograma a seguir en un sistema de CNC [9], siendo estos elementos los citados a continuación:

- **Programa de instrucciones:** conjunto de órdenes codificadas en un determinado lenguaje alfanumérico requerido para el gobierno de la máquina y por tanto para la fabricación de la pieza. Dicho programa puede ser generado manualmente o mediante software de CAD/CAM y en lo que respecta al tipo de programación utilizada esta dependerá del tipo de controlador de la máquina, pudiendo ser código ISO, código APT o lenguaje conversacional propio del controlador.
- **Unidad de control de la máquina:** conocida también por las siglas MCU (Machine Control Unit), constituye el corazón del sistema del CNC ya que se encarga de las funciones principales:
  1. Lectura e interpretación del programa de instrucciones.
  2. Cálculo de interpolaciones, de tal forma que dependiendo del tipo de unidad podrán ser lineales, circulares y/o helicoidales.
  3. Control de la cinemática de la máquina para ejecutar los movimientos recogidos en las instrucciones, siendo estos conocidos como datos geométricos.
  4. Automatización de las funciones de no movimiento, tales como refrigerante, cambio de herramienta, revoluciones de esta... conocidos como datos tecnológicos.
  5. Análisis de la información recibida por parte de la máquina gracias a sensores y sistemas de posicionamiento.
- **Máquina-herramienta:** una vez transformada la información en señales eléctricas por parte de la MCU, la máquina-herramienta transformará tales señales en movimientos y acciones mecánicas, siguiendo de esta forma lo programado en el código.

En la figura siguiente podemos observar las diferentes partes que componen el sistema de forma esquemática y el orden cronológico seguido.

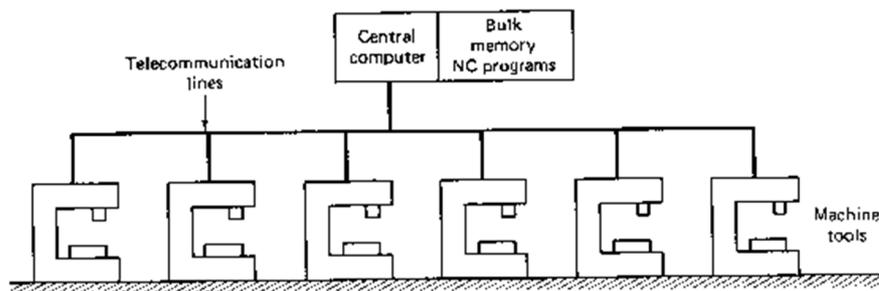


**Figura 38.** Elementos básicos del sistema de CNC

Profundizando en el control externo y en las formas de transferencia de los programas de mecanizado a las máquinas, encontramos que ante la necesidad de reducir tiempos improductivos y en algunos casos como en el control numérico (CN), los posibles errores humanos al introducir los programas, surgieron nuevas formas de control y de transferencia, entre las cuales encontramos,

- **Control Numérico Directo (DNC):** debido a que las máquinas de control numérico no poseían apenas memoria para el almacenaje de programas, se tenía que recurrir a métodos en los que el operario debía de introducir las instrucciones del programa de forma manual, estando sujeto esto a ciertos errores, o bien, se recurría a emplear ciertos medios como cintas perforadas, conllevando ambos casos pérdida de tiempo de producción y a la imposibilidad de controlar de forma múltiple varias máquinas-herramientas.

Ante esta situación y las limitaciones que presentaba el control numérico, surgía el Control Numérico Directo, metodología que permitía mediante un único ordenador con conexión directa a las máquinas-herramientas, transferir cada uno de los programas de mecanizado bloque a bloque, pudiendo controlar simultáneamente varias máquinas.



**Figura 39.** Control Numérico Directo

La forma de conexión entre las máquinas y el ordenador central se llevaría a cabo mediante conectores RS-232C, siendo el esquema básico a emplear el mostrado en la figura anterior. Finalmente, con la aparición de los microprocesadores el uso de esta metodología quedaría en desuso.

- **Control Numérico Distribuido (DNC):** a diferencia del control numérico directo, en este caso las máquinas-herramientas a controlar se caracterizan por ser máquinas computarizadas (CNC), es decir, máquinas con microprocesadores o computadoras

internas las cuales tendrían un mayor tamaño de memoria, siendo capaces de almacenar grandes programas de mecanizado, además de otras series de funciones.

Este sistema tiene la capacidad de poder controlar varias máquinas de CNC simultáneamente a partir de una única computadora, pudiendo transferir programas de forma completa y no bloque a bloque, editar programas de forma interna, gestionar directorios y versiones o incluso controlar la configuración propia de la máquina.



**Figura 40.** Control Numérico Distribuido

Con respecto a la forma de comunicación de este sistema existe la posibilidad de combinar simultáneamente conexiones vía LAN, Ethernet e incluso vía WI-FI, aportándole una mayor flexibilidad a la red de comunicación.

### 3.6.2. Programación mecanizado

Para desarrollar esta labor de programación del mecanizado en instrucciones codificadas existen dos posibles métodos, los cuales se extienden desde lo más rudimentario como la programación manual, hasta la generación automática de las instrucciones una vez diseñadas y definidas las operaciones en un software CAD/CAM.

El primer método se caracteriza por presentar ciertas limitaciones entre las cuales encontramos la necesidad de poseer un gran dominio del lenguaje de programación, un elevado tiempo para su realización y por tanto, un elevado costo. Además de ello, hemos de sumar la gran complejidad para la programación de operaciones que impliquen movimientos con más de dos variables dimensionales, es decir, mecanizados de superficies curvas.

Entre los lenguajes de programación empleados mayoritariamente encontramos el lenguaje APT (Automatically Programmed Tool), lenguaje caracterizado por el empleo de comandos formados por grupos de letras y números que suelen hacer referencia a reglas nemotécnicas para el conocimiento de su función. Este tipo de lenguaje además requiere de la definición previa de la geometría de mecanizado para la programación posterior de los movimientos de la herramienta.

Con respecto al otro lenguaje de programación universalmente extendido y normalizado, el código ISO se compone por comandos formados por una letra más números, de tal forma que cada conjunto de estos hacen referencia a determinadas funciones tales como el movimiento de la herramienta o parámetros de corte. Este lenguaje además no precisa de la definición previa

de la geometría, siendo menos intuitivo pero mucho más rápido de programar. Por último destacar, que el lenguaje APT es mayoritariamente generado por software CAD/CAM, siendo necesario su postprocesamiento posterior a código ISO u otros lenguajes conversacionales, como el lenguaje conversacional Heidenhain [10], siendo este nuestro caso.

Volviendo de nuevo a los diferentes métodos de programación, encontramos por otro lado el método de fabricación asistida por ordenador, método compuesto por el empleo de software CAD y CAM conjuntamente. Por un lado, el programa de diseño asistido por ordenador (CAD, Computer Aided Design), permite la creación de las representaciones gráficas de los objetos físicos en dos o tres dimensiones con el objetivo de obtener una idea general y de definir los parámetros dimensionales necesarios, facilitando así el proceso de fabricación gracias a los detalles a obtener.

Por otro lado de forma complementaria a la tecnología CAD, encontramos el programa de fabricación asistida por ordenador (CAM, Computer Aided Manufacturing), programa que permite el diseño de las operaciones de mecanizado, así como la traducción de las mismas en lenguaje alfanumérico para el control posterior de las máquinas, teniendo en cuenta las trayectorias diseñadas y los parámetros de corte definidos. Además, permite analizar las operaciones con el objetivo de estudiar el resultado final del proceso de fabricación, así como el movimiento de la herramienta ante posibles colisiones. Destacar que el empleo de este tipo de programa no se limita solamente al mecanizado, sino que también es empleado en impresoras 3D y brazos robotizados entre otras tecnologías.

Por lo tanto, con los programas CAD/CAM podremos llevar a cabo la fabricación de piezas complejas que conlleven el control de tres o más variables dimensionales simultáneamente, tales que de forma manual sería altamente complejo, reduciendo de esta forma el tiempo y el costo. Finalmente remarcar, que gracias a dicho método obtendremos una mayor flexibilidad en la fabricación al ser fácilmente posible modificar las operaciones y realizar su re-post procesado.

Paralelamente, suele emplearse software de verificación de programas postprocesados, los cuales van a ser introducidos en la máquina, ya que los programas CAD/CAM solo realizan una comprobación del movimiento diseñado en el programa, pero no del programa CNC obtenido. Así pues, con este tipo de programas podremos detectar posibles errores de sintaxis introducidos en la fase de postprocesamiento, siendo simulado el entorno de mecanización (máquina, herramienta y pieza). De esta forma evitamos en algunos casos, siempre y cuando el simulador recree fielmente la realidad, la necesidad de realizar pruebas en máquina con materiales blandos y a bajo avance, ahorrando en tiempo y costo.

### 4. MEDIOS DISPONIBLES

Expuesta toda la información relativa al mecanizado para facilitar la comprensión de los capítulos siguientes, hemos de destacar los diferentes medios de los cuales disponemos, ya que estos cuestionarán en gran sentido tanto el diseño de la pieza, así como las operaciones del mecanizado a realizar.

En cualquier proceso normal de mecanizado, el estudio y análisis de las herramientas disponibles y en menor medida de las máquinas, utillaje y preforma, supone una fase normal del mismo, siendo realizado habitualmente una vez obtenido el diseño de la pieza a fabricar y antes del diseño de las operaciones de mecanizado con el objetivo de saber cómo acometer el trabajo.

En lo que respecta a las herramientas, hoy en día se suele disponer de una base de datos detallada donde es recogida cada una de ellas con sus correspondientes geometrías con el objetivo de ahorrar tiempo al no tener que programarlas en el software CAD/CAM constantemente, además de saber cuáles se posee. Así pues, durante el diseño de las operaciones se estudiaría la viabilidad de poder emplear una herramienta u otra, recurriendo a la compra de alguna si fuera necesario.

En nuestro caso el orden es invertido, es decir, primero realizaremos el estudio de los medios disponibles (herramientas, utillaje, preforma y máquina) para posteriormente modelar la pieza a fabricar. Los motivos por los cuales se invierte el orden se deben a que es la primera vez que se realiza un catálogo de herramientas para la máquina a emplear, no conociendo cuales se posee. Por otro lado, el segundo y principal motivo es por el hecho que se busca evitar costos ante la necesidad de compra de nuevas herramientas, intentado ajustar la geometría de la pieza a las características dimensionales de las herramientas que se posee, además de a las dimensiones de la preforma y en menor medida de la máquina.

Es por ello que a continuación son recogidas cada una de las herramientas existentes en el taller, el utillaje que se posee para la máquina a emplear, las dimensiones y material de la preforma a usar, así como las características tanto geométricas como cinemáticas de la máquina.

#### 4.1. HERRAMIENTAS

Teniendo en cuenta lo anterior, es decir, la influencia de las herramientas disponibles sobre la geometría de la pieza a diseñar, hemos recogido cada una de las presentes en el taller en una base de datos, teniendo en cuenta tanto sus dimensiones, como su composición a una variable de gran importancia para la realización del mecanizado según como se explicó en el apartado 3.5.

La construcción de la base de datos de las herramientas ha sido llevada a cabo directamente en Catia V5, gracias a la información obtenida del fabricante al poseer la herramienta un código identificativo, o bien, mediante la medida con el pie de rey de cada una de sus dimensiones.

Para la creación de la base de herramientas en Catia V5 se ha seguido un proceso relativamente sencillo. Primeramente, se ha de seleccionar cualquiera de las bases de herramientas que trae por defecto Catia en su carpeta *tools* y copiarla en cualquier directorio fuera del dominio de Catia para poder manipular dicha base de datos. Seguidamente se realizará la apertura del fichero, donde encontraremos cada una de las herramientas que posee el catálogo y eliminaremos cada una de ellas con el objetivo de rellenar posteriormente dicha base con nuestras propias herramientas.

Reference	Keywords	Preview	Generative Data						
MFG_NAME_BAS	MFG_NAME	MFG_TOOL_NUMBER	MFG_NOMINAL_DIAM	MFG_OVERALL_LGTH	MFG_CORNER_RAD	MFG_LENGTH	MFG_CUT_LENGTH	MFI	
1	MfgDrillTool	Drill_Diam12	1	12mm	120mm	80mm	75mm	12m	
2	MfgDrillTool	Drill_Diam10	2	10mm	100mm	80mm	75mm	10m	
3	MfgDrillTool	Drill_Diam08	3	8mm	90mm	80mm	75mm	8mi	
4	MfgDrillTool	Drill_Diam07	4	7mm	80mm	75mm	50mm	7mi	
5	MfgDrillTool	Drill_Diam06	5	6mm	80mm	75mm	50mm	6mi	
6	MfgTapTool	Tap_M6	6	6mm	60mm	55mm	50mm	6mi	
7	MfgTapTool	Tap_M8	7	8mm	60mm	55mm	50mm	8mi	
8	MfgTapTool	Tap_M10	8	10mm	60mm	55mm	50mm	10m	
9	MfgTapTool	Tap_M12	9	12mm	60mm	55mm	50mm	12m	
10	MfgEndMillTool	Flat_End_Mill_Diam10	10	10mm	80mm	0mm	70mm	10m	
11	MfgEndMillTool	Flat_End_Mill_Diam14	11	14mm	80mm	0mm	70mm	14m	
12	MfgEndMillTool	Flat_End_Mill_Diam20	12	20mm	100mm	0mm	80mm	20m	
13	MfgEndMillTool	Bull_nose_83_R10	13	83mm	100mm	10mm	60mm	45m	
14	MfgEndMillTool	Bull_nose_32_R08	14	32mm	100mm	8mm	60mm	32m	
15	MfgEndMillTool	Ball_nose_20	15	20mm	100mm	10mm	60mm	20m	
16	MfgEndMillTool	Ball_nose_10	16	10mm	100mm	5mm	60mm	10m	
17	MfgEndMillTool	Ball_nose_05	17	5mm	100mm	2.5mm	60mm	5mi	
18	MfgEndMillTool	Ball_nose_02	18	2mm	100mm	1mm	60mm	5mi	
19	MfgEndMillTool	Flat_End_05	19	5mm	100mm	0mm	60mm	5mi	

Figura 41. Herramientas por defecto en catálogo

Eliminadas todas ellas, abrimos la interfaz de mecanizado de Catia y seleccionamos una herramienta cualquiera con la salvedad de que la herramienta que seleccionemos sea del mismo tipo que la herramienta que queremos introducir, es decir, si queremos introducir una herramienta de planear, se seleccionará una herramienta cualquiera del grupo *Face mill*. El objetivo de esto, consiste en que la herramienta que vayamos a introducir se encuentre posteriormente clasificada dentro de dicho grupo, así como que disponga de los parámetros dimensionales necesarios para su definición.

Seguidamente, del campo de *ResourcesList* encontraremos colgando la herramienta previamente seleccionada, de tal forma que al abrirla podremos modificar cada uno de sus campos a nuestro antojo.

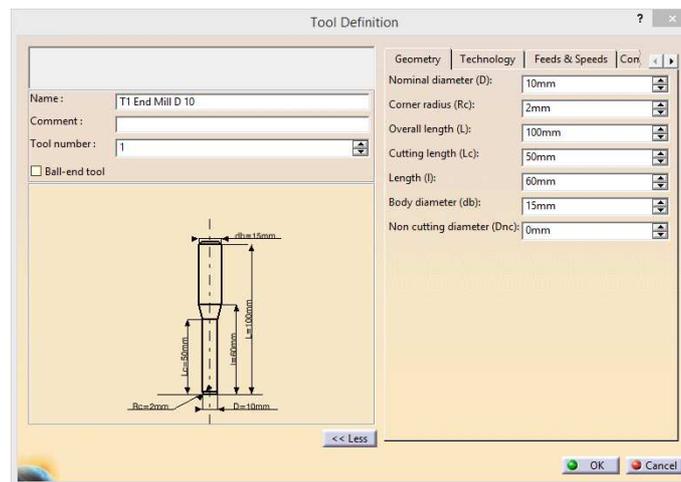


Figura 42. Configuración herramienta

Modificada la herramienta, simplemente deberemos de almacenarla en el catálogo que previamente hemos vaciado, siendo esto realizado pulsando el botón secundario del ratón sobre la herramienta modificada que cuelga de *ResourceList* y siguiendo la siguiente ruta: *NC Resources > Send to Catalog...* posteriormente seleccionamos el catálogo modificado, siendo marcada la pestaña *Update an existing catalog*.

De esta forma, conseguiremos ir almacenando una herramienta detrás de otra y actualizando la base de datos. Con este método nos serviremos de la interfaz que aporta Catia para la entrada de las variables dimensionales de las herramientas, el cual se caracteriza por ser intuitivo al poder visualizar las variables dimensionales directamente sobre la herramienta mostrada. Esto supone una gran ventaja con respecto a otros métodos, ya que por otros deberíamos de rellenar una determinada hoja de Excel donde las variables a tener en cuenta no poseen una descripción o nombre intuitivo, siendo ahorrada esta complejidad con nuestro método.

Finalmente, para poder visualizar esta base de herramientas una vez creada en Catia durante el diseño de las operaciones de mecanizado, deberemos de copiar el catálogo modificado en la carpeta de Catia llamada *Tools*, aceptando los diferentes permisos de administrador necesarios. En caso de que esto no se realice, no se podrá visualizar la base de herramientas y por ende, en caso de querer modificarla deberemos de nuevo extraer el catálogo del dominio de Catia, realizar las modificaciones pertinentes y volverlo a introducir en la carpeta mencionada.

Con respecto a nuestro catálogo formado por las herramientas disponibles en el taller para la máquina Mikron HSM 400U, encontramos un total de 17 herramientas. La mayoría de ellas son fresas esféricas y toroidales, además de fresas planas, de ranurar, de avellanar y brocas helicoidales, toda ellas en diferentes tamaños y materiales. Debido a que hay herramientas de diferentes fabricantes, encontramos un cierto número de herramientas muy similares en lo que respecta a sus dimensiones.

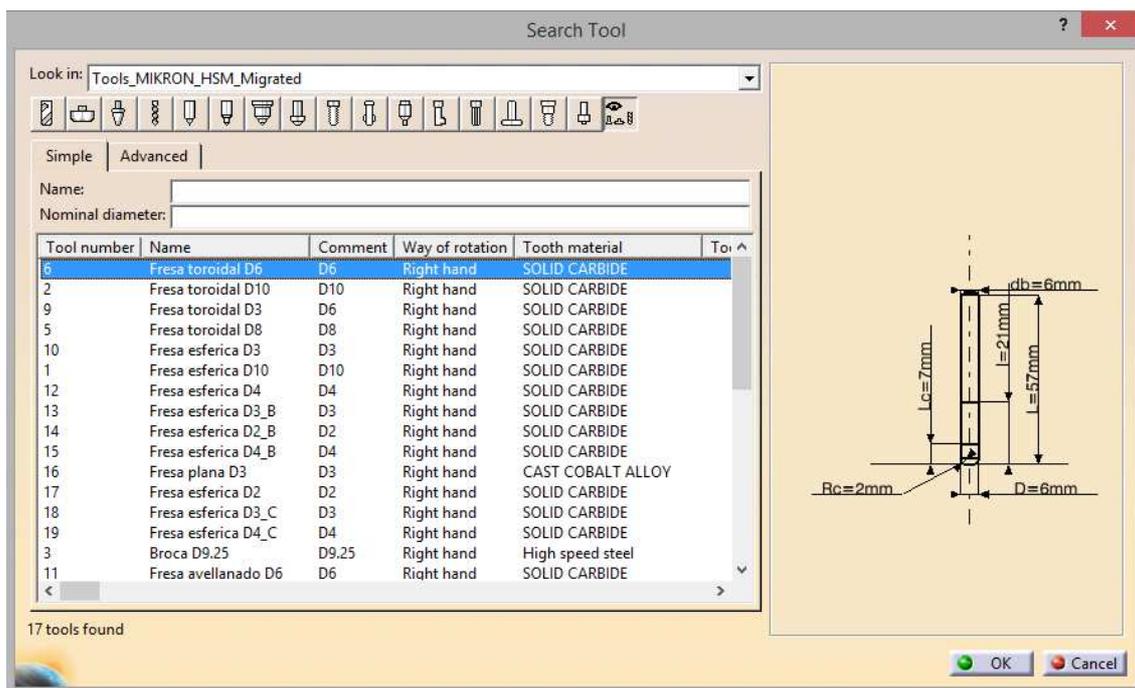


Figura 43. Catálogo herramientas para MIKRON HSM 400U en Catia V5

Debido a que no es posible observar en la figura anterior de forma completa las características principales de las herramientas, es mostrado en la tabla siguiente un breve resumen de ellas en la que encontramos su tipología, material y principales dimensiones.

Tabla 1. Base de herramientas

Nº herramienta	Tipología	Subtipo	Diámetro (mm)	Longitud de corte (mm)	Radio de corte (mm)	Material
1	Fresa	Semiesférica	10	13	5	Metal duro
2	Fresa	Toroidal	10	11	1.5	Metal duro
3	Broca	Helicoidal	9.25	81	n/a	HSS
5	Fresa	Toroidal	8	8	2	Metal duro
6	Fresa	Toroidal	6	7	1	Metal duro
7	Fresa	Ranurar	16.5	3	n/a	HSS
9	Fresa	Toroidal	3	4	0.3	Metal duro
10	Fresa	Semiesférica	3	6	1.5	Metal duro
11	Fresa	Avellanar	6	2.5	n/a	Metal duro
12	Fresa	Semiesférica	4	7	2	Metal duro
13	Fresa	Semiesférica	3	11	1.5	Metal duro
14	Fresa	Semiesférica	2	8	1	Metal duro
15	Fresa	Semiesférica	4	15	2	Metal duro
16	Fresa	Plana	3	8	n/a	Aleac. Cobalto
17	Fresa	Semiesférica	2	10	1	Metal duro
18	Fresa	Semiesférica	3	12	1.5	Metal duro
19	Fresa	Semiesférica	4	21	2	Metal duro

Apoyándonos en dicha información realizaremos el modelado o las modificaciones pertinentes para adaptar la pieza a diseñar a las herramientas, además de poder seleccionar la herramienta óptima para las operaciones de mecanizado. En lo que respecta a los parámetros de corte a emplear, estos podrán ser obtenidos directamente de la información aportada por el fabricante, o bien, como en muchos otros casos se recurrirá a experiencias o pruebas realizadas con herramientas similares bajo unas mismas condiciones.

Así pues, la información detallada pertinente a la geometría será recogida en el Anexo III, solo para las herramientas a emplear o de las que se hagan una especial mención en el proyecto.

## 4.2. MÁQUINA

Al igual que las herramientas, la máquina a emplear juega un papel fundamental tanto en el modelado del utillaje necesario, así como en el diseño de las operaciones de mecanizado y su posterior simulación en lo que respecta a las limitaciones de parámetros de corte o de movimientos de la mesa de trabajo y/o herramienta.

En nuestro caso, la máquina a emplear es una Mikron HSM 400U, la cual se caracteriza por presentar una cinemática basada en 5 ejes con un control continuo que le permite mecanizar formas complejas [11]. A todo ello, hemos de sumarle la capacidad de poder mecanizar a alta velocidad gracias tanto al potente husillo que posee, así como a las altas velocidades de avance y giro de la mesa de trabajo.

Profundizando en la cinemática de la máquina, la mesa de trabajo es la encargada de desarrollar el movimiento a lo largo del eje X e Y, mientras que el cabezal donde se encuentra el husillo vertical lleva asociado el movimiento a lo largo del eje Z. Con respecto a los giros, todos ellos son realizados por parte de la mesa de trabajo, teniendo esta la capacidad de girar 360° por

completo alrededor del eje Z mediante el control del giro C y de pivotar alrededor del eje Y mediante el giro B. Ahora bien, el giro en C no posee limite, es decir, puede girarse cuanto se quiera y en cualquier dirección. Sin embargo, en el caso del giro en B este se encuentra limitado, ya que no podrá girarse más de  $20^{\circ}$  en sentido positivo, debiendo predominar los giros negativos en B al tener el límite en dicha dirección en  $-110^{\circ}$ . Esta información relativa a los posibles movimientos es de gran importancia como podremos ver en capítulos siguientes, siendo directamente utilizada en lo que respecta a la generación de postprocesadores y análisis del código.

**Tabla 2. Parámetros cinemáticos MIKRON HSM 400U**

<b>Desplazamientos y giros</b>	
Desplazamiento longitudinal X total (mm)	500
Desplazamiento lateral Y total (mm)	240
Desplazamiento vertical Z total (mm)	360
Rango giro B ( $^{\circ}$ )	-110 / +20
Rango giro C ( $^{\circ}$ )	n x 360 $^{\circ}$
<b>Avances</b>	
Movimiento rápido en X, Y y Z (m/min)	60
Giro rápido en B (rpm)	165
Giro rápido en C (rpm)	250
<b>Husillo</b>	
Limitación del husillo	40% ED, S6
Velocidad de giro máximo (rpm)	30 000
Potencia (kW/Nm)	13.5 / 8.8

Antes de continuar, apoyándonos en la información aportada en el apartado 3.4 y en el campo de la tabla anterior sobre la limitación del husillo (40% ED, S6), podemos comentar que esta máquina ofrece un servicio de trabajo ininterrumpido periódico con carga intermitente, siendo su factor de marcha del 40%, es decir, podrá funcionar al máximo de su potencia, la cual se encuentra en 13.5 kW durante un tiempo máximo de 4 minutos seguidos de 6 minutos en vacío para reducir la alta temperatura alcanzada en el husillo. En caso de que no se llegue a trabajar a dicha potencia máxima, se podrá trabajar de forma continuada.

Además de la importancia que se posee todas las variables recogidas en la tabla 2, consideramos importante comentar las formas de sujeción que presenta la mesa de trabajo de cara a diseñar posibles utillajes. La mesa de trabajo no presenta ninguna garra, salvo un plato con cuatro orificios y uno mayor en la parte central en el cual hay un sistema de sujeción mecánica para la inmovilización de un tetón. Así pues, en caso de diseñar un útil será necesario emplear dicho orificio o cualquiera de los restantes.

Por otro lado, la máquina posee un controlador iTNC 530, es decir, un controlador del fabricante Heidenhain que emplea su propio lenguaje conversacional. La forma de programación es intuitiva y similar al código ISO, siendo necesario en nuestro caso postprocesar el programa CNC obtenido de Catia en APT a su correspondiente lenguaje conversacional.

### 4.3. PREFORMA

La preforma se constituye como el tocho de material de partida para el proceso de mecanización, por lo que como es de esperar posee cierta influencia tanto sobre la pieza a diseñar, ya que esta deberá de encontrarse alojada en su interior, así como sobre las operaciones de mecanizado en lo que respecta al tipo de material.

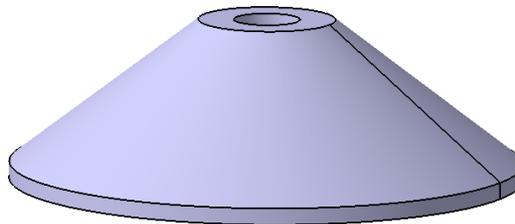


**Figura 44.** *Preforma real montada en utillaje y modelada*

En nuestro caso, contamos con un tocho rectangular de aluminio, cuyas dimensiones son 51x51x56.35 mm y que a su vez, cuenta en la cara inferior del rectángulo con un tetón cilíndrico, el cual permite la sujeción de la preforma por parte de la máquina o del utillaje a emplear. La importancia de conocer la preforma, no solo influirá en las dimensiones de la pieza, sino que su modelación será de gran ayuda para analizar las operaciones del mecanizado en el software CAD/CAM.

### 4.4. UTILLAJE

Para la sujeción de nuestra preforma disponemos de un determinado utillaje, cuyo objetivo se basa en alejar la pieza a mecanizar lo suficiente de la mesa de trabajo para evitar cualquier posible interferencia entre esta y la herramienta, sobre todo al mecanizar lateralmente. Por lo que al ser cónico, se evita en gran medida que al realizar muy cerca de la base de la pieza, como por ejemplo durante un planeado, se pueda llegar a producir una colisión con el útil.



**Figura 45.** *Utillaje base cónica modelado*

Como ya he comentado, se trata de un útil de aluminio con forma cónica, cuyo diámetro inferior es idéntico al de la mesa de trabajo circular, estando sujeto mediante un tetón que posee en su base, el cual se aloja a su vez en el orificio central que posee la mesa de trabajo. Para la sujeción de la preforma, encontramos un orificio ciego en la parte superior de diámetro similar al del tetón de esta, siendo inmovilizada por varios tornillos laterales que presionan al tetón de la preforma en todo su contorno.

## 5. DISEÑO

En el capítulo presente será recogido todo aquello relacionado con el modelado, tales como el diseño de la pieza a fabricar y del utillaje necesario, intentado siempre ajustarse a los diferentes requisitos que deben de cumplirse. El proceso a seguir para el modelado de las piezas pertinentes se caracteriza por ser iterativo, es decir, obtenido un diseño inicial este será analizado posteriormente con el objetivo de estudiar si cumple o no los diferentes requisitos establecidos.

Para el desarrollo de esta tarea de modelado, emplearemos Catia V5, un programa de diseño asistido por ordenador que posee de forma integrada otra serie de *suites* tales como fabricación asistida por ordenador (CAM), análisis mecánico (CAE)... aportando una gran polivalencia en el desarrollo de diseños, ya que participa desde el nacimiento de la idea de la pieza hasta su fabricación final.

### 5.1. MODELADO PIEZA

Teniendo en cuenta toda la información relativa a los medios disponibles y de la necesidad de fabricar una pieza que implique el empleo de 5 ejes durante el mecanizado, estableceremos en este apartado el conjunto de requisitos a cumplir y el proceso de modelado a realizar, justificando cada una de las elecciones.

#### 5.1.1. Requisitos pieza

La pieza a diseñar deberá de poseer una geometría que cumpla una serie de requisitos en lo que respecta a la preforma de partida, las herramientas disponibles, el sistema de sujeción y la potenciación máxima de la máquina disponible, lo cual conlleva el empleo de 5 ejes en el mecanizado. Así pues, a continuación son citados cada uno de ellos,

1. La pieza deberá de poseer, o bien cierta geometría compleja como superficies curvas que implique el uso de múltiples ejes simultáneamente durante el mecanizado, o bien, desarrollar cierta geometría que en caso de emplear máquinas más rudimentarias se necesitare de un elevado número de amarres diferentes y/o cambios de máquina, de tal forma que al emplear una máquina de 5 ejes consigamos una mejora tanto en la productividad, como en la reducción del tiempo. Debido a que posteriormente deberá ser configurado un postprocesador propio para la máquina, será conveniente emplear una pieza relativamente sencilla para que facilite la labor de análisis del postprocesador, siendo de las dos opciones comentadas preferentemente a seleccionar la última de ellas.
2. Adaptabilidad de la geometría de la pieza a las dimensiones y formas de las herramientas disponibles con el objetivo de evitar costes ante la necesidad de comprar nuevas y diferentes herramientas.
3. Adaptabilidad de las dimensiones de la pieza a la preforma de partida, es decir, deberá de estar comprendida en su interior, teniendo en cuenta a su vez sobreespesores para el mecanizado, así como la orientación dentro de la misma.
4. Desarrollo de pieza con cierta aplicación educativa en el ámbito universitario con la cual se pueda mostrar los principales movimientos de una máquina de 5 ejes.

### 5.1.2. Diseño

En base a los requerimientos anteriores se llevaría a cabo la búsqueda y estudio de posibles piezas que pudieran satisfacerlos, encontrando finalmente una pieza basada en un cubo dentro de otro y de otro a su vez, cuya aplicación no es industrial, sino meramente decorativa.



**Figura 46.** Modelo pieza a fabricar

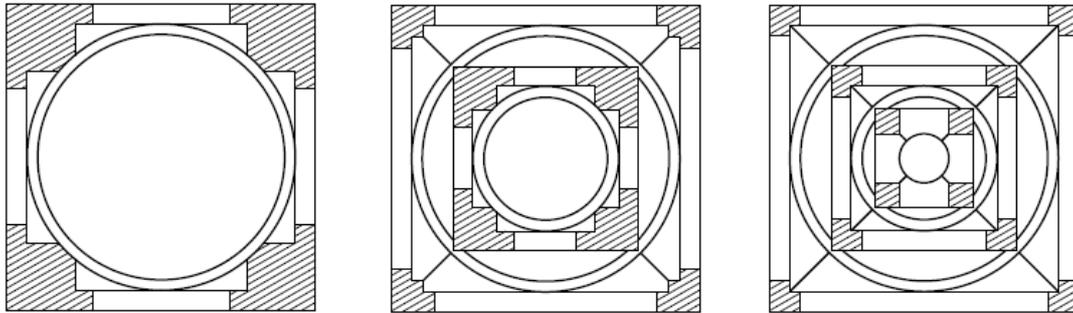
El intrínquilis de este tipo de pieza reside en que los cubos interiores se encuentran completamente sueltos, sin poder escapar ninguno del cubo que lo guarda debido a las geometrías que poseen.

El hecho por el cual se elige este tipo de pieza se debe por un lado al cumplimiento del primero de los requisitos, es decir, a pesar de tratarse de una pieza sin más dificultad en lo que respecta a su geometría, normalmente sería mecanizada bien mediante un torno o una fresa convencional, requiriendo un elevado número de amarres, uno por cada cara del cubo. Sin embargo, el empleo de una máquina de 5 ejes reduciría dicho número y a su vez el tiempo requerido para su fabricación, cumpliendo así el requisito primero. Por otro lado, el cuarto requisito también sería cumplido, ya que la mecanización de dicha pieza se llevará a cabo mediante movimientos básicos de la máquina, así como su tiempo de fabricación no sería muy elevado, lo cual la convierte en un ejemplo perfecto a mostrar.

Paralelamente, otro de los motivos que nos ha llevado a seleccionar esta pieza y que es recogido en el primero de los requisitos, es por el hecho de que necesitamos desarrollar y poner en práctica un postprocesador propio para nuestra máquina. De tal forma, si empleamos una geometría compleja, al analizar el código postprocesado será mucho más difícil poder llegar a encontrar los posibles errores del postprocesador, por lo que este tipo de pieza facilitará en gran medida su análisis debido a que los giros a desarrollar durante el mecanizado serán prácticamente básicos.

Antes de iniciar cualquier proceso de modelado de nuestra pieza, debemos de definir las dimensiones de los diferentes cubos [12], de tal forma que al mecanizar la pieza los cubos queden completamente sueltos y a su vez, no puedan escaparse. Así pues, para conseguir dicho efecto primeramente definiremos el tamaño de los lados de cada uno de los cubos, para ello deberemos de tener en cuenta previamente que el cubo mayor deberá de ser contenido por la preforma. Por lo tanto, si la preforma posee una sección cuadrada de 51 mm de lado, el lado del cubo exterior será de 50 mm con el objetivo de dejar 0.5 mm por cada lado para realizar el planeado y dejar la superficie con un mejor acabado superficial. El lado del resto de cubos se obtendrá aproximadamente de dividir el lado del cubo grande entre tres, siendo estos 50 mm, 30 mm y 16 mm.

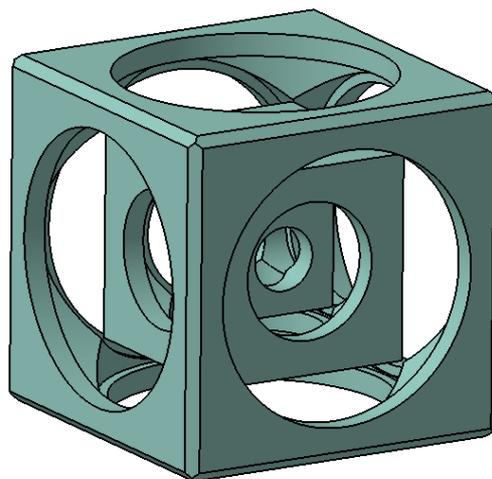
Seguidamente, determinaremos el diámetro de los agujeros que hay en las caras exteriores de los cubos, los cuales juegan un papel fundamental para evitar que los cubos puedan extraerse. Para ello, el diámetro de estos deberán de ser inferiores a las diagonales de las caras de los cubos que alojan, siendo está calculada mediante el teorema de Pitágoras. A modo de ejemplo, la diagonal del cubo intermedio es de 42.42 mm, por lo que el diámetro del agujero del cubo superior será de 40 mm, 2.42 mm inferior. Esto es repetido sucesivamente.



**Figura 47.** Secciones diferentes de la pieza

Con el objetivo de que los cubos se encuentren sueltos, es necesario mecanizar las esquinas de las caras ya que estas se encuentran en contacto con el cuerpo interior del cubo que las acoge. El diámetro al que se debe de mecanizar ha de ser superior a la de la diagonal, ya que de lo contrario quedarán pegados los cubos por las esquinas de cada cara. En nuestro caso, estos diámetros son prácticamente 0.6 mm mayores. Como se puede observar en las secciones de la figura anterior, cada cubo interno se caracteriza por tener su esquina comprendida entre el diámetro inferior y superior del cubo que lo acoge, de lo contrario podrían escaparse o quedar unidos entre sí.

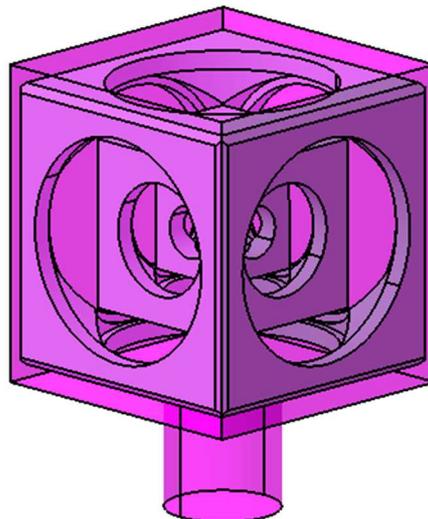
Finalmente nos quedaría por definir la profundidad entre cubo y cubo, lo cual se obtendrá fácilmente de la diferencia entre las caras del cubo superior e inferior y dividirlo entre dos. De esta forma, tendríamos definido por completo cada cubo y podríamos realizar el modelado de la pieza, estando las dimensiones recogidas en el Anexo II.



**Figura 48.** Pieza modelada

Para mejorar estéticamente la pieza e incrementar la complejidad del mecanizado aprovechando aún más las capacidades de movimiento de la máquina, añadiremos el chaflanado de todas las aristas exteriores del cubo superior, siendo dicho chaflanado de  $45^\circ$ , con una diagonal de 1.5 mm de largo.

En lo que respecta al cumplimiento del resto de requisitos, hemos de decir que la única geometría limitante que posee nuestra pieza es el agujero del cubo inferior debido a su pequeño diámetro. Por lo tanto, debido a dicho diámetro y a su ubicación, el agujero será realizado mediante una broca helicoidal, siendo el diámetro igual o superior al diámetro de las brocas existentes. Como podemos observar en la tabla 1, disponemos de una broca de 9.25 mm de diámetro, siendo por tanto este el diámetro de tal agujero. Se cumpliría así el segundo de los requisitos establecidos.

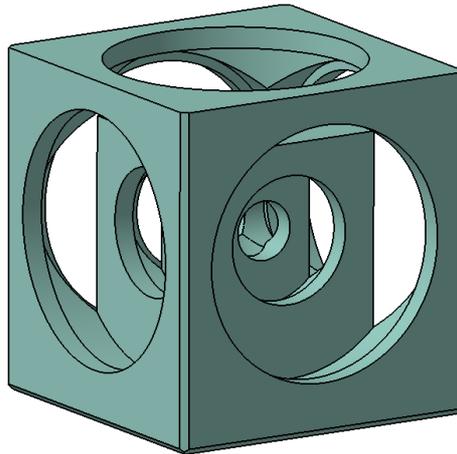


**Figura 49.** Preforma y pieza juntas

Por último, el requisito sobre la preforma también es cumplido, ya que como se ha comentado las dimensiones del cubo exterior son inferiores a la de la preforma, por lo cual este quedará ubicado de forma paralela a las caras de la preforma, presentando unos sobreespesores de 3.175 mm en las caras superior e inferior que permitirán centrar verticalmente la pieza en el interior de la preforma. Con respecto a los sobreespesores de las caras laterales, estos son de 0.5 mm como ya se ha comentado, quedando también centrada la pieza horizontalmente en el cuerpo de la preforma.

## 5.2. MODELADO DE UTILLAJE

Analizando la pieza en el sentido del mecanizado, descubrimos que al quedarse los cubos completamente sueltos, estos podrán colisionar contra la herramienta que gira a muy alta velocidad, pudiendo producir el corte de los mismos o incluso colisiones con importantes consecuencias como la rotura de la herramienta.



**Figura 50.** *Pieza a medio mecanizar*

Como podemos observar, con el primer amarre podremos realizar el mecanizado de todas las caras laterales y superior del cubo, excepto de la cara inferior al ser esta la parte por donde es realizada la sujeción de la pieza con la máquina. Si analizamos esta situación, nos damos cuenta que para el mecanizado de la cara inferior necesitaremos a su vez de un sistema de amarre nuevo, ya que la pieza no cuenta con ningún tetón extra para su sujeción. En este segundo amarre además, será cuando se produzca la liberación de los cubos internos al mecanizar la cara que falta.

### **5.2.1. Requisitos utillaje**

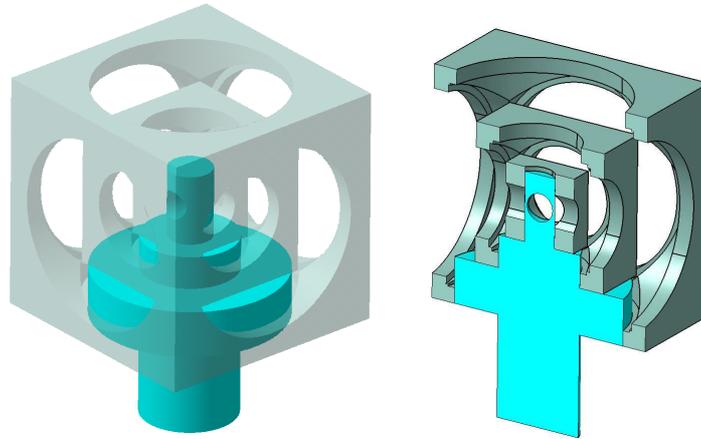
Teniendo en cuenta los problemas citados anteriormente, se considera necesario realizar el diseño y fabricación de un utillaje que pueda dar solución a tales problemas, siendo expuesto a continuación los diferentes requisitos que deberá de cumplir:

1. Inmovilización completa de los cubos interiores, tanto en movimientos traslacionales como rotacionales.
2. Desarrollo del sistema de sujeción de la pieza (amarre) para realizar las operaciones de mecanizado restantes.
3. No deberá de suponer el utillaje ningún obstáculo para la realización de las operaciones de mecanizado.
4. Las tolerancias del utillaje deberán de ser relativamente estrechas con objeto de evitar posibles vibraciones de la pieza, lo cual conlleva a un peor acabado superficial.
5. En la medida de lo posible, deberá de darse solución a ambos problemas de forma simultánea con el objetivo de no incrementar los costos y el número de utillajes necesarios.

### **5.2.2. Diseño**

Analizando los problemas citados anteriormente, se llega a un diseño que pueda dar solución a ambos problemas simultáneamente, es decir, al problema del segundo amarre y al del movimiento libre de los cubos internos. Dicha solución consistiría en diseñar un cuerpo de revolución con la forma del vaciado de uno de los agujeros que hay en una de las caras del cubo

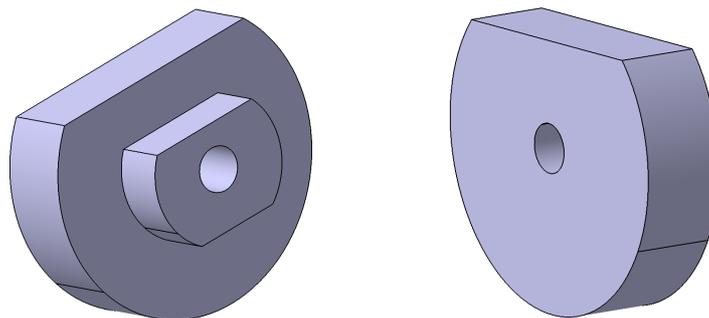
y que a su vez, tuviera un tetón de igual dimensiones que el de la preforma inicial para la sujeción de la pieza y el útil. De esta forma, el utillaje podría introducirse en el interior del agujero superior de nuestra pieza como podemos apreciar en la figura siguiente.



**Figura 51.** *Idea utillaje insertado en pieza*

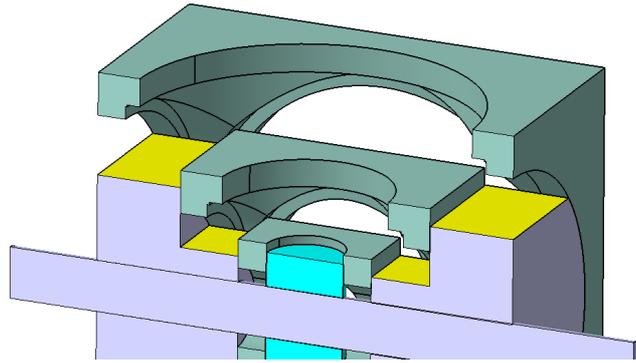
Para evitar el giro de la pieza con respecto al utillaje se realizó un taladro en el extremo del útil que fuera concéntrico a los orificios que posee el cubo inferior y por donde se alojaría un eje pasante, de forma que si la pieza girara, el eje pasante por dichos orificios lo impediría mediante la unión del cubo inferior con el resto de la pieza. Sin embargo, se observó que en el momento de que el cubo inferior quedará suelto, el utillaje solo sujetaría a dicho cubo, pudiendo rotar libremente la pieza entera.

Teniendo en cuenta dichos defectos, se realizó el rediseño del utillaje, modificando el útil anterior e incorporando dos partes más al mismo. Así pues, ambas partes añadidas, denominadas negativos, tendrían como objetivo la sujeción de los cubos interiores, como aportar una mayor robustez a la oposición al giro de la pieza en sí, siendo estas dos piezas similares al vaciado de los agujeros que posee la pieza en sus respectivas caras.



**Figura 52.** *Vistas negativo lateral del útil*

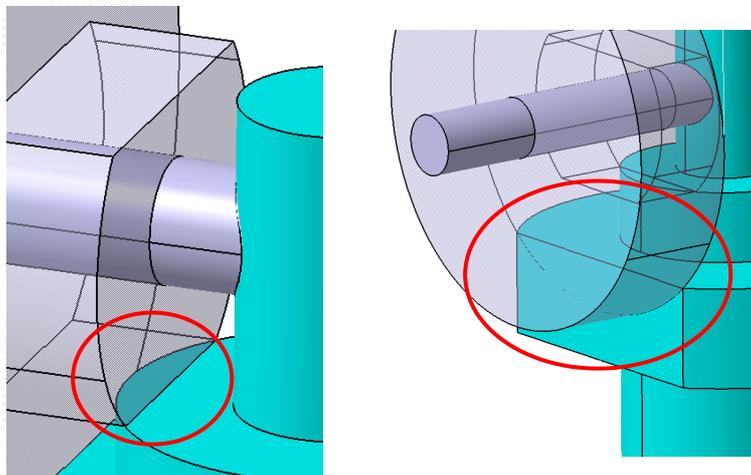
Como podemos observar, el negativo posee en la cara superior de la circunferencia mayor, como en la parte superior del tetón, una cara plana, la cual es diseñada así con el objetivo de evitar interferencia alguna durante el mecanizado del agujero de la pieza en el segundo amarre, ya que de lo contrario la herramienta podría impactar contra el útil. En amarillo podemos identificar las caras planas mencionadas, las cuales a su vez no se encuentran al mismo nivel que las caras de los cubos interiores, para evitar ante todo cualquier interferencia como se ha comentado.



**Figura 53.** Sección pieza y utillaje

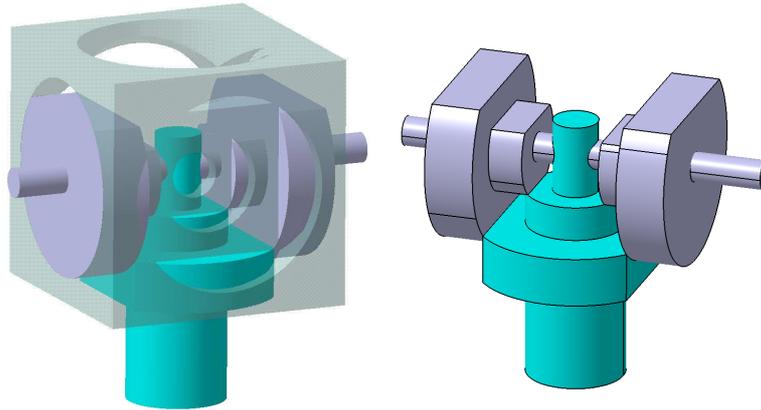
La cara plana que posee el tetón del negativo en su parte inferior, es diseñada de tal forma para evitar la interferencia con la parte central del útil (Pieza color turquesa), así como evitar la rotación del negativo alrededor del eje que lo atraviesa. De esta forma, al apoyar dicha cara plana sobre el cuerpo del útil (Pieza color turquesa), este impedirá al negativo la posibilidad de girar, siendo observada tal geometría en la figura 54.

Este mecanismo para evitar la rotación de los negativos, ha sido aplicado por igual al cuerpo del útil (Pieza color turquesa) con objeto de evitar que este pueda rotar y que sea cargado tensionalmente en exceso el eje pasante. Para ello, simplemente se han añadido dos caras planas en la zona circular de mayor diámetro paralelamente a los negativos, los cuales bloquearan el giro del cuerpo del útil. Como podemos observar, ambas partes del utillaje se ofrecerán apoyo mutuo para evitar posibles rotaciones, ya sea del útil o de la pieza.



**Figura 54.** Sistema para bloqueo de rotación

Volviendo de nuevo a los negativos diseñados, los tetones que poseen tienen como objetivo alojarse en el interior del cubo intermedio, evitando así cualquier posible movimiento y rotación de este, además de ejercer presión sobre las caras del cubo inferior para realizar la misma función anteriormente comentada.



**Figura 55.** *Versión final utillaje*

Finalmente, para la sujeción de las diferentes partes del utillaje y la inmovilización de los cubos interiores, se hace pasar un eje por los negativos simétricos, el cubo interior y por el orificio que posee el cuerpo del utillaje en su extremo. De esta forma, podríamos aprovecharnos de un fuerte apriete del eje con el objetivo de absorber posibles desviaciones dimensionales presentes en el conjunto pieza-útil por parte del material, ya que al ser de aluminio, un material relativamente blando, podrá ser este ligeramente deformado ante la compresión del mismo.

En lo que respecta a las tolerancias del utillaje, estas han sido fijadas de tal forma que se asegurará el ensamblaje del mismo en la pieza a medio mecanizar, así como también evitar posibles excesivas holguras con objeto de reducir en la medida de lo posible la vibración de la pieza, asegurando así un mejor acabado superficial. Para la consecución de esto, se han realizado múltiples cálculos apoyándose en el sistema de ajuste y tolerancias aportado por la normativa ISO pertinente, siendo recogidos tales valores de las tolerancias y desarrollos pertinentes en el Anexo I.

Así pues, revisando el utillaje diseñado con respecto a los requisitos establecidos, observamos que todos ellos han sido cumplidos por diversos motivos. Por un lado, el utillaje se ha diseñado con una doble función, es decir, actúa tanto de mecanismo de sujeción de la pieza con la máquina (Amarre), así como también inmovilizando completamente cada uno de los cubos interiores, cumpliendo el primero, segundo y quinto de los requisitos. Esto supondrá un cierto ahorro en coste al no requerir diseñar/fabricar ningún otro útil más. Por otro lado, se ha realizado el diseño teniendo en cuenta las posibles interferencias con la herramienta como se puede observar en la figura 53, evitando así cualquier posible colisión del útil con la herramienta y cumpliendo con el tercero de los requisitos. Finalmente, se ha llevado a cabo el estudio de las tolerancias del pertinente útil (Anexo I), asegurándose la robustez del conjunto y la capacidad de ser montado el mismo con facilidad en la pieza, cumpliendo el cuarto de los requisitos establecidos.

## 6. MECANIZADO

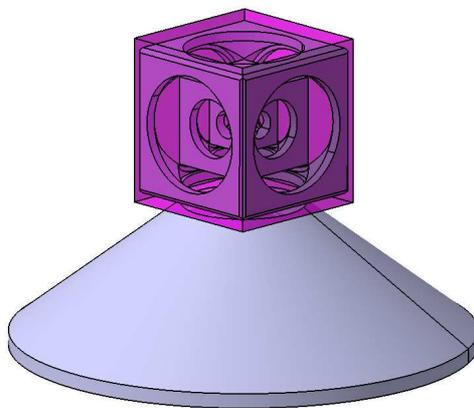
En el presente capítulo se abordarán las operaciones de mecanizado pertinentes para la fabricación de la pieza anteriormente diseñada, lo cual conllevará desde el diseño de la trayectoria a seguir por la herramienta, hasta la definición completa de los parámetros de corte para el mecanizado óptimo. Así pues, para poder desarrollar de forma correcta esta tarea se tendrá en cuenta toda la información relativa a la preforma, útil diseñado, máquina a emplear y herramientas, siendo recogida toda ella en el capítulo 4 anterior.

Todo lo comentado en el párrafo anterior se llevará a cabo mediante el uso de un software CAD/CAM, en nuestro caso Catia V5 [13]. Especialmente se trata de un programa informático que cuenta con todas las herramientas necesarias para el desarrollo del diseño asistido por ordenador (CAD, Computer Aided Design), así como también el desarrollo de la fabricación asistida por ordenador (CAM, Computer Aided Manufacturing) y en menor medida, del análisis mecánico (CAE, Computer Aided Engineering) de los diseños creados, siendo este programa una herramienta básica para hacer de las ideas de un diseño, una realidad, pudiendo estudiar su viabilidad como su proceso de fabricación en la medida de lo posible. Respecto a la tarea a realizar en el presente capítulo, el uso de dicho programa estará orientado principalmente a la parte de CAM, utilizado para definir todo lo relativo al mecanizado de la pieza.

El capítulo en sí, quedará dividido en los diferentes amarres necesarios para la fabricación de la pieza, siendo justificado en cada uno de ellos las trayectorias y los parámetros seleccionados, mostrando a su vez en las figuras las trayectorias y los resultados de la simulación de las mismas en lo que respecta al mecanizado y posibles colisiones. Con respecto al listado cronológico completo de cada una de las operaciones, las herramientas empleadas en cada una de ellas, los parámetros de corte... todo ello será recogido en la hoja de procesos presente en el Anexo IV, permitiendo realizar el seguimiento y fabricación completo de la pieza, constituyéndose como un resumen esquemático de los apartados siguientes.

### 6.1. MECANIZADO AMARRE A

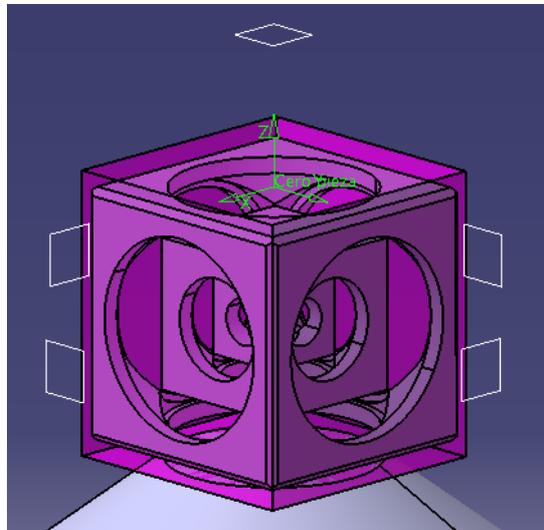
El mecanizado del presente amarre se caracterizará por presentar operaciones idénticas en diferentes posiciones, es decir, debido a la geometría de nuestra pieza en este primer amarre se mecanizarán cinco de las seis caras de E, siendo las operaciones en cada una de ellas relativamente similares. Así pues, diseñando las operaciones de mecanizado para una de ellas, el resto quedarán prácticamente definidas también.



**Figura 56.** Preforma sobre útil base en amarre A

Apoyándonos en la preforma de partida y en especial, de la ubicación de la pieza en su interior según como se ha comentado en el apartado 5.1.2, definiremos el estado inicial del amarre antes de cualquier operación de mecanizado. Como podemos observar, la preforma es sujeta por el tetón de su base mediante el útil cónico, fijado este a su vez a la mesa de trabajo de la máquina. Con respecto a las medidas existentes desde las caras exteriores de la preforma hasta la pieza, destacar que en la parte inferior como superior se ha dejado un sobreespesor de 3.175 mm, mientras que en todas las caras laterales el sobreespesor dejado ha sido de 0.5 mm, permitiendo la realización de operaciones de planeado.

Como todo proceso de mecanizado, este necesita de un punto cero pieza (Punto de referencia del mecanizado) con respecto al cual se obtendrán las coordenadas de los movimientos de la herramienta. En nuestro caso, para favorecer su definición en la máquina, este ha sido fijado en la superficie superior de la pieza y justamente en el centro del orificio, quedando a una profundidad de 3.175 mm respecto de la cara superior de la preforma.



**Figura 57.** Punto de referencia de mecanizado y planos de seguridad

Además del punto de referencia de mecanizado, encontramos en la figura anterior una serie de cuadros con borde blanco, los cuales representan los planos de seguridad. Dichos planos se encuentran ubicados a una determinada distancia, en nuestro caso a 30 mm, y que serán de gran ayuda para realizar las macros de acercamiento/alejamiento de las herramientas en las operaciones de mecanizado con el objetivo de evitar posibles colisiones.

Así pues, teniendo en cuenta los sobreespesores dejados, la geometría de la pieza, la pérdida de tiempo por cambios de herramienta y de amarres... será descrito a continuación de forma cronológica cada una de las fases del mecanizado, justificando cada una de las características de las operaciones.

### **6.1.1. Fase I: Taladrado I - V**

Antes de comenzar a definir cualquier operación de mecanizado, previamente estudiaremos cual debería de ser la primera de ellas con el objetivo de conseguir ciertas ventajas frente al resto de operaciones a realizar. Así pues, identificamos que al tener que ser los orificios del cubo inferior realizados mediante la broca helicoidal de diámetro 9.25 mm, ya que se concretó de esta forma en el diseño, se considerará favorable comenzar con esta operación para posteriormente facilitar la penetración de la fresa al realizar los cajeados de los agujeros, ya que

en caso de desgaste o rotura de la herramienta al penetrar en el material, es preferible que sea dañada antes la broca debido a su bajo coste que cualquiera de las fresas siguientes a emplear. Además, destacar que la penetración axial de las fresas se encuentran relativamente limitadas en comparación con las brocas, siendo evitados dichos movimientos de penetración axial siempre que sea posible.

Por otro lado, se podría pensar en realizar el agujero del cubo inferior mediante una de las fresas de pequeño diámetro, por ejemplo, con una fresa toroidal de diámetro 3 mm. Sin embargo, este tipo de fresas de pequeño diámetro suelen ir acompañadas de una longitud relativamente corta, de tal forma que al estar muy profundo el agujero del cubo inferior de la pieza, podría darse el caso de que el cabezal o el portaherramientas colisionarán con las caras exteriores de la pieza. Por dichos motivos, quedaría completamente descartado el empleo de tal herramienta.

Así pues, teniendo en cuenta las justificaciones comentadas anteriormente, comenzaremos a definir las operaciones de taladrado. Primeramente, comenzaremos por el taladro de la cara superior de la pieza, ya que dicho taladro será diferente al resto de taladros a realizar en las demás caras del cubo, debido a que la profundidad del mismo será superior.

El hecho por el cual dicha profundidad es mayor, es porque se debe de dejar espacio suficiente para poder introducir posteriormente el cuerpo del útil en su interior, el cual prácticamente atraviesa el cubo inferior. Por lo tanto, este primer taladro poseerá una profundidad de 36.175 mm, es decir, desde la superficie de la preforma hasta la cara inferior del cubo pequeño, de tal forma que para asegurarnos que la broca realiza dicho taladro, estableceremos que se ha llegado a alcanzar dicha profundidad cuando los hombros de la broca helicoidal se encuentren en la profundidad citada y no la punta de esta. Con respecto a los movimientos de acercamiento y retracción de la herramienta, estos se caracterizarán por acercarse a la pieza perpendicularmente desde el plano de seguridad y alejarse hasta el mismo perpendicularmente también, ambos con movimiento rápido.

Debido a que la profundidad del taladro es bastante grande (Superior a 10 mm), la realización del mismo se realizara por múltiples pasadas a diferentes profundidades, consiguiendo un mejor acabado, así como un posible menor castigo de la herramienta en comparación a su realización de una sola pasada. Para llevarlo a cabo, seleccionaremos la herramienta de mecanizado *Drilling deep hole*, la cual nos permitirá definir el tamaño de cada pasada.

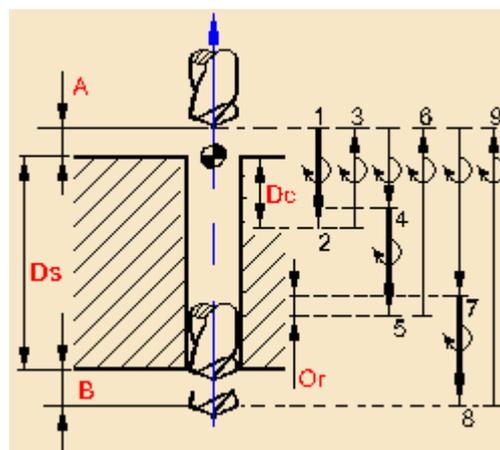


Figura 58. Esquema taladro profundo

En esta herramienta encontramos la variable  $D_c$ , la cual determina la profundidad del primer taladro directo a realizar, para posteriormente volver al punto de partida y realizar otra pasada. Esta siguiente pasada, se caracterizará por poseer una profundidad relativamente inferior a la anterior, ya que encontramos un parámetro en la configuración del taladrado llamado *Decrement rate*, el cual definirá cuanto será reducido la siguiente pasada mediante su cálculo con la siguiente ecuación,

$$\text{Profundidad}_{\text{pasada}} = D_c * (1 - \text{DecrementRate})$$

En nuestro caso, cada una de las pasadas tendrán una misma profundidad máxima de 5 mm, es decir, en la primera pasada la herramienta penetrará 5 mm, mientras que la siguiente pasada será 5 mm más profunda respecto a la pasada anterior y así sucesivamente, siendo por ello fijada la variable *Decrement rate* a cero. La retracción y acercamiento de la herramienta se realizará en movimiento rápido de tal forma que antes de 1.5 mm de comenzar la siguiente pasada, la herramienta se fijará en los parámetros de corte convencionales. Finalmente decir, que el parámetro *Approach clearance (A)* es fijado en 2.5 mm, es decir, desde el plano de seguridad hasta 2.5 mm antes de la superficie de la preforma el movimiento será en modo rápido.

Para observar algunas de las sucesivas pasadas dadas (En total son 9 pasadas), es mostrado a continuación de izquierda a derecha (En orden cronológico) la profundidad de algunas de ellas.

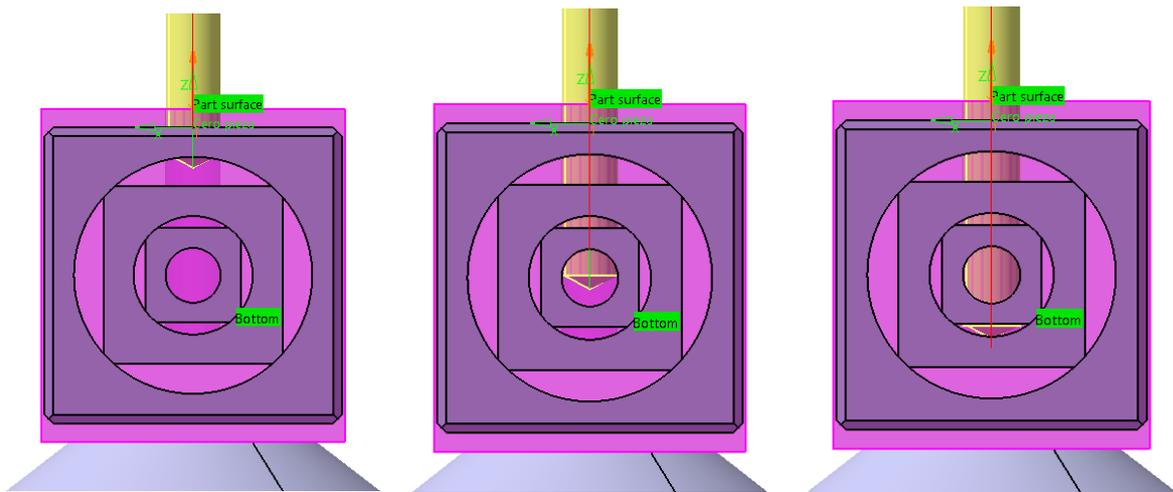


Figura 59. Trayectoria herramienta taladrado inicial

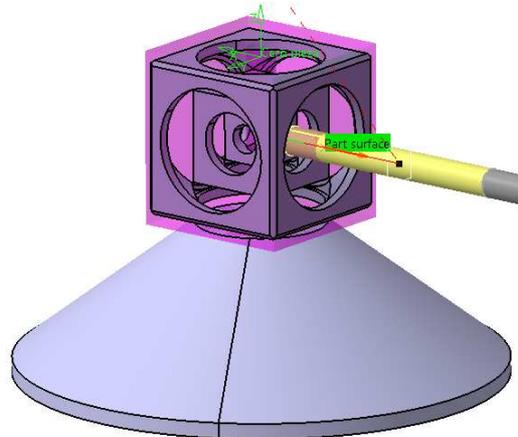
En lo que respecta a los parámetros de corte, estos son fijados de acuerdo a las recomendaciones dadas por parte del fabricante [14], las cuales consistirán en una velocidad de corte de entre 60 – 80 m/min para aleaciones de aluminio con un avance de 0.245 mm/rev para un diámetro de broca de 9.25 mm. Así pues, si seleccionamos una velocidad de corte en torno a 70 m/min, las revoluciones a fijar serán de 2400 rpm y por tanto la potencia de corte será de 0.869 kW, siendo recogidos todos los cálculos pertinentes en el Anexo III.

Si comparamos dichos valores con los límites que posee nuestra máquina, reflejados todos ellos en la tabla 2, observaremos que tanto en lo que respecta al avance como a las revoluciones de giro del husillo, estos valores son drásticamente inferiores. Lo mismo ocurre con la potencia, no llegándose a alcanzar ni la mitad de la potencia máxima, pudiendo ser realizada dicha operación por nuestra máquina al no suponer ninguna gran exigencia mecánica para ella.

Posteriormente, se realizarán el resto de taladros ubicados en las caras laterales del cubo con el objetivo de evitar tener que quitar y poner otra herramienta diferente, para después tener que volver a colocar la broca en el portaherramientas de la máquina, ahorrando de esta forma en tiempos muertos durante el mecanizado.

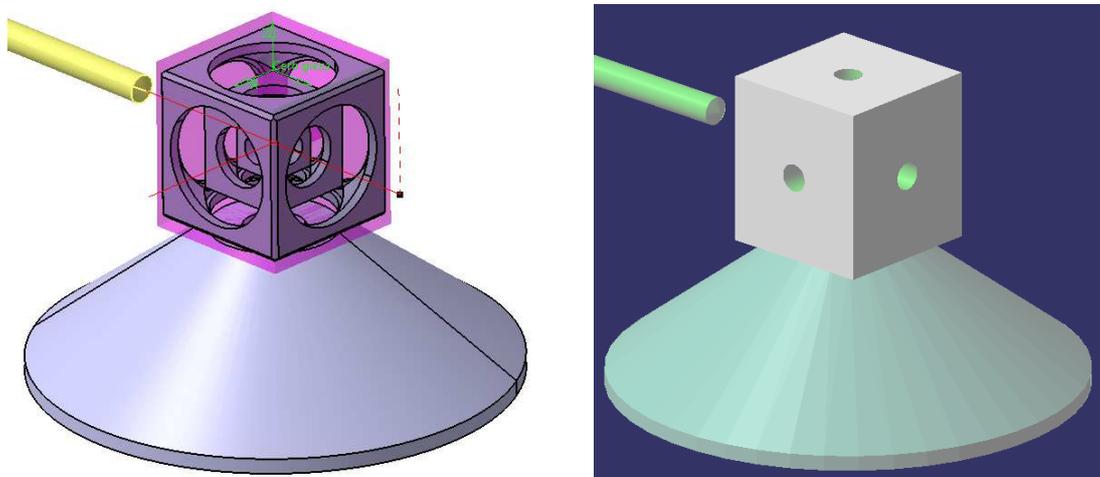
Dichos taladros laterales se caracterizarán, como ya se ha comentado, por presentar una profundidad inferior al taladro anterior, lo cual no resta que sean tratados como agujeros profundos debido a que su profundidad ronda los 25 mm. Por lo tanto, para su realización se recurrirá de nuevo a la herramienta *Drilling deep hole*, aplicando los mismos parámetros de profundidad que para el caso anterior. En este caso, el número de pasadas serán seis, todas ellas con una profundidad por pasada de 5 mm.

Con el objetivo de ahorrar en tiempo de programación, se recurrirá al empleo de una herramienta denominada *Copy transformation instruction*, la cual nos permitirá realizar una copia de las operaciones que nosotros señalemos en el resto de caras restantes del cubo. Así pues, en nuestro caso seleccionaremos el taladrado lateral anterior.



**Figura 60.** Taladrado lateral

Para posteriormente establecer que respecto al eje del círculo del agujero superior del cubo, se gire y se realice tres copias del taladro comentado, girando  $90^\circ$  con respecto a dicho eje cada una de las operaciones copiadas. Como consecuencia, obtendremos directamente el resto de taladros laterales, siendo las trayectorias y el resultado el mostrado a continuación.



**Figura 61.** Trayectorias restantes taladrado y resultado

En lo que respecta a la simulación, no se ha detectado ninguna posible colisión de la herramienta con la preforma, ni durante el taladrado, ni durante el movimiento de la herramienta de un taladro a otro. El análisis del mecanizado sobre el material remanente no será mostrado, ni realizado ya que no aporta información apenas al tratarse de una operación inicial alejada en cierta medida del diseño final de la pieza. La única parte que se podría analizar sería la zona central de la pieza, es decir, la zona relativa al cubo inferior, pero debido al reducido tamaño de los orificios es prácticamente imposible su visualización.

### **6.1.2. Fase II: Planeado I**

Realizados los taladros pertinentes de la pieza, comenzaremos a definir las operaciones de planeado, las cuales se conciben como las operaciones necesarias para sanear la superficie de la pieza mediante la eliminación de las imperfecciones presentes en la superficie exterior del material de partida. En nuestro caso, dicha operación será realizada mediante mecanizado de alta velocidad, siendo posteriormente discutido que parámetros y modificaciones de trayectoria realizar.

Antes de comenzar, seleccionaremos el tipo de herramienta idónea para realizar el planeado, de tal forma que si analizamos las herramientas que disponemos en la Tabla 1, encontraremos que la mejor opción de todas sería la fresa toroidal de diámetro 10 mm. El motivo por el cual se ha seleccionado dicha herramienta, se debe a que se trata de una de las herramientas con mayor diámetro, siendo esto esencial para abarcar más espacio por pasada, reduciendo así el tiempo de mecanizado. Por otro lado, de entre las dos fresas de mayor diámetro, seleccionaremos la fresa toroidal antes que la semiesférica, ya que como se explicó en el apartado 3.5, las fresas semiesféricas tienden a dejar ondulaciones en la superficie plana al mecanizar debido a su geometría redondeada. Por contra, las fresas toroidales poseen buena aplicación para operaciones de mecanizado radiales, como axiales debido a la disposición de sus filos de corte. Por último destacar, que la herramienta seleccionada es de metal duro, no presentando ninguna limitación para el mecanizado del aluminio a altas velocidades debido a su gran dureza y resistencia al desgaste, como se comentó en el apartado 3.5 respecto a este tipo de material.

La primera de las superficies a mecanizar será la superficie superior del cubo, la cual presenta un sobreespesor de 3.175 mm, por lo que al ser realizado el presente planeado mediante mecanizado de alta velocidad, este se caracterizará por poseer múltiples pasadas axiales en comparación con el mecanizado convencional. Como se comentó en el apartado 3.2.2, el mecanizado de alta velocidad necesita de pequeñas profundidades axiales y radiales, estando estas acompañadas de elevadas velocidades de corte y avances moderados, consiguiendo una elevada tasa de arranque de material, además de un acabado superficial de gran calidad.

Así pues, aunque la herramienta pudiera realizar dicha operación de una sola pasada, con el objetivo de evitar posibles fallos y desgastes prematuros de la misma, fijaremos las condiciones de corte de acuerdo a las recomendaciones dadas por los fabricantes [15,16]. La profundidad axial se fijará en torno a 1 mm de profundidad, mientras que la radial no podrá superar el 50% del diámetro de la herramienta, siendo fijada del lado de la seguridad en 2.5 mm. En lo que respecta a la velocidad de corte, la mayoría de los fabricantes fijan dicha magnitud en torno a 760 m/min con un avance por diente de 0.2 mm/diente.

De tal forma que realizando los cálculos pertinentes, los cuales son recogidos en el Anexo III, encontramos que la velocidad de corte será de 24192 rpm, con una velocidad de avance de 9676.6 mm/min y una potencia de corte de 0.54 kW. Si comparamos dichos parámetros con los

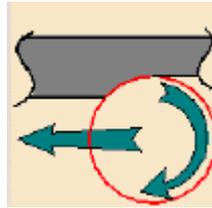
límites que posee nuestra máquina (Tabla 2), observamos que todos los parámetros se encuentran dentro del rango tolerable al ser todos ellos inferiores.

**Tabla 3.** Comparación parámetros de corte planeado y límites máquina

Variable	Límites Mikron HSM 400 U	P. de corte calculados
Revoluciones husillo	30 000 rpm	24 192 rpm
Velocidad de avance	60 000 mm/min	9676.6 mm/min
Potencia	13.5 kW	0.54 kW

La única de las variables más cercanas al límite sería las revoluciones del husillo, aunque sin embargo la potencia de corte será bastante inferior a la mitad de la potencia de la máquina, lo cual nos asegura la imposibilidad de generar daños en ella.

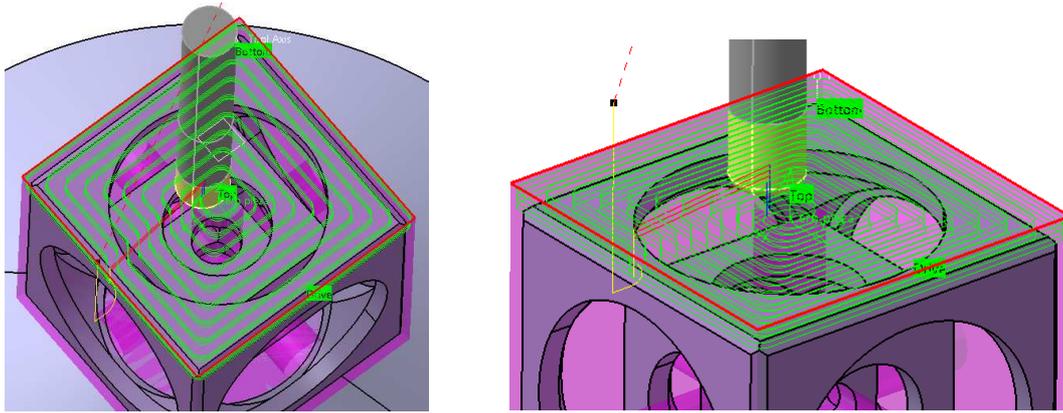
Fijados los parámetros de corte, definiremos la trayectoria de la herramienta durante el mecanizado, la cual se caracteriza por ir mecanizando desde el exterior de la superficie cuadrangular hasta su interior. La dirección de corte se fijara en concordancia [17] con el objetivo de evitar el efecto bruñido, de tal forma que se produce menos calor y la tendencia al endurecimiento mecánico es mínima, además de obtener un mejor acabado superficial.



**Figura 62.** Mecanizado en concordancia

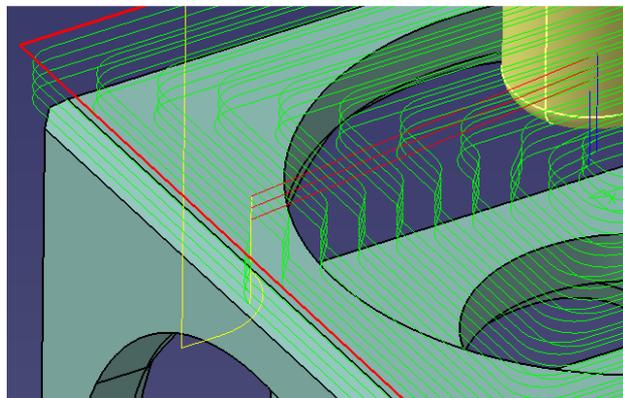
Estableceremos también que la herramienta sobresalga del borde exterior de la superficie en torno al 50% de su diámetro para asegurarnos que toda la superficie es mecanizada y definiremos la profundidad radial y axial del planeado según lo comentando, teniendo que realizar en el sentido de la profundidad axial hasta 4 pasadas.

Debido a que la trayectoria presenta numerosos cambios de dirección y el mecanizado es realizado en alta velocidad, fijaremos en Catia los parámetros geométricos necesarios para suavizar dichos cambios de dirección y de esta forma mitigar las altas inercias que posee la herramienta en su movimiento. Así pues, reduciremos la necesidad de acelerar/desacelerar la herramienta o la mesa de trabajo de forma constante al presentar las esquinas un radio de curvatura de 2 mm, con un ángulo máximo de 15° por curva y una adición de 0.5 mm de segmento rectilíneo al salir de esta. Mientras que los cambios de dirección debidos a movimientos de transición, poseerán un radio máximo de curvatura de 2.5 mm, 45° de curva y una longitud rectilínea entre trayectorias paralelas de 2 mm, quedando definidas las trayectorias según como se muestra en las figuras siguientes.



**Figura 63.** Trayectoria herramienta planeado I

De tal forma que si realizamos un zoom de la trayectoria de la herramienta podremos observar que las esquinas, así como los movimientos de transición, se encuentran con cambios de dirección suavizados.



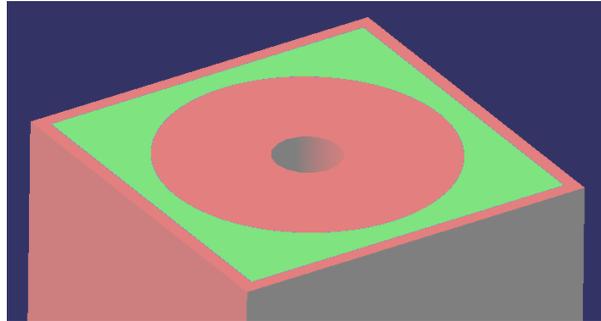
**Figura 64.** Zoom trayectorias herramienta planeado I

Además, hemos de comentar que el acercamiento de la herramienta al inicio del planeado se ha realizado de forma tangencial (Trayectoria color amarillo), para evitar una entrada brusca de la herramienta al mecanizar. Sin embargo, en la salida de la herramienta no se ha definido macro de salida alguna (Trayectoria color azul) debido a dos motivos, por un lado la salida tangencial en dicho punto no aportaría nada al caer justamente sobre el orificio del taladro y por otro lado, no es necesario retraer la herramienta ya que la siguiente operación será iniciada muy próximo al punto de finalización del planeado.

En lo que respecta a la pasada de acabo, esta no ha sido realizada ya que la calidad a obtener con el mecanizado de alta velocidad es relativamente alta, ahorrando de esta forma el realizar otra pasada más.

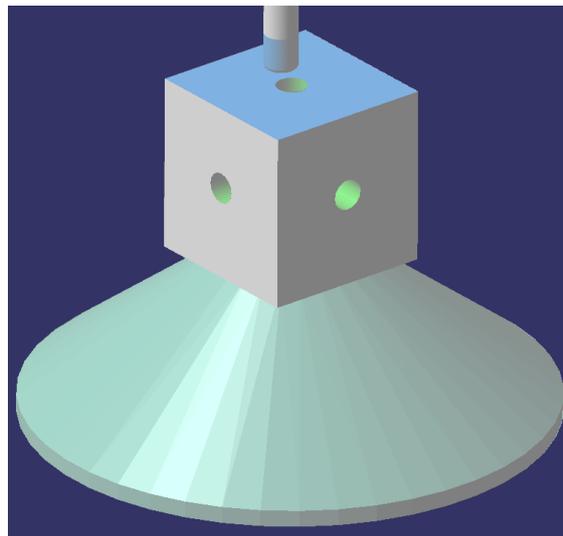
Analizando la simulación de la trayectoria, no identificamos ningún movimiento extraño, ni colisión de la herramienta con la preforma, estando correctos los movimientos realizados por la herramienta. Por otro lado, con objeto de observar el resultado del mecanizado en busca de posibles zonas sin mecanizar, ondulaciones presentes en la superficie... llevamos a cabo el análisis de material remanente. En dicho análisis, vemos que el mecanizado ha sido correcto, ya que el material a mecanizar habría sido eliminado o estaría dentro de tolerancia, siendo esto identificado por las zonas de color verde, aquellas zonas donde el material a remover ha sido por completo eliminado, dejando a la vista el diseño final de la pieza. En caso de identificar zonas

azules, se referirá a zonas de mecanizado que se encuentran fuera de tolerancia (Tolerancia  $\pm 0.05$  mm de material remanente) o bien, las zonas rojas donde queda mucho material por eliminar.



**Figura 65.** *Análisis material remanente planeado I*

Siendo el resultado final del planeado y acumulativo del resto de operaciones anteriores, el mostrado a continuación. El hecho de que la cara superior presente un color azul, diferente al de los taladros, es debido a que cada zona mecanizada recibe un color determinado en función de la herramienta que ha realizado la operación.



**Figura 66.** *Resultado final planeado I*

Cabría pensar en realizar seguidamente el resto de operaciones de planeado de las caras restantes del cubo, pero se considera más favorable realizar a continuación el cajeado del agujero presente en la cara actual, antes que ir realizando un giro tras otro de la pieza para realizar el resto de planeados. El motivo de ello, se debe a que el cajeado comparte la misma herramienta que el planeado de tal forma que si realizáramos el resto de planeados, el número de giros de la pieza se incrementaría demasiado, lo cual se traduciría en un incremento innecesario del tiempo de mecanizado. Así pues, se realizarán todas las operaciones de la cara presente con la herramienta seleccionada, antes de girar la pieza y repetir dichas operaciones.

### **6.1.3. Fase II: Cajeados I – II**

Como ya se ha comentado en el párrafo anterior, la siguiente operación a realizar será el cajeado del agujero de la cara superior de la pieza, por el simple motivo de ahorrar tiempo al aprovechar que se comparte la misma herramienta para las operaciones sucesivas. El cajeado estará dividido

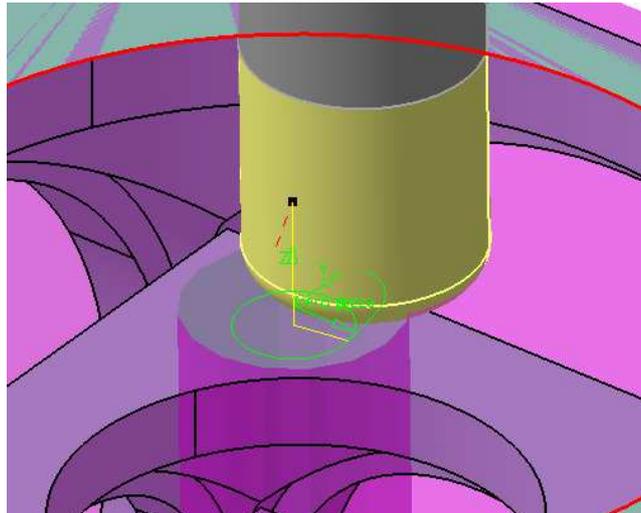
a su vez en dos subcajeados, un cajeado inicial que engloba todo el vaciado del agujero de 40 mm de diámetro (Identificados todos los cajeados restantes idénticos a este con número impar, en este caso Cajeado I) y un segundo cajeado que vaciará el agujero de 20 mm de diámetro (Identificados todos los cajeados idénticos restantes con número par, en este caso Cajeado II).

El hecho por el cual se ha seleccionado la misma herramienta empleada para el planeado que para el cajeado, ha sido por diversas razones. Primeramente, porque el tipo de herramienta que es, una fresa toroidal, es la más idónea para la realización de cajeados, ya que la ubicación de sus filos de corte le hacen apta para mecanizar tanto radialmente como axialmente. Seguidamente, su diámetro no es demasiado grande como para no poder realizar los cajeados de diámetro 40 mm y 20 mm (La herramienta posee un diámetro de 10 mm), permitiéndonos ahorrar en número de pasadas y por ende, en tiempo de mecanizado. Y por último, aunque hubiéramos dispuesto de una herramienta de características similares, no hubiera sido la presente herramienta cambiada para evitar la pérdida de tiempo en su cambio y no poner en uso un mayor número de herramientas de forma innecesaria.

Al emplear la misma herramienta, realizar ambos cajeados en alta velocidad y ser operaciones relativamente similares a la del planeado, los parámetros de corte serán considerados los mismos para ambos cajeados a realizar. El considerar que las operaciones de cajeado actuales y la de planeado anterior son similares, parte del hecho de que ambas se tratarían de una operación de fresado lateral, ya que aunque en el cajeado inicialmente al profundizar la herramienta en el agujero, se mecanice por ambos lados de la herramienta, el resto del mecanizado será prácticamente lateral al igual que en el planeado. Por otro lado, al ser ambas operaciones realizadas en alta velocidad y con la misma herramienta, aunque el material a eliminar en los cajeados sea superior, los parámetros de corte como ya digo, serán los mismos para ambos.

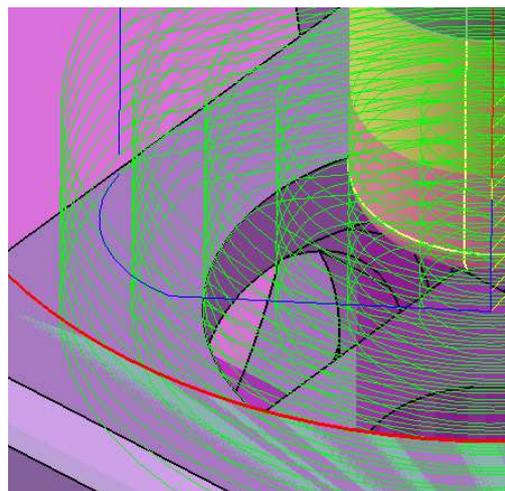
Así pues, la profundidad axial máxima a mecanizar estará fijada en 1 mm, lo cual hará que sea necesario realizar un elevado número de pasadas para realizar los cajeados. Tanto en el cajeado I, como en el cajeado II, la profundidad radial será prácticamente la misma, es decir 2.5 mm, permitiendo en el segundo cajeado llevar a cabo la operación con un bajo número de pasadas por nivel en diferencia con el primer cajeado por el diámetro que presenta. Finalmente, la velocidad de corte volverá a ser de 24192 rpm y la velocidad de avance 9676.6 mm/min, no siendo necesario volver a comparar dichos parámetros de corte con las limitaciones de nuestra máquina, ya que sabemos del apartado anterior que son perfectamente tolerables.

En las operaciones de cajeado cerrado la entrada de la herramienta supone un paso clave, ya que dependiendo de cómo sea realizada, la herramienta será más castigada o no. Gracias al previo análisis realizado, identificábamos que sería favorable inicial todo el proceso de mecanizado con el taladrado, ya que en esta situación esto supondría una ventaja al profundizar la herramienta en el material. Aprovechándonos de ello, iremos penetrando la herramienta de forma axial justamente por el centro del taladro, de tal forma que la fresa toroidal vaya simplemente eliminando el pequeño grosor de material que ha quedado de la diferencia de los diámetros de la broca y de la fresa toroidal a emplear. Esta penetración axial no supone ningún problema para este tipo de fresa, ya que dispone de filos de corte en su zona frontal de lado a lado. Por lo tanto, definiremos una macro de acercamiento completamente perpendicular a la pieza por el centro del taladro desde el punto final donde se finalizó el planeado hasta el primer nivel del cajeado.



**Figura 67.** *Macro entrada cajeadado I*

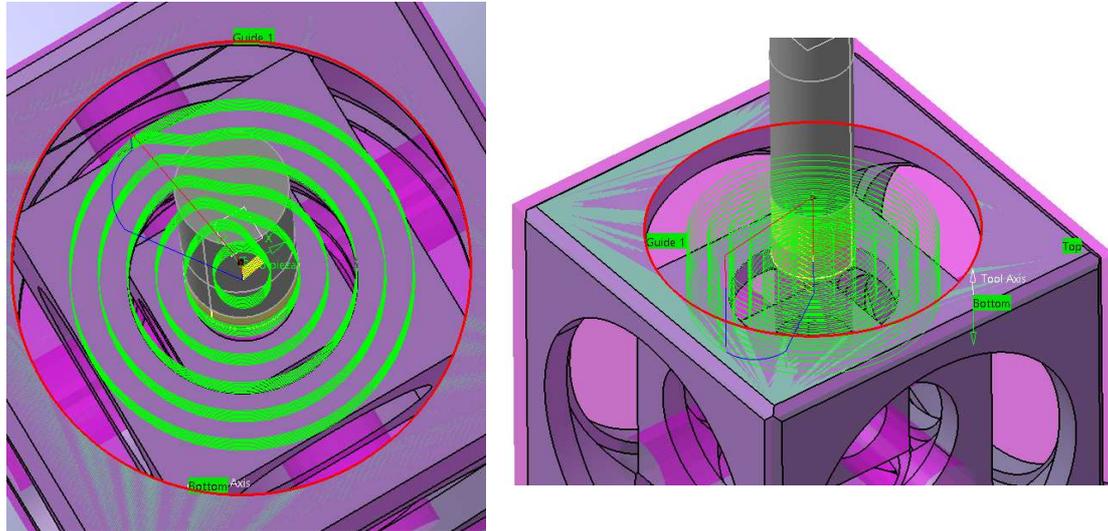
Penetrada la herramienta en el interior del agujero, comenzaremos a realizar el vaciado del mismo de forma concéntrica, desde el interior hasta el exterior del agujero. Una vez finalizado el mecanizado de un nivel, retraeremos verticalmente la herramienta desde el punto final donde se encuentre para hacerla incidir de nuevo por el centro del taladrado. Esto se ha conseguido mediante la definición de la macro denominada *Return between levels Approach*.



**Figura 68.** *Macro salida cajeadado I*

Finalizado todo el mecanizado se ha definido otra macro de salida, la cual en lugar de retirar la herramienta fuera del cajeadado, ubica a la misma en el centro y fondo de este para posteriormente comenzar el último cajeadado de esta cara de la pieza. Hemos de decir que el movimiento en el último nivel del cajeadado al centro del mismo, se realiza de forma tangencial como se puede apreciar en color azul en la figura anterior. Aunque no se haya comentado hasta el momento, toda trayectoria de acercamiento (Color amarillo) o retirada de la herramienta (Color azul) son realizadas con los parámetros de corte del mecanizado, ya que sobre todo durante las trayectorias de acercamiento se suele producir mecanizado en ellas, de tal forma que nos aseguramos que no se produzca daños algunos en la herramienta, ni en la pieza en tales movimientos.

Con respecto a las características del mecanizado, hemos de decir que se han aplicado los mismos parámetros que para el planeado, es decir, se ha fijado que la dirección de corte sea en concordancia por los mismos motivos anteriores y se ha activado la modificación de la trayectoria por mecanizado de alta velocidad. Si visualizamos la trayectoria de la herramienta de forma vertical, podremos ver que han sido suavizados todos los cambios de dirección presentes en el cajeado actual, siendo los parámetros de radio, ángulo... para las esquinas y movimientos de transición los mismos que los citados en el planeado.



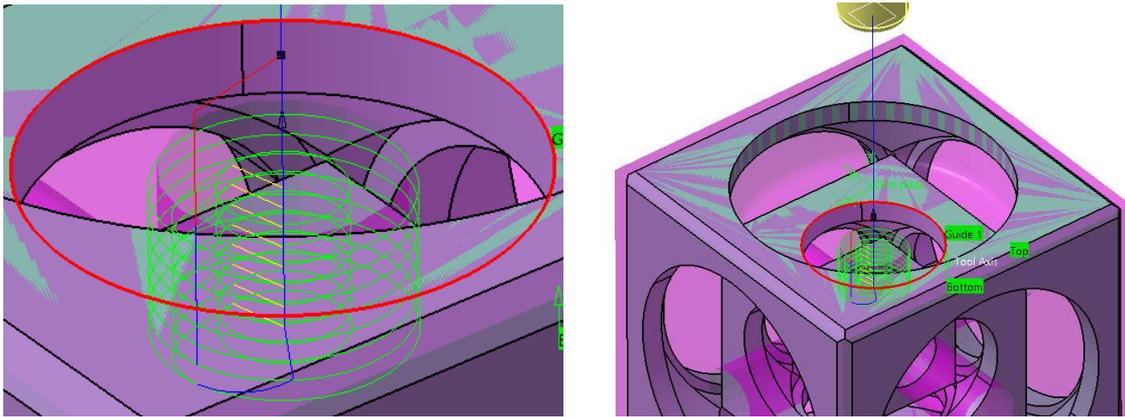
**Figura 69.** Visualización vertical y completa de la trayectoria cajeado I

De nuevo no se ha realizado pasada alguna de acabado, ya que al ser realizado el cajeado en alta velocidad, indirectamente conseguimos un gran acabado superficial, además de gran precisión dimensional.

Al igual que para el cajeado anterior, en el segundo cajeado la penetración de la herramienta será realizada de forma axial por el centro del taladro previamente realizado. Así pues, apoyándonos en que la herramienta ha sido ubicada en el fondo y centro del cajeado anterior, definiremos una macro de aproximación de la herramienta para que penetre como se ha comentado al inicio del párrafo. Debido a que la herramienta ya está prácticamente ubicada en el lugar de inicio, solo deberá realizar un ligero movimiento axial para su penetración.

Repitiendo de nuevo el mismo diseño realizado que para el cajeado anterior, este irá desde el centro al exterior, siendo dos pasadas a realizar por nivel de cajeado debido a que el diámetro de la herramienta es prácticamente la mitad del diámetro de este. De nuevo, cada vez que es realizada una pasada por nivel, la herramienta será retirada y vuelta a penetrar de forma axial por el centro del cajeado, siendo esto conseguido con el diseño de la macro denominada *Return between levels Approach* con penetración axial.

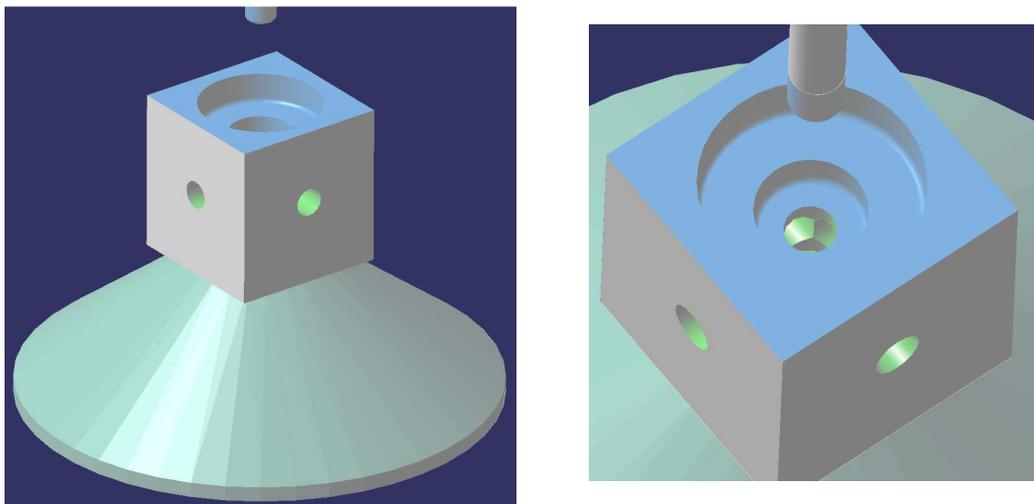
Finalmente realizado el cajeado, la herramienta será alejada del contorno del agujero de forma tangencial hasta el centro del mismo, para después replegarse hasta el plano de seguridad de forma vertical. Todo ello realizado mediante el diseño de la macro de salida o retirada de la herramienta según como se comenta.



**Figura 70.** Trayectorias herramienta cajeado II

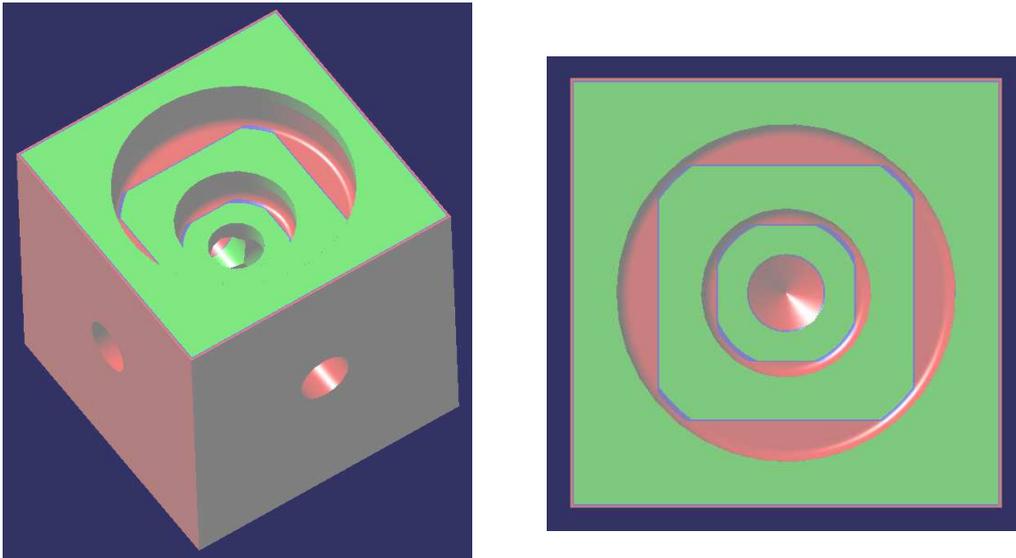
En lo que respecta a las características del mecanizado, tales como dirección de corte, serán idénticas a las del cajeado anterior con la salvedad de que aunque haya sido activado las características del mecanizado de alta velocidad, sus propiedades apenas serán visibles por los escasos cambios de dirección presentes en este segundo cajeado.

El resultado completo englobando los dos cajeados más el resto de operaciones previamente realizadas, es el mostrado en la figura siguiente.



**Figura 71.** Resultado acumulado del mecanizado

Por último, realizamos el análisis del material remanente que pudiera haber quedado sin eliminar para saber si las operaciones de mecanizado realizadas son correctas o no. Como podemos observar, todas las caras paralelas a la cara superior de la pieza se encuentran de color verde, lo cual significa que no poseen ni material sobrante, ni un sobre mecanizado de las mismas, estando el mecanizado realizado correcto. En lo que respecta a las zonas rojas, estas son referidas a las zonas con material sobrante, el cual será eliminado en las sucesivas operaciones a realizar.

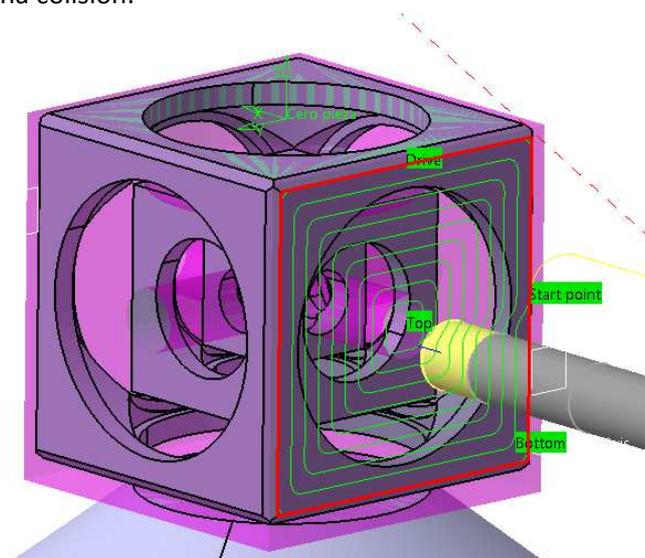


**Figura 72.** Análisis material remanente cajeadado II

#### 6.1.4. Fase II: Planeados II-V y cajeados III-X

Realizadas todas las operaciones de cajeadado y planeado pertinentes de la cara superior del cubo, realizaremos las mismas operaciones en el resto de caras, salvo las operaciones de planeado que diferirán de la inicial en el número de pasadas, como en el punto de entrada a realizar el planeado.

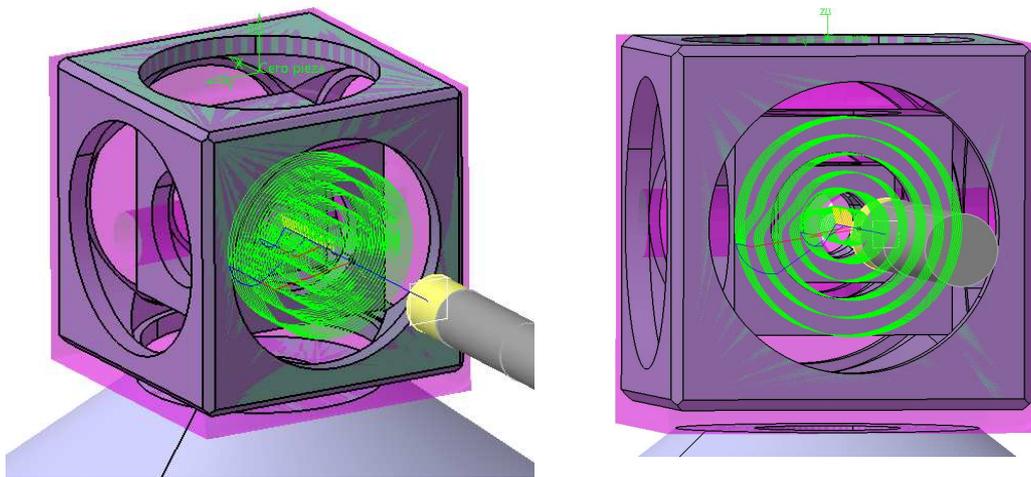
Profundizando en el primero de los planeados laterales, hemos de comentar que este dispondrá de las mismas características de mecanizado, parámetros de corte y macros de acercamiento/retirada de la herramienta que el planeado anterior, no siendo de nuevo comentados para no ser repetitivos. A parte de la modificación realizada con respecto al número de pasadas, la cual ha sido reducida a una única pasada axial debido al pequeño sobreespesor de 0.5 mm que presentan las caras laterales, también se ha estudiado y modificado el punto por donde se iniciará la macro de acercamiento tangencial de la herramienta ante la posibilidad de que se produzca alguna colisión.



**Figura 73.** Trayectorias planeado II

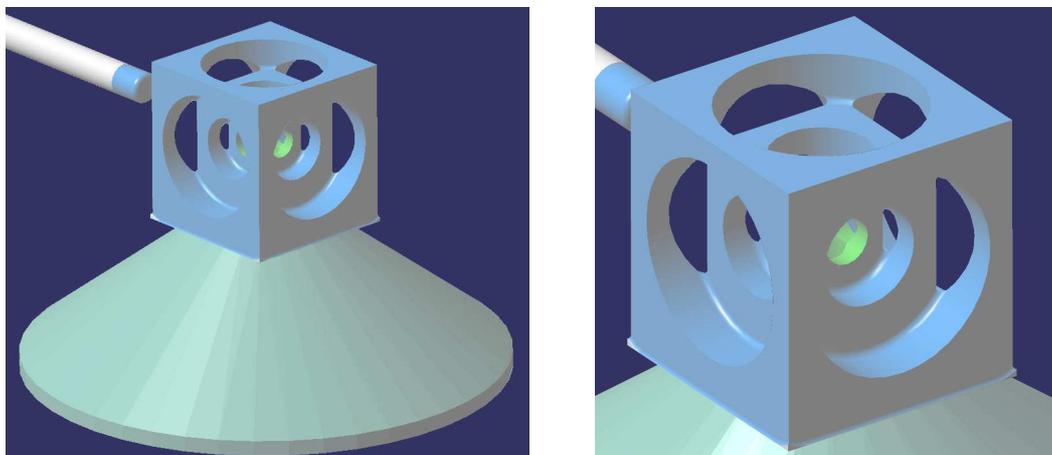
Como se puede observar en la figura anterior, la entrada tangencial de la herramienta no podría ser realizada por la parte inferior de las caras laterales, ya que se produciría una colisión entre la herramienta y el útil de base cónico, siendo por ello ubicada la entrada en una de las aristas laterales de la cara lateral. Finalmente comentar que para evitar el problema de colisión citado durante el planeado, se ha limitado la zona a planear por la cara de la pieza diseñada y no de la cara lateral de la preforma, de ahí que el contorno rojo sea coincidente con el de la pieza y no con el exterior de la cara de la preforma.

En lo que respecta a los cajeados de esta primera cara lateral, ambos cajeados de la cara superior han sido copiados a dicha cara, es decir, la trayectoria de la herramienta, parámetros de corte, características del mecanizado... mediante el empleo de la herramienta denominada *Copy Transformation Instruction*. Para realizar dicha copia se han seleccionado de forma cronológica los cajeados I y II para posteriormente copiarlos y girarlos 90° con respecto al eje del agujero de la cara lateral alterna, consiguiendo lo mostrado a continuación.



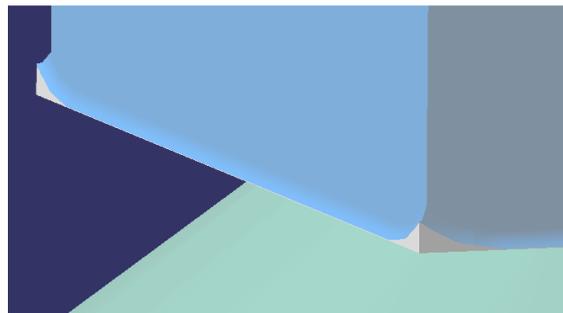
**Figura 74.** Trayectorias cajeados III y IV

El planeado y los cajeados de las caras restantes a mecanizar se definirán de la misma forma que los cajeados anteriores, es decir, apoyándonos en la función *Copy Transformation Instruction* seleccionaremos todas las operaciones de mecanizado realizadas en la primera cara lateral del cubo, para posteriormente copiarlas y girarlas tantas veces como caras laterales queden por mecanizar, todo ello con respecto al eje vertical que atraviesa al cubo por su centro.



**Figura 75.** Resultado planeados y cajeados laterales

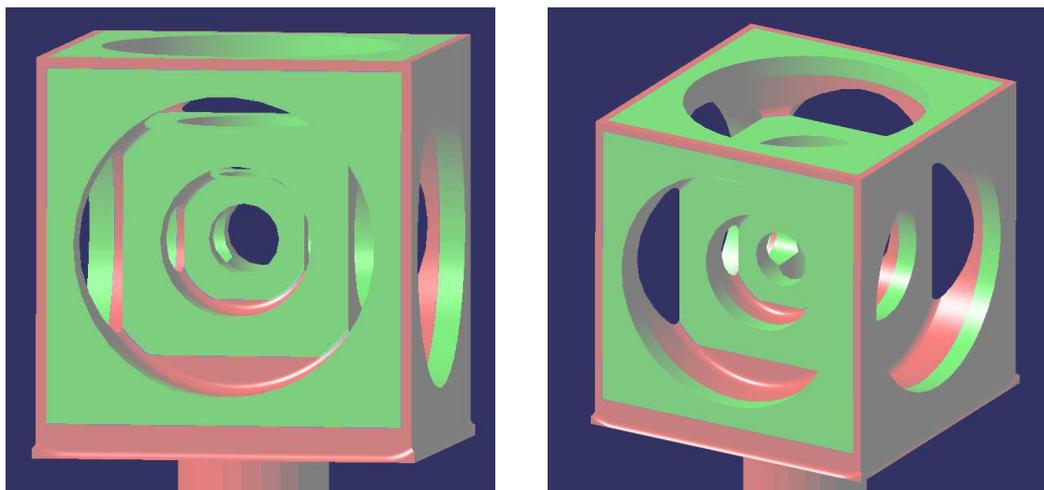
Como se ha podido observar en los resultados de la simulación, las trayectorias de la herramienta están correctas al no producirse ningún tipo de colisión entre la herramienta y la pieza. Sí nos fijamos en la figura anterior de la derecha podremos ver que los cubos se encuentran unidos, además de por la base inferior la cual será mecanizada en el segundo amarre, por las esquinas de estos, siendo separados los cubos de las esquinas a continuación mediante el mecanizado con la fresa de ranurar. Por último comentar que en las esquinas inferiores del cubo exterior encontramos pequeñas protuberancias de material no mecanizado por el hecho de cómo ha sido definida la trayectoria de la herramienta durante el planeado lateral. Como ya se ha comentado, por no arriesgarse a generar una posible interferencia, la trayectoria del planeado se ha sujeto al contorno de la pieza y no al de la preforma.



**Figura 76.** Protuberancias en la base de la pieza durante amarre A

Estas pequeñas protuberancias no son ningún inconveniente, ya que se encuentran localizadas sobre el material a eliminar durante el planeado del segundo amarre, por lo que aunque no sean eliminadas ahora, posteriormente lo serán.

En lo que respecta al análisis del material remanente, observamos que todos los planeados laterales son correctos al no haber ninguna cresta de material, salvo en las esquinas de la base de la pieza por el motivo ya comentado. También podemos identificar en rojo todas las aristas exteriores de la pieza, lo cual es debido al material sobrante ubicado en los chaflanes de las aristas.



**Figura 77.** Análisis material remanente planeados y cajeados laterales

En lo que respecta a las geometrías afectadas durante las operaciones de mecanizado presentes, encontramos que están correctas, es decir, las superficies de los cubos, como todos los diámetros de los diferentes agujeros se encuentran de color verde, es decir, acordes a los

requerimientos dimensionales del diseño, pudiendo afirmar el correcto diseño de los cajeados y planeados laterales.

### 6.1.5. Fase II: Chaflanados I-VII

Antes de cambiar la herramienta para realizar los ranurados, acometeremos los chaflanes de las aristas del cubo que se puedan realizar en este primer amarre. Se trata de una operación de gran complejidad, sobretodo de los chaflanes de las aristas laterales, por la proximidad de la herramienta al utillaje cónico durante el mecanizado.

Primeramente realizaremos los chaflanes de las aristas de la cara superior, siendo mecanizados por los filos de corte de la periferia de la herramienta. Para ello seleccionaremos la operación de *Multi-Axis Curve Machining* en el software CAD/CAM, donde definiremos la trayectoria a seguir por la herramienta y la inclinación o posición de esta con respecto al mecanizado. En nuestro caso, para conseguir que las esquinas sean mecanizadas de acuerdo al diseño, iremos programando y mecanizando arista por arista, en lugar de todas seguidas, ya que en este último caso al cambiar de dirección la herramienta redondearía las esquinas. Por ello seleccionamos como curva conductora una de las aristas de la cara y fijamos que la herramienta se desplace tangencialmente a la superficie del chaflinado.

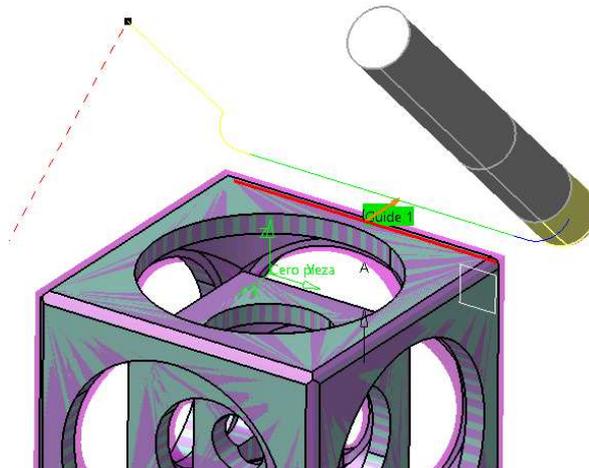
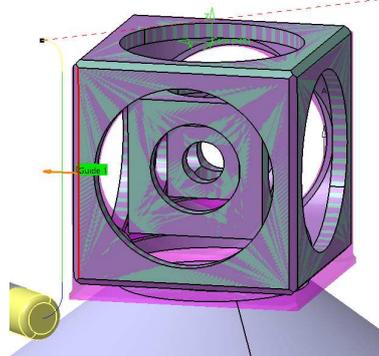


Figura 78. Trayectoria herramienta del chaflinado I

Por otro lado, como ha sido seleccionado la arista inferior del chaflinado, la cual no llega hasta el final del lado del cubo, se introducirá tanto en la macro de entrada como de salida de la herramienta un alargamiento rectilíneo de la trayectoria de unos 2.5 mm más, para posteriormente salir tangencialmente en la retirada de la herramienta y entrar tangencialmente también al iniciar el mecanizado. La macro de entrada se iniciará desde el plano de seguridad, mientras que la de salida no al estar próxima la herramienta al inicio del mecanizado del siguiente chaflinado.

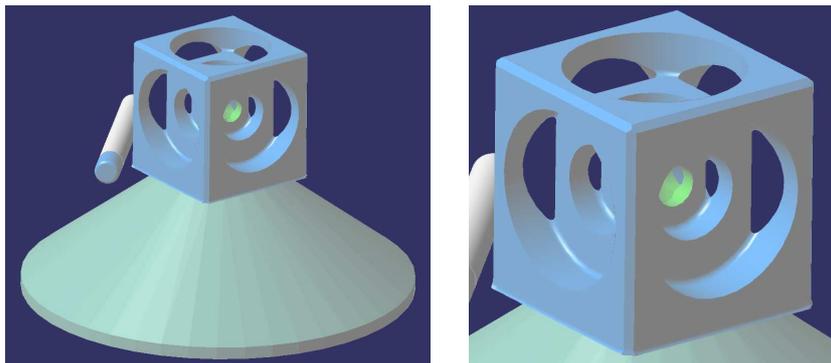
Con respecto a los parámetros de corte, estos serán los mismos que los empleados durante los cajeados y planeados por tratarse de la misma herramienta, así como de una operación de mecanizado similar, es decir, mecanizado lateral. En lo que respecta al sentido de mecanizado, este será en concordancia para evitar introducir vibraciones en la pieza, obtener un mejor acabado superficial y evitar el bruñido de la superficie. El resto de chaflanados de la cara superior, serán realizados mediante la copia y giro del chaflán anteriormente definido, girando dichas copias con respecto al eje vertical que atraviesa al cubo por el agujero central.

En lo que respecta a los chaflanados de las aristas laterales, estos presentan una trayectoria de herramienta idéntica al caso comentado, salvo que estos serán realizados siempre desde la cara de la superficie hasta la base del cubo para evitar posibles colisiones con la base cónica del utillaje. Al igual que en el caso anterior, definido uno de los chaflanes, el resto se obtendrán mediante la copia y giro del chaflán lateral tantas veces como aristas haya por mecanizar.



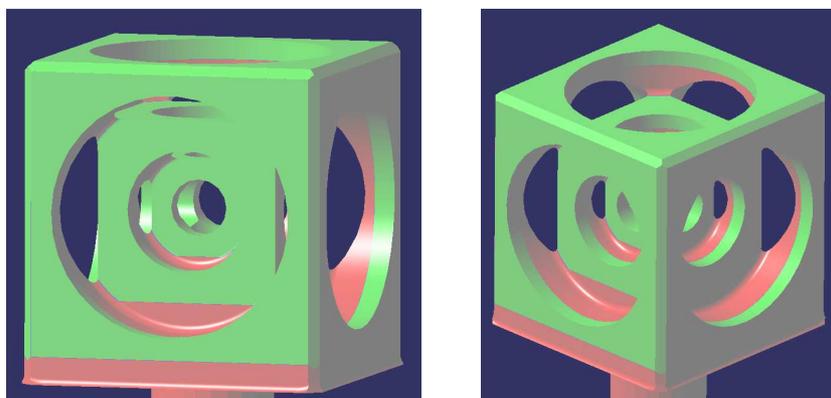
**Figura 79.** Trayectoria herramienta chaflanado lateral

Analizando la simulación y los resultados del mecanizado de los chaflanes, observamos que tanto los chaflanes de la cara superior, como los ubicados en las aristas laterales, han sido realizados sin ningún contratiempo, siendo además eliminado cierto material de las protuberancias dejadas durante los planeados laterales de la pieza.



**Figura 80.** Resultado acumulativo del mecanizado tras los chaflanados

Comparando el análisis de material remanente con el obtenido en la operación de mecanizado anterior, observamos que las zonas rojas ubicadas en las aristas de la pieza han desaparecido, estando dichas zonas de acuerdo a los requisitos dimensionales del diseño por encontrarse dentro de la tolerancia de mecanizado.



**Figura 81.** Resultado análisis de material remanente tras chaflanado

### 6.1.6. Fase III: Ranurados I-X

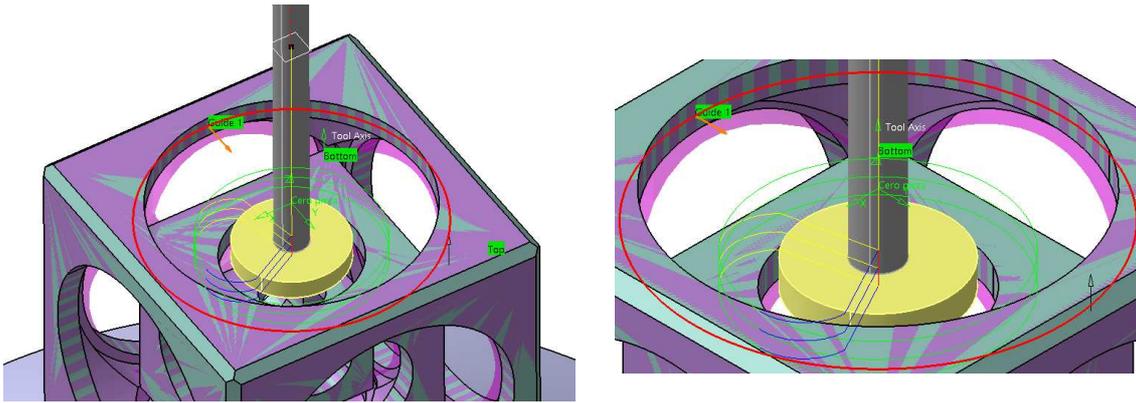
Para completar todas las operaciones de mecanizado de este primer amarre, realizaremos los ranurados existentes entre las caras del cubo superior e intermedio y entre los cubos intermedios e inferiores, consiguiendo romper la unión existente de los cubos por sus esquinas. Para diferenciar los ranurados a realizar, hemos de comentar que los ranurados superiores serán denotados por números impares, mientras que los inferiores por números pares.

Para la realización de esta operación de mecanizado solamente contamos con una fresa de ranurar de 16.5 mm de diámetro y de altura de dientes de 3 mm (Tabla 2, herramienta 7). A pesar de tener un gran diámetro, se considera apta para la realización del ranurado del agujero de 20 mm de diámetro, siempre y cuando, se tenga mucho cuidado al introducir la herramienta en el interior de los cajeados. Como ya se comentó en el apartado 3.5.2, este tipo de herramientas carecen de filos de corte en su zona frontal, siendo por ello que previamente se haya realizado el vaciado de los agujeros. Además, debido a tal geometría podremos encontrarnos posibles crestas en las zonas periféricas de las superficies de los cubos interiores al no quedar las zonas ranuradas enrasadas con las del cajeadado. En lo que respecta al material de la herramienta, este se trata de acero de alta velocidad, estando limitado a ser empleado en operaciones de mecanizado de convencionales ante la posibilidad de rotura o desgaste prematuro de la herramienta en operaciones de mecanizado de alta velocidad.

Por lo que teniendo en cuenta lo comentado en el párrafo anterior y del tipo de operación que se trata, no podrán realizarse los cajeados como mecanizado de alta velocidad. Así pues, los parámetros de corte a emplear serán los recomendados por el fabricante [18] para dicha herramienta, los cuales dependerán del material que vaya a ser mecanizado, siendo en nuestro caso recomendado una velocidad de corte de 100 m/min con un avance por diente de 0.025 mm/diente. Realizando los cálculos respectivos, los cuales se encuentran recogidos en el Anexo III, identificamos que el número de revoluciones se encontrarán alrededor de 1929 rpm con una velocidad de avance de 482.3 mm/min, suponiendo todo ello una potencia de corte de 0.158 kW. Si analizamos la viabilidad de la operación con respecto a los límites de la máquina (Tabla 2), observaremos que estos son bastante inferiores a dichos límites, siendo la operación tolerable por parte de la máquina.

Para la realización del ranurado superior, primeramente introduciremos la herramienta desde el plano de seguridad hasta el primer nivel del ranurado de forma perpendicular y por el centro del agujero, para posteriormente desplazarse horizontalmente en el primer nivel del ranurado e iniciar el mecanizado con una entrada de herramienta de forma tangencial, evitando así entradas bruscas de la herramienta.

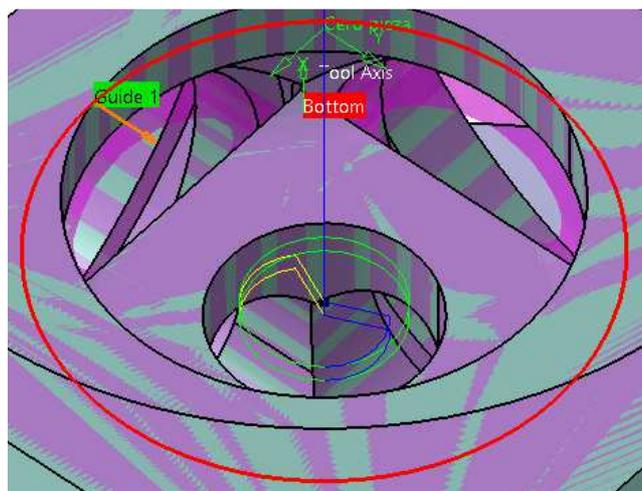
Seguidamente, definiremos que cada vez que sea realizada una pasada o completado el mecanizado de un nivel del cajeadado, la herramienta sea retirada de nuevo al centro del agujero de forma tangencial, para volver a penetrar al siguiente nivel de la misma forma que al inicio. Todo ello se conseguirá mediante la definición de las macros denominadas *Return between levels Approach/Retract*.



**Figura 82.** Trayectoria herramienta ranurado I

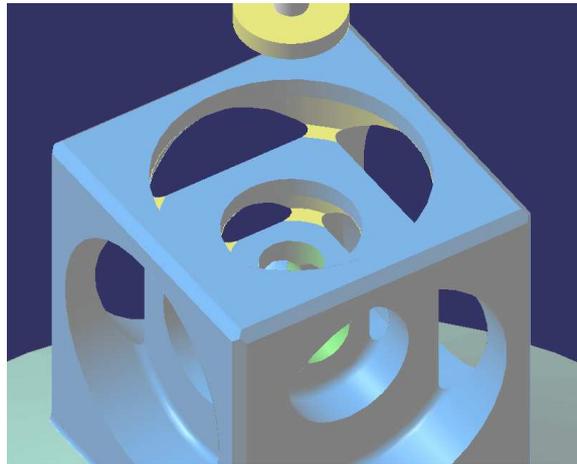
Debido a que la herramienta posee un gran diámetro y una capacidad de penetración radial superior a 1.5 mm, solo será necesario realizar una única pasada por nivel del ranurado. En lo que respecta a las características de este, se fijará que el ranurado se realice desde los niveles superiores a los inferiores, con camino cerrado y un porcentaje de sobre vuelta del 50% del diámetro de la herramienta, es decir, la pasada del ranurado no terminará hasta que la herramienta llegue y supere al punto de donde se comenzó en un 50% de su diámetro. La dirección de corte será de nuevo fijada *en concordancia* para evitar introducir vibraciones en la pieza, obtener mejor acabado superficial y evitar el bruñido. Al poseer la herramienta una altura de filos de corte de 3 mm, deberán de realizarse hasta tres pasadas según su altura en el caso del cajeadado superior y de dos pasadas en el cajeadado inferior.

Finalizado el ranurado superior, la herramienta se dejará ubicada en el fondo y centro del agujero, siendo retirada del contorno del ranurado de forma tangencial. El colocar la herramienta en dicha posición es para facilitar la penetración para el segundo ranurado. En este ranurado, las características de mecanizado, los parámetros de corte, así como las macros de entrada y de transición entre niveles serán completamente idénticas, salvo la retirada de la herramienta, la cual será llevada hasta el centro del agujero inferior para posteriormente recogerla de forma perpendicular hasta el plano de seguridad.



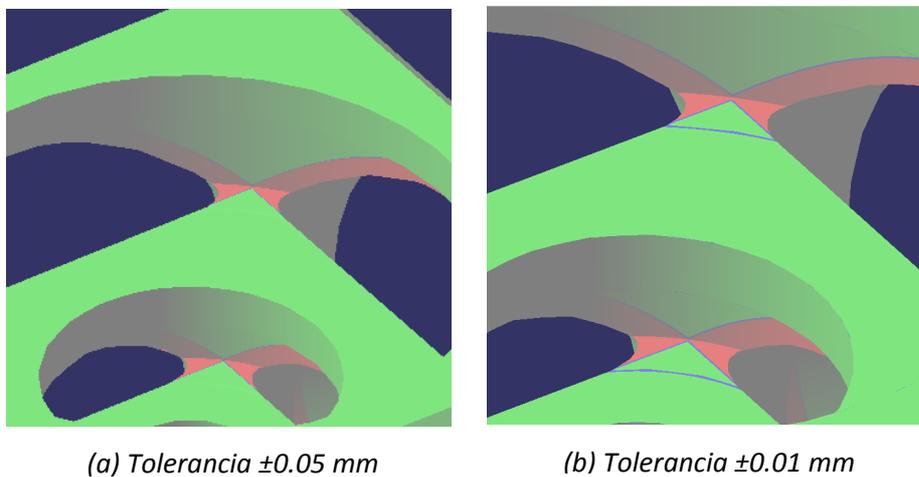
**Figura 83.** Trayectoria herramienta ranurado II

Siendo el resultado acumulativo y de los dos ranurados realizados el mostrado en la figura siguiente. Como podemos observar, los voladizos (Zona color amarillo) han sido realizados correctamente, sin que se produzca ninguna colisión de la herramienta al penetrar/extraer.



**Figura 84.** Resultado acumulativo de los cajeados I y II

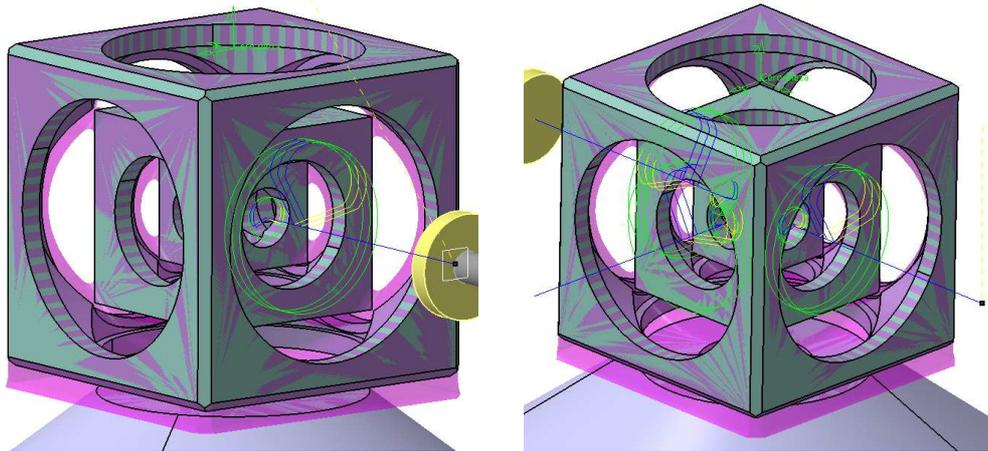
Sí realizamos el análisis de material remanente para observar las posibles marcas o crestas que haya podido dejar la herramienta, encontramos que para una tolerancia de  $\pm 0.05$  mm respecto a las dimensiones de diseño de la pieza, el mecanizado del ranurado superior e inferior estarían comprendidos dentro de dicha tolerancia. Ahora bien, si reducimos la tolerancia a  $\pm 0.01$  mm, comenzaremos a observar ciertas marcas en las superficies de los cubos intermedios e inferiores que están fuera de tolerancia, siendo dichas marcas debidas a la geometría que posee nuestra herramienta. En el caso de que la herramienta tuviera filos de corte en su zona frontal, difícilmente podrían haberse generado dichas marcas.



**Figura 85.** Resultados análisis material remanente cajeados I y II

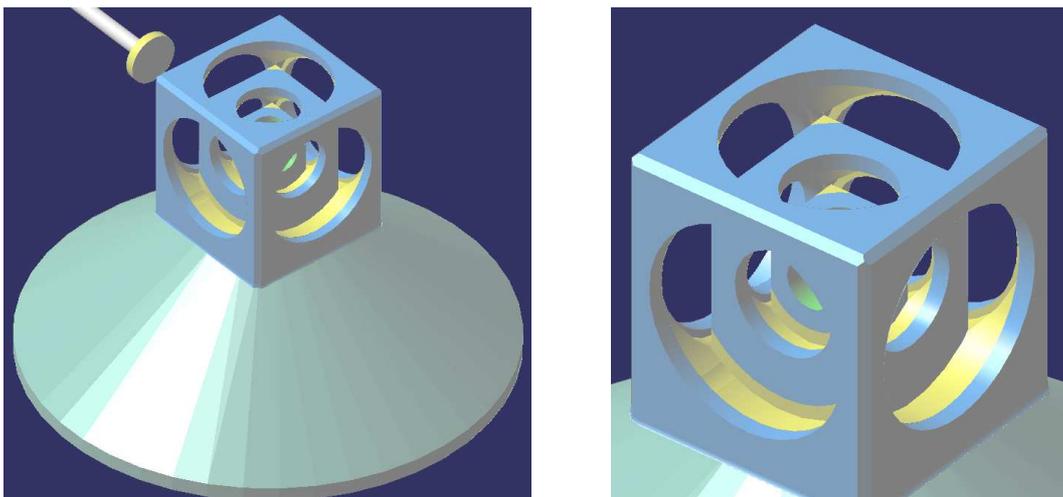
Las marcas de material sobrante mostradas, no presentan importancia alguna al ser de muy pequeñas dimensiones, es decir, del orden de centésimas de milímetro, no suponiendo un problema para el ensamblaje del útil en la pieza e imperceptibles por parte de los equipos de medida a utilizar, los cuales solamente llegan hasta la media centésima. Por todos estos motivos consideramos correctos las operaciones de ranurado diseñadas.

Con respecto a los ranurados del resto de las caras laterales, estos serán completamente idénticos en todos los aspectos a los ranurados comentados, siendo definidos mediante la copia de los ranurados iniciales y posteriormente girados. Primeramente, la copia será realizada de los ranurados iniciales, de tal forma que mediante la función *Copy Transformation Instruction* seleccionaremos y copiaremos dichas operaciones, para posteriormente girarlas  $90^\circ$  con respecto al eje Y, siendo de esta forma definidos los primeros ranurados de una cara lateral. Finalmente repetiremos la misma función, pero esta vez giraremos las copias con respecto al eje Z, es decir, con respecto al eje que atraviesa la pieza verticalmente por el centro de los agujeros. Con respecto a las figuras, las trayectorias de los ranurados en la primera cara lateral se pueden observar en la figura de la izquierda, mientras que en la de la derecha se observan el resto.



**Figura 86.** Trayectorias herramienta ranurados laterales III-X

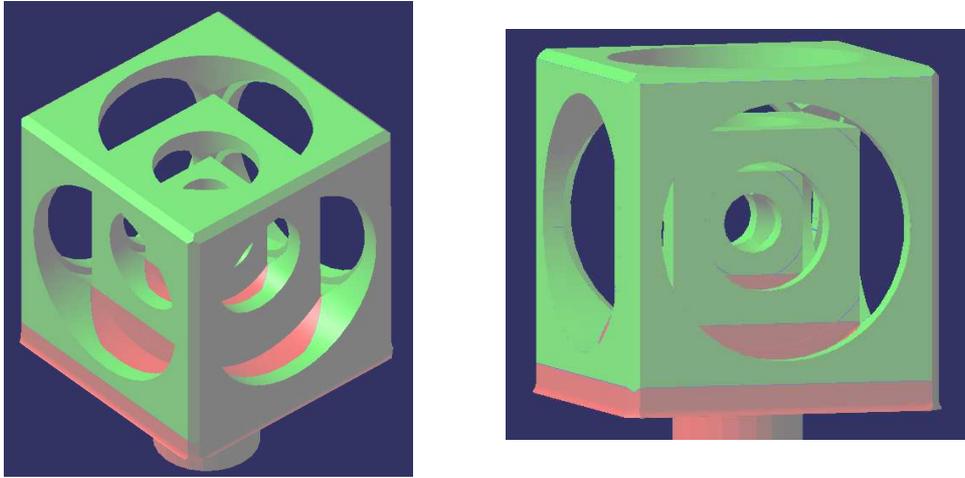
En el resultado final completo del primer amarre, podemos observar que todos los cubos han quedado sueltos, salvo por sus respectivas bases, distinguiendo desde las zonas realizadas por la fresa de ranurar en color amarillo, hasta las zonas donde se ha empleado la broca helicoidal en color verde, pasando por las zonas de color azul, referidas a las operaciones de planeado y cajeado con la fresa toroidal. Además en las siguientes imágenes, se podrán observar perfectamente los diferentes voladizos realizados durante los ranurados.



**Figura 87.** Resultados acumulativos ranurados laterales

Paralelamente, durante la simulación del resultado final no se ha obtenido ninguna posible colisión, ni movimiento extraño de la herramienta, siendo la trayectoria y los parámetros de

mecanizado correctos. Con respecto al análisis del material remanente, toda la pieza se encontraría dentro de tolerancia de material sobrante, una tolerancia fijada en torno a  $\pm 0.01$  mm, salvo las marcas comentadas anteriormente. Por otro lado, solamente quedará en rojo aquellas zonas que faltan por mecanizar, las cuales serán realizadas en el segundo amarre.

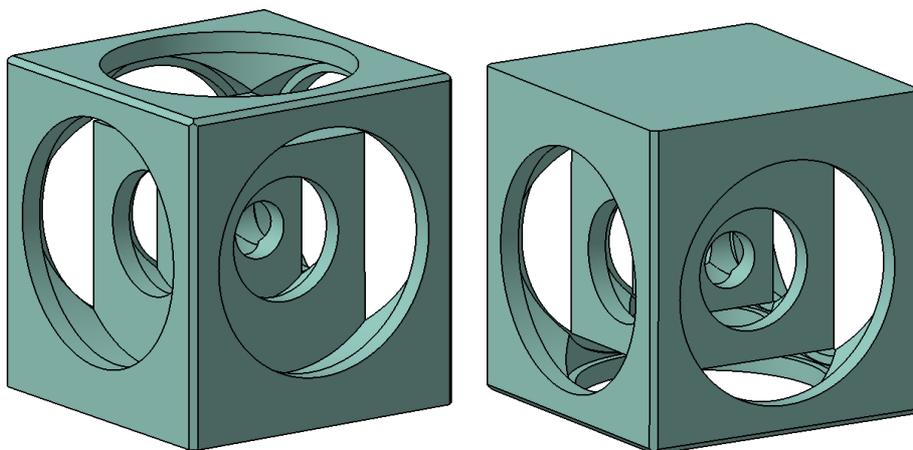


**Figura 88.** Análisis de material remanente cajeados III-X

## 6.2. MECANIZADO AMARRE B

Este segundo y último amarre permitirá mecanizar la cara restante de nuestra pieza, siendo necesario para ello el empleo del utillaje diseñado, el cual además de actuar de tetón para la sujeción de la pieza, ya que las caras mecanizadas carecen de ello, inmovilizará por completo el resto de cubos alojados en el interior mientras se esté mecanizando.

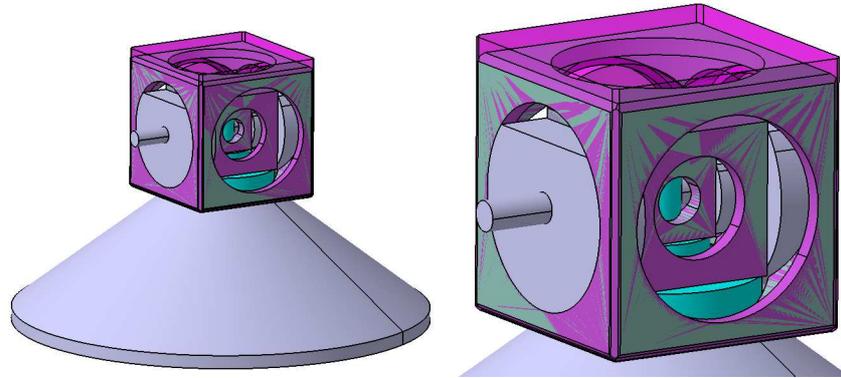
En el presente amarre, a la preforma empleada inicialmente le será eliminado mediante una sierra de corte el tetón que posee en su base con el objetivo de evitar tener que mecanizarlo también. De esta forma, la preforma o más bien dicho, la pieza intermedia del primer amarre se caracterizará por poseer un sobreespesor en una de sus caras de 3.175 mm, idéntico al dejado en el caso del primer amarre, mientras que por el contrario ningún sobreespesor en las caras laterales.



**Figura 89.** Diferentes vistas pieza intermedia para amarre B

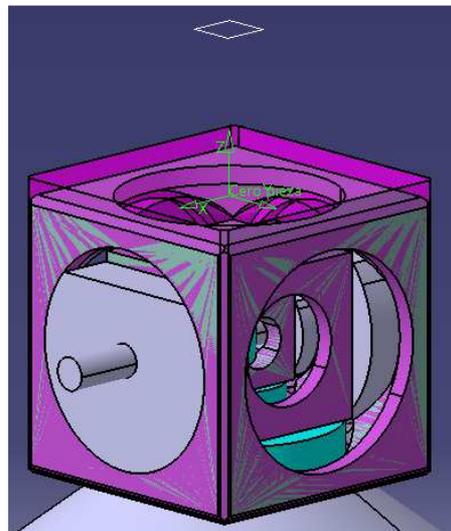
Seguidamente se instalara el utillaje en la pieza intermedia, lo cual consistirá en montar los negativos en caras laterales alternas y simétricas, para posteriormente instalar el cuerpo del útil

en una de las caras contiguas y perpendiculares a los negativos, siendo por último pasado por cada una de las piezas del utillaje el eje pasante que mantendrá unido todo el conjunto. El utillaje en sí, será sujeto a la máquina por su tetón inferior mediante el útil de base cónica. En la figura siguiente es mostrado lo comentado, además de la pieza de forma superpuesta en el interior de la preforma intermedia para hacerse una idea del material a remover.



**Figura 90.** Conjunto pieza-utillaje amarre B

Para este segundo amarre definiremos también un plano de seguridad, el cual se ubicará de forma paralela a la cara superior del cubo a 30 mm de esta, lo cual nos servirá de apoyo para diseñar las salidas de las herramientas de la pieza. Por otro lado, definiremos también el punto de referencia del mecanizado, el conocido como cero pieza, estando este ubicado en la superficie superior de la pieza y justamente en el centro del círculo de mayor diámetro, quedando a 3.175 mm respecto de la superficie de la preforma. En la figura siguiente se puede observar tanto el plano de seguridad, como el punto de referencia.



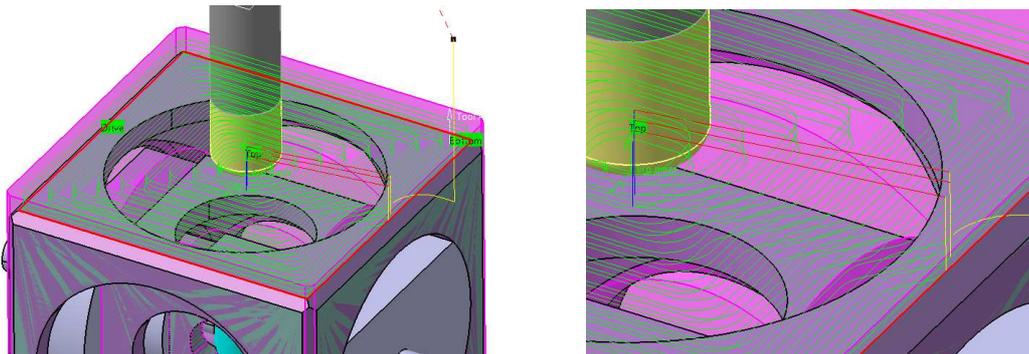
**Figura 91.** Plano de seguridad y punto cero pieza intermedia en amarre B

En lo que respecta a las operaciones de mecanizado a realizar en este segundo amarre, todas ellas serán citadas y resumidas en la hoja de procesos del Anexo IV, caracterizándose prácticamente por ser idénticas a las del primer amarre, salvo ciertas trayectorias de penetración de la herramienta durante los cajeados al no realizarse taladrado alguno. El hecho por el cual no se ha realizado el taladro, se debe a que el primer taladro realizado en la pieza se diseñaría con una cierta profundidad que llegaría a sobrepasar completamente al cubo inferior con el objetivo de asegurarnos que posteriormente pudiera ser montado el cuerpo del utillaje en su interior. Ahora bien, al haber realizado dicho taladro tan profundo, el agujero de cara a

cara del cubo inferior quedaría realizado completamente, no siendo necesario taladrar en este segundo amarre, lo cual además supondría un cierto riesgo, ya que la broca quedaría relativamente cerca del cuerpo del utillaje al taladrar. Así pues, teniendo en cuenta toda la información anterior, las operaciones definidas y sus respectivas justificaciones en este segundo amarre son mostradas a continuación.

### 6.2.1. Fase I: Planeado VI

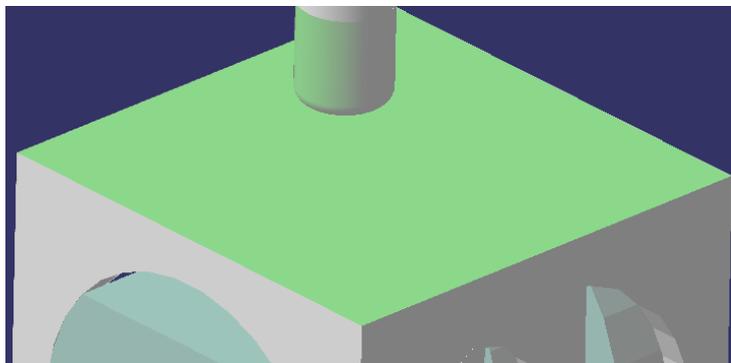
El planeado de este segundo amarre se caracteriza por ser idéntico al planeado inicial comentado, tanto en las características del mecanizado, es decir, en el sentido del mecanizado, en la suavización de los cambios de dirección al mecanizarse en alta velocidad, las trayectorias de mecanizado, entrada y salida de la herramienta... así como en lo que respecta a los parámetros de corte.



**Figura 92.** Trayectorias herramienta planeado VI

Sin embargo, al no haber taladro en la zona central de la cara, la retirada de la herramienta no será definida, ya que no es necesario mover la herramienta a un determinado punto para entrar axialmente como en los planeados anteriores. Así pues, la herramienta quedará ubicada en el punto final del planeado, para posteriormente desplazarse hasta el punto inicial donde se comenzará la entrada helicoidal en el cajeadado. Comentar también, que no se realizará pasada de acabado, ya que al mecanizar a alta velocidad, los parámetros de corte serán favorables para obtener una superficie de gran acabado superficial.

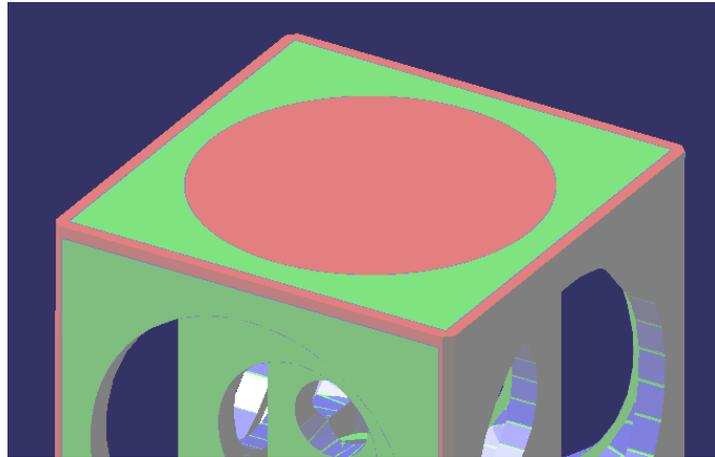
En lo que respecta al resultado del planeado y del análisis del material remanente, hemos de comentar que estos apenas difieren de lo mostrado en las operaciones de planeado anterior, no presentando crestas, ni zonas sin mecanizar por la herramienta.



**Figura 93.** Simulación intermedia y final del planeado VI

Por otro lado, el análisis de material remanente sería completamente positivo al encontrarse toda la zona de la cara exterior del cubo en color verde, es decir, dentro de tolerancia de

mecanizado y acorde a los requerimientos dimensionales de la pieza. Tanto la zona central, como las aristas del cubo se encuentran en color rojo, ya que son zonas a mecanizar donde la cantidad de material a eliminar es alto.

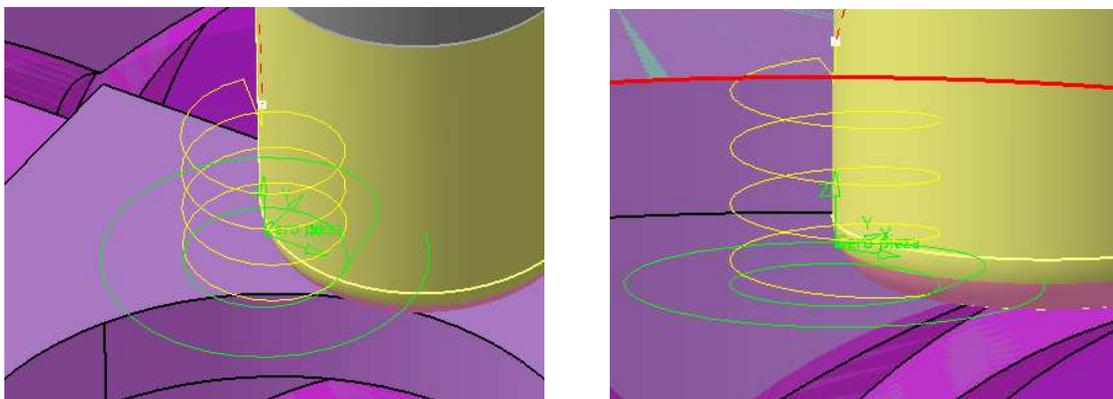


**Figura 94.** Análisis material remanente planeado VI

### 6.2.2. Fase I: Cajeados XI-XII

Los cajeados del presente amarre diferirán de los anteriores solamente en lo que respecta a la trayectoria de la herramienta al penetrar en el material por el hecho de no haber taladro central, siendo el resto de características del mecanizado, como parámetros de corte idénticos a lo de los casos anteriores.

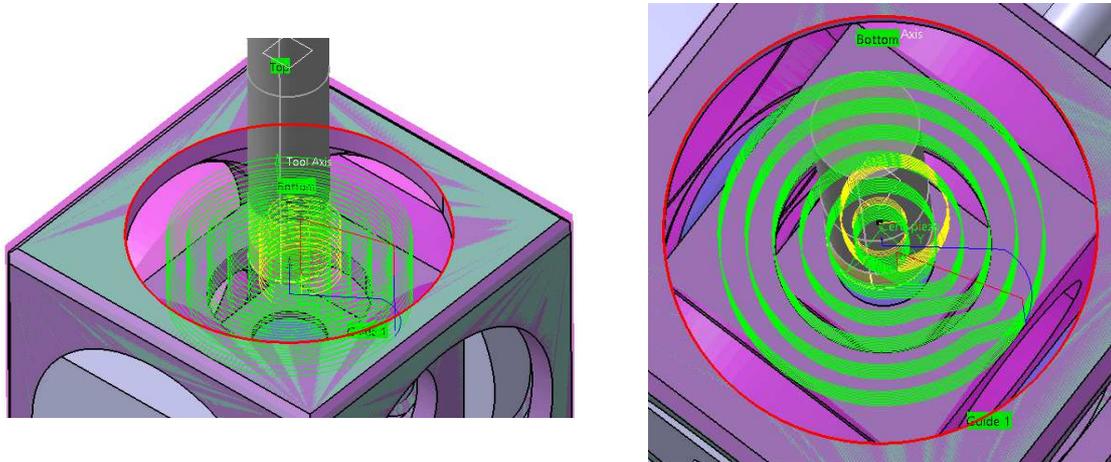
Al no haber taladro en la zona central, el hacer penetrar de forma axial la fresa en el material supondría una forma innecesaria de producir un posible desgaste prematuro, así como un sufrimiento mecánico excesivo de la fresa. Aunque dicha forma de penetrar podría ser realizada por la herramienta, ya que cuenta con un filo de corte en la zona frontal de lado a lado, es mucho más favorable ir introduciendo la herramienta progresivamente de forma lateral en el material, o bien, de forma helicoidal al repartir las fuerzas de corte entre los filos de corte frontales y periféricos. En nuestro caso, seleccionaremos que la penetración sea realizada de forma helicoidal, es decir, mediante un tirabuzón de diámetro 10 mm, con una altura máxima de 5 mm y 5° de inclinación entre pasadas.



**Figura 95.** Trayectoria entrada helicoidal cajeados XI

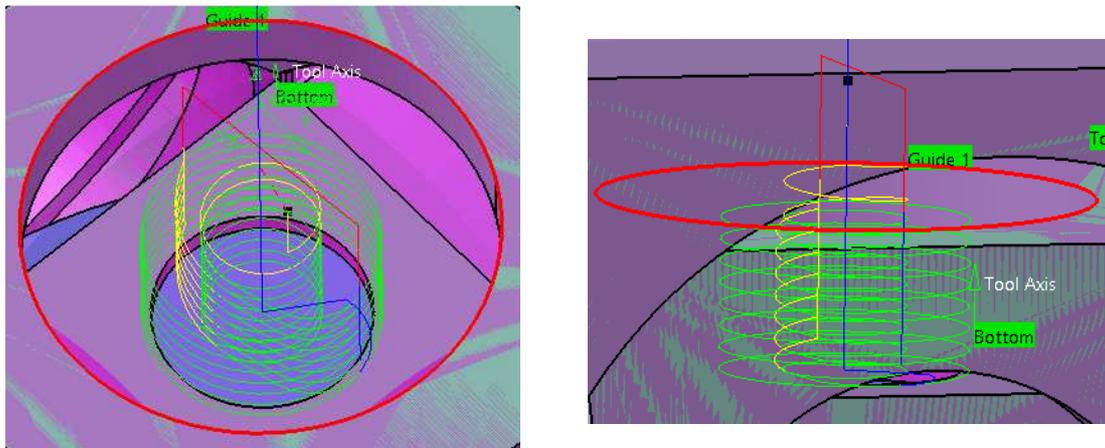
Una vez iniciado el mecanizado del cajeados, entre pasadas a diferentes niveles también se fijara que la penetración de la herramienta sea realizada de forma helicoidal, pero en este caso con

una altura por tirabuzón de 2.5 mm, reduciéndolo así para evitar que la herramienta este desplazándose en vacío. Finalmente, al terminar el cajeado, la herramienta será alejada del contorno del agujero de forma tangencial hasta colocarse en el centro y fondo del mismo, para comenzar posteriormente el siguiente cajeado.



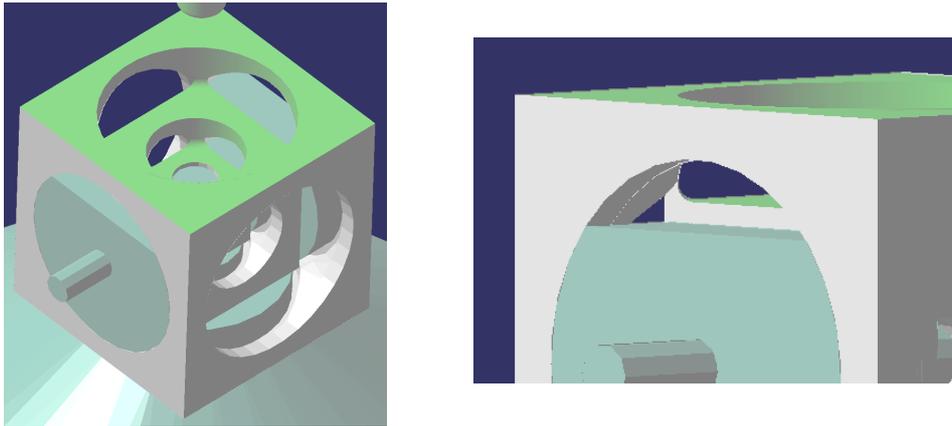
**Figura 96.** Trayectoria herramienta cajeado XI

Para la realización del cajeado inferior el proceso a seguir será el mismo, salvo que al finalizar la operación, la herramienta será retirada del contorno del cajeado de forma tangencial, de tal forma que una vez ubicada en el centro del mismo, esta será retirada de la pieza perpendicularmente hasta el plano de seguridad.



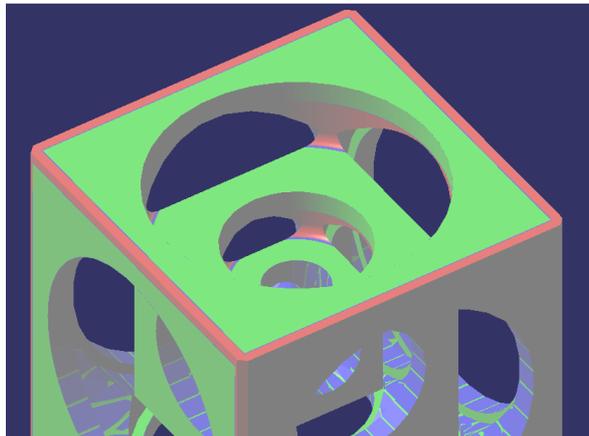
**Figura 97.** Trayectoria herramienta cajeado XII

Al observar el resultado final de los cajeados, vemos el taladro inicialmente realizado, comprendiendo perfectamente la innecesidad de realizar un taladro en la zona central del presente amarre. Además podemos comprender porque los negativos del utillaje presentan ciertas caras paralelas a la cara superior de la pieza, pero desfasadas hacia dentro cierta distancia, ya que al realizarse ambos cajeados podrían darse colisiones entre el útil y la herramienta, sobre todo al mecanizar los fondos de estos.



**Figura 98.** Resultado acumulativo de los cajeados XI y XII

Realizando el análisis de material remanente, podremos ver que los cajeados han sido realizados correctamente y que solamente quedaría por realizar los chaflanados de las aristas y los ranurados para soltar por completo a los cubos, finalizando así el mecanizado de la pieza.



**Figura 99.** Análisis material remanente cajeados XI y XII

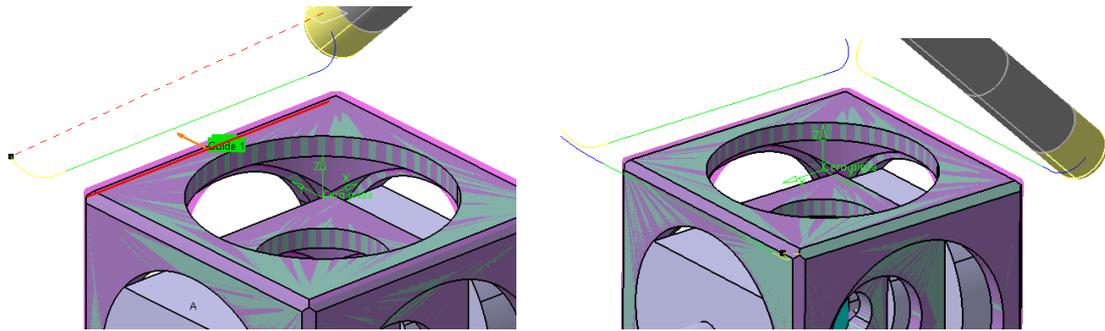
Las marcas que se pueden observar en color azul en el resto del cubo, no deben de preocupar ya que no están relacionadas con el mecanizado realizado, sino con el diseño de la pieza y su visualización en Catia al ser zonas que no se han mecanizado todavía en este amarre.

### 6.2.3. Fase I: Chaflanados IX-XII

Antes de cambiar de herramienta realizaremos los chaflanes de las aristas de la cara superior con el objetivo de no aumentar en tiempos muertos al cambiar continuamente de herramienta. Los presentes chaflanes a realizar serán abordados de la misma forma que se realizó en el primer amarre, es decir, de forma tangencial y mecanizados por la periferia de la herramienta, siendo los parámetros de corte y las características del mecanizado las mismas que las empleadas en las operaciones de planeado y cajeados anteriores.

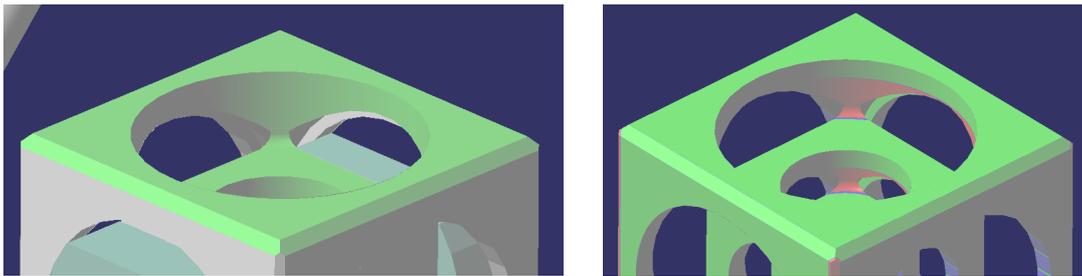
Como ya se comentó, los chaflanados serán realizados arista por arista y no de forma continua para evitar el redondeado de las esquinas, consiguiendo el diseño definido. Además, debido a que el último movimiento de la herramienta en el cajeados consiste en la traslación de esta al plano de seguridad, no será necesario fijar en la macro de entrada movimiento desde plano de seguridad. Mientras que por otro lado, en la macro de salida tampoco será necesario ya que al realizar una vez los chaflanados de la herramienta, esta será cambiada, siendo recogida

perpendicularmente en dirección Z y por tanto no requiriendo desplazarla hasta el plano de seguridad. Así pues, las trayectorias de la herramienta serán las mostradas a continuación.



**Figura 100.** Trayectorias herramienta chaflanes IX-XII

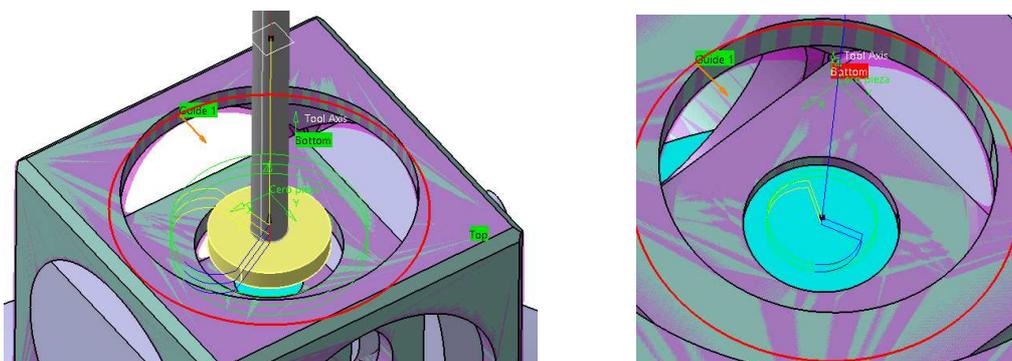
Analizando los resultados de la simulación en busca de posibles colisiones o mecanizados incorrectos ante los continuos cambios de posición que deben de realizarse para mecanizar los chaflanes, encontramos que estos son realizados de forma correcta. Además, de acuerdo al análisis de material remanente, podemos asegurar que los chaflanes han sido correctos ya que se encuentran dentro de tolerancia de mecanizado ( $\pm 0.01$  mm), siendo las zonas rojas que se observan, zonas de material a eliminar en la operación siguiente de ranurado.



**Figura 101.** Resultado y análisis material remanente tras achaflanado

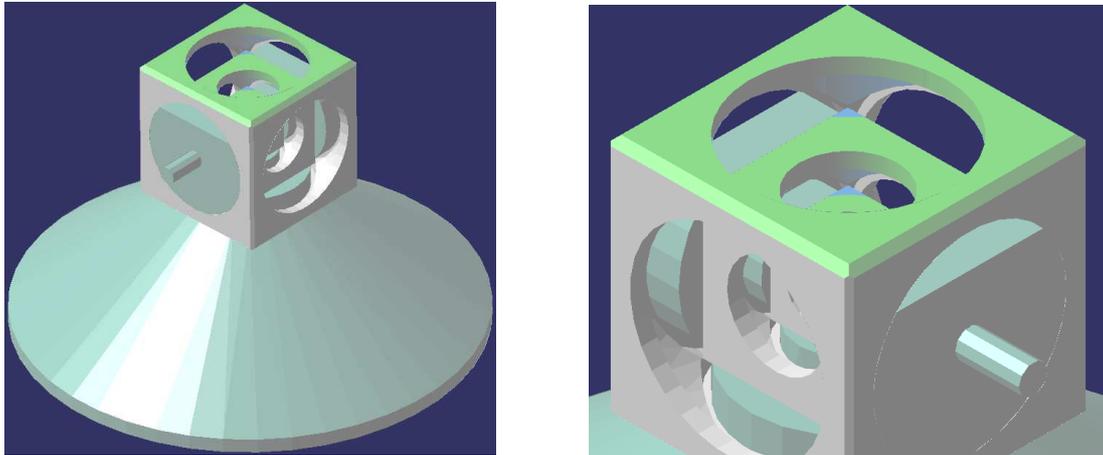
#### 6.2.4. Fase II: Ranurados XI y XII

Finalmente, para terminar el mecanizado de la pieza nos quedaría por realizar los ranurados, los cuales permitirán soltar por completo los cubos de la pieza y poner en práctica una de las funciones para las cuales ha sido diseñado el utillaje, la inmovilización de los cubos interiores de la pieza. Relacionando los presentes ranurados con los comentados anteriormente, estos se caracterizarán por ser exactamente iguales en todos los aspectos, no pudiendo añadir nada más de lo comentado anteriormente.

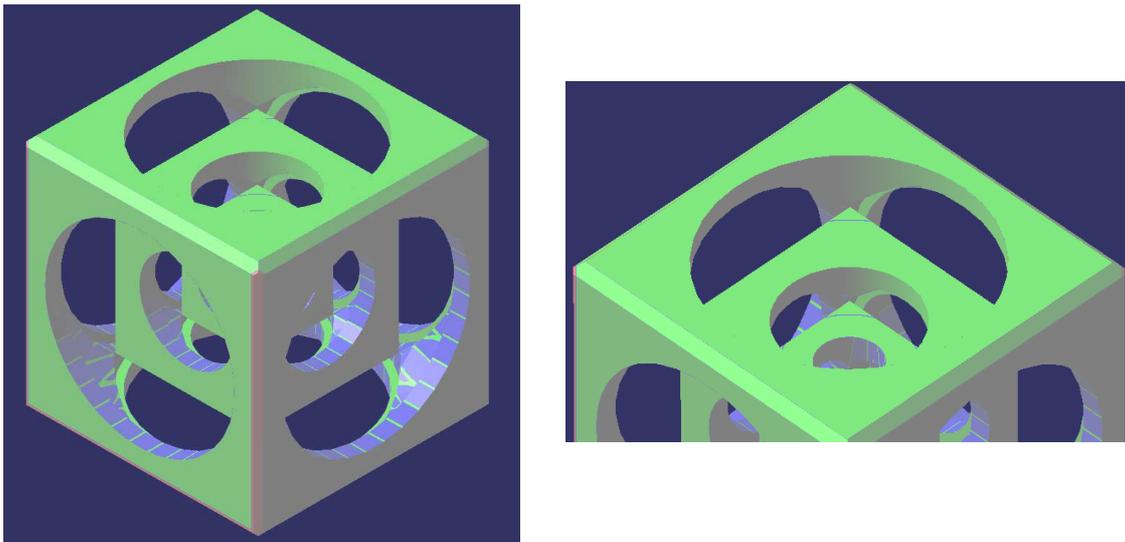


**Figura 102.** Trayectoria herramienta ranurados XI y XII

Con respecto al resultado, al ser acumulativo podremos observar como quedara la cara de la pieza mecanizada en el segundo amarre. Mientras que por otro lado, en el análisis de material remanente observamos que todo el mecanizado se encuentra dentro de tolerancia, excepto las marcas ya comentadas anteriormente sobre las crestas generadas entre las zonas mecanizadas por la fresa toroidal y la de ranurar. En general, no encontramos zonas rojas, ni rosas, indicativas de material sobrante o de mecanizado excesivo.



**Figura 103.** Resultado pieza final en amarre B



**Figura 104.** Resultados análisis material remanente.

Siendo reiterativos, hemos de comentar que las zonas de color rojo, como las zonas azules ubicadas en el resto de la pieza no deben de preocupar, ya que dichas zonas son referidas a las zonas no mecanizadas en el presente amarre, siendo teñidas de color azul en la simulación debido a la calidad de la representación del modelo en Catia, no aportando significado alguno. En caso de que se quiera estudiar las operaciones ubicadas en tales caras de la pieza, leer el apartado anterior referido al primer amarre.

## 7. POSTPROCESAMIENTO

Una de las fases esenciales del mecanizado programado mediante software CAD/CAM, consiste en la traducción de los movimientos diseñados de la herramienta, así como de los parámetros de mecanizado en códigos alfanuméricos que constituirán las instrucciones necesarias para gobernar la máquina-herramienta de acuerdo a lo fijado en el programa.

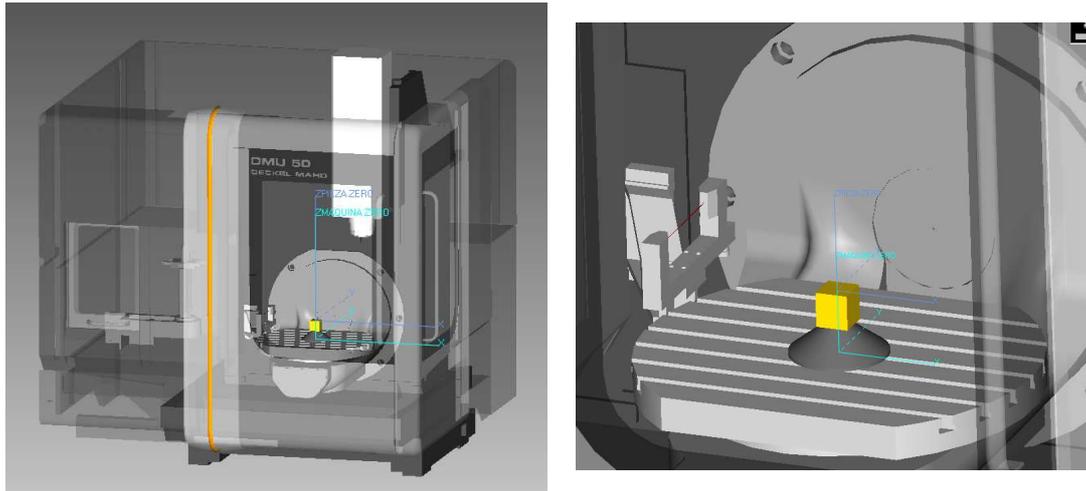
Esta transcripción de lo programado, la generación de las instrucciones de control, constituyen una pieza clave de cualquier sistema de Control Numérico Computarizado (CNC), ya que como se comentó al inicio de la presente memoria, esto supone el puente entre lo que queremos y como lo queremos mecanizar y la máquina que nos permita hacerlo realidad.

Dependiendo del software CAD/CAM que se emplee y del postprocesador que se tenga implementado en el, los códigos alfanuméricos a obtener procedentes de la transcripción de los movimientos, podrán ser de un tipo u otro. Así pues, encontramos software de CAD/CAM que generan directamente los códigos alfanuméricos en el lenguaje propio de la máquina a emplear, o bien, en un lenguaje predeterminado fijado por el fabricante del software, el cual suele ser en APT (Automatically Programmed Tool) o en código ISO, ambos conocidos internacionalmente. En nuestro caso, el software de CAD/CAM empleado, Catia V5, genera de forma predeterminada en lenguaje APT, pudiendo llegar a obtener el código en el lenguaje propio de la máquina, siempre y cuando, se tenga el postprocesador propio de la máquina implementada dentro de Catia. Debido a que nosotros carecemos de tal postprocesador implementado, el código a obtener será el dado de forma predeterminada por el programa, es decir, en lenguaje APT.

Por el contrario, la máquina a emplear, en nuestro caso la Mikron HSM 400U, solo es capaz de interpretar los códigos alfanuméricos propios del lenguaje conversacional Heidenhain, ya que su sistema operativo ha sido definido por la empresa citada, siendo el sistema de control que posee el iTCN 530 [10]. De acuerdo a lo comentado, observamos que el código obtenido del software CAD/CAM empleado no es soportado por nuestra máquina, siendo necesario postprocesar del lenguaje APT obtenido al lenguaje conversacional Heidenhain.

Para acometer dicha labor, recurrimos al empleo de un postprocesador universal y autoconfigurable, capaz de adaptarse a cualquier tipo de lenguaje y cinemática de la máquina a emplear, pudiendo ser además en cierta medida personalizado. Así pues, configurando dicho postprocesador de acuerdo al tipo de lenguaje deseado, a la cinemática propia de la máquina y apoyándonos en los diferentes comandos característicos del controlador, generaremos un postprocesador propio para la máquina que nos permita traducir de lenguaje APT a conversacional directamente.

Para asegurarnos que dicho postprocesador es correcto, ya que las probabilidades de error y por ende, las consecuencias de dichos errores catastróficos, realizaremos previamente múltiples pruebas, primeramente en un simulador y posteriormente en la propia máquina mecanizando en material blando. El simulador a emplear recreará la máquina en su conjunto, tanto la preforma, el utillaje, sistemas de referencia... siendo gobernada dicha máquina virtual mediante el código obtenido, lo cual nos permitirá analizar sintácticamente si el postprocesado del código APT es el correcto para el control de nuestra máquina. Ahora bien, debido a que dicho simulador a pesar de tener configurado el mismo controlador que la máquina, es decir, el controlador iTCN 530, es muy probable que no recree fielmente todos los movimientos que realizaría nuestra máquina, siendo por ello necesario una segunda prueba de los códigos en la propia máquina en material blando, permitiéndonos ambas pruebas afianzar la configuración del postprocesador para evitar cualquier posible fallo inesperado.



**Figura 105.** Máquina y entorno virtual del simulador

Aunque la máquina a emplear en el simulador sea de apariencia diferente, su configuración cinemática como su controlador son exactamente iguales a la Mikron HSM 400U, siéndonos útil para realizar las simulaciones. Además, como se puede observar en la mesa de trabajo ha sido recreado tanto el utillaje como la preforma, además de los sistemas de referencia que se emplearan en la máquina real, siendo la simulación un reflejo no completamente perfecto de la realidad, pero útil para determinar fallos generales del postprocesador a configurar.

Aunque durante el diseño de la pieza no pareciera importante el diseñar una pieza no muy compleja geoméricamente, pero sí capaz de poner en práctica el potencial que posee la máquina, nos damos cuenta en esta fase del mecanizado que en caso de haber diseñado una pieza relativamente compleja, es decir con superficies curvas, nos hubiera dificultado en gran medida el análisis del código postprocesado, pudiendo llegar a acometerse grandes errores durante la configuración del postprocesador. Afortunadamente, el tipo de pieza diseñada nos permitirá poner en práctica todos los movimientos posibles a realizar con la configuración cinemática de la máquina, pudiendo diferenciar que comandos o configuraciones del postprocesador son los más acertados.

Para abarcar el capítulo presente y dar a conocer al lector los diferentes problemas que han sido identificados durante la configuración del postprocesador, estos serán comentados a continuación siendo todos ellos de gran importancia ya no solo de cara al postprocesador, sino también de cara a conocer en profundidad como trabaja el controlador de la máquina. Así pues, los diferentes problemas identificados serán recogidos de forma cronológica en dos grandes grupos, por un lado todos aquellos problemas y soluciones encontrados durante las pruebas realizadas con el simulador, mientras que por otro lado, todos aquellos restantes identificados mediante el mecanizado en material blando en la propia máquina. De esta forma quedarán identificados todos los posibles errores y configurado por completo el postprocesador propio de la máquina, el cual nos permitirá postprocesar correctamente el lenguaje ATP.

### 7.1. PRUEBAS SIMULADOR

Antes de comenzar a realizar prueba alguna para testear el comportamiento del postprocesador, este sería configurado de acuerdo al controlador iTNC 530 y a la cinemática de la máquina, es decir, se fijaran que todos los posibles giros (Giros en B y C solamente) serán efectuados por la mesa de trabajo, siendo las traslaciones en X e Y realizadas también por la

misma y la restante traslación en Z por la cabeza del husillo. En esta configuración inicial del postprocesador también se definirían los rangos máximos de cada uno de los desplazamientos y giros de la mesa de trabajo y cabezal, así como la velocidad de giro del husillo o velocidades de avance límite, siendo toda esta información recogida en la tabla 2 presente en el apartado 4.2. El resto de configuración será dejada por defecto la que trae el postprocesador configurable.

Así pues, definido inicialmente el postprocesador, los problemas que fuimos identificando cronológicamente a medida que se iba avanzando en las pruebas en el simulador son las siguientes.

### 7.1.1. Optimización parámetros código APT

Durante la obtención de los primeros códigos postprocesados, identificábamos ciertas acciones que aunque no fueran consideradas como errores en sí, se ha intentado evitarlas para optimizar el código a postprocesar.

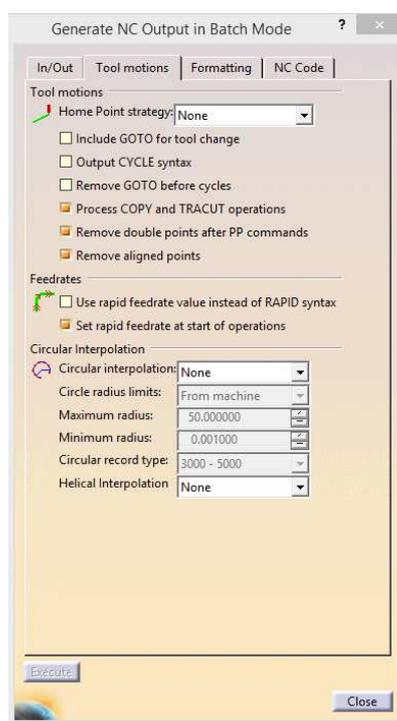


Figura 106. Configuración código APT en Catia V5

Una de estas acciones, consiste en que el código APT generado por Catia define una serie de movimientos iniciales parecidos al reseteo de la posición de la mesa de trabajo en lo que respecta a giros y traslaciones. Dicho reseteo no es necesario, ya que al iniciar cualquier programa la máquina siempre se encuentra en su posición por defecto. Así pues, para evitar dicha función solamente deberemos de seleccionar la variable *None* en el apartado de *Home Point strategy*, ubicado en la pestaña de *Tool motions* de la aplicación de generación de código NC.

Otra de las acciones no deseadas, consiste en el hecho de obtener un elevado número de líneas de código para realizar el giro de la mesa de trabajo, es decir, ir definiendo en cada línea una centésima de grado más a girar la mesa, reiterándose tal hecho hasta alcanzar el giro completo. Como se puede pensar, esto supone la generación de un elevado número de líneas para realizar un simple giro que de forma normal no llevaría ni la mitad de código. Por lo tanto, para evitar tal problema simplemente deberemos de desactivar la casilla relativa a *Use rapid feedrate value*

*instead of RAPID syntax*, ya que la activación de tal casilla subdivide los avances tanto de giro como de translación en incrementos muy pequeños, viéndose reflejado en líneas que representan movimientos muy pequeños.

Aunque tales problemas no sean propiamente del postprocesador, esto supondrá una mejora al facilitar el análisis de los movimientos y código postprocesado.

### 7.1.2. Bloques iniciales

A diferencia del código ISO, el cual no requiere de ningún bloque de códigos predeterminados al inicio de cualquier programa de CNC, el lenguaje conversacional Heidenhain para el control de la máquina requiere establecer inicialmente un bloque donde se defina el inicio del programa, el nombre del mismo y las unidades de medida a emplear. Esto se consigue definiendo en la primera línea el comando BEGIN PGM, seguido del resto de parámetros comentados. A modo de ejemplo sería,

BEGIN PGM 001 MM	Comienzo del programa CNC, de nombre 001 y definido en milímetros las medidas.
------------------	--

Posteriormente de forma auxiliar se podría programar la creación de un bloque gráfico a mostrar en la pantalla de control de mandos de la propia máquina y simular en ella el resto del código, identificando posibles colisiones y las operaciones del mecanizado. Esto se definiría mediante el comando BLK FORM, en una primera línea se escribiría BLK FORM 0.1 Z seguido de las coordenadas absolutas de una de las esquinas inferiores del paralelogramo, mientras que en una segunda línea se escribiría de nuevo BLK FORM 0.2 seguido de la coordenada absoluta de la esquina opuesta superior. A modo de ejemplo sería,

BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z-40	Definición de la coordenada inferior del paralelogramo y la dirección de la herramienta.
BLK FORM 0.2 X+100 Y+100 Z+0	Definición de la coordenada superior del paralelogramo

Sin embargo, esto no aportará información alguna a no ser que el programa de CNC definido no contenga operaciones de mecanizado tridimensionales, de lo contrario la simulación no mostrará resultado alguno. Es por ello, que estos bloques no serán programados en la cabecera de nuestro código, ya que en este encontraremos sucesivos cambios de plano.

Seguidamente, otro de los comandos necesarios a definir en los bloques iniciales de cualquier programa será la definición o llamada al sistema de referencia con respecto al cual se han definido en el software CAD/CAM los movimientos de la herramienta. Para definir la posición de dicho sistema de referencia, conocido como cero pieza, deberemos de recurrir al ciclo 247, ciclo denominado fijación del punto de referencia. Este ciclo se caracteriza por llamar mediante la variable Q339 a la posición del sistema de referencia que previamente se ha definido en la memoria de la máquina. Así pues, para definir tal sistema de referencia en el programa será necesario escribir los siguientes comandos,

CYCL DEF 247 FIJAR PUNTO DE REFERENCIA Q339=+20 ; NÚMERO DEL PUNTO DE REFERENCIA
---

En nuestro caso, el número del punto de referencia para el amarre A será el 20, mientras que para el amarre B el 21. En caso de que esto no sea definido inicialmente en el programa de CNC,

observamos en la simulación que los movimientos serán ejecutados con respecto al sistema de referencia predeterminado de la máquina, siendo los movimientos completamente erróneos.

Teniendo en cuenta todo lo comentado en este apartado, personalizaremos nuestro postprocesador de tal forma que al inicio de los programas de CNC sean definidos los diferentes comandos citados, siendo los bloques a implementar los siguientes,

BEGIN PGM 001 MM CYCL DEF 247 FIJAR PUNTO DE REFERENCIA Q339=+20 ; NÚMERO DEL PUNTO DE REFERENCIA
---

### 7.1.3. Bloques finales

Al igual que al inicio del programa CNC es definido una serie de bloques para poder iniciar correctamente las operaciones programadas, será necesario también establecer una serie de comandos que detengan por completo al programa de CNC y cualquier posible movimiento de la herramienta, teniendo que quedar está completamente retraída y sin suponer ningún obstáculo para la pieza.

Por lo tanto, al finalizar el programa de CNC será necesario parar el giro del cabezal, el refrigerante en caso de estar activado, así como la ejecución del programa, consiguiendo todo ello mediante la definición del comando M30. Dicho comando deberá de ubicarse de forma única en una línea, o bien, al final de una frase.

Seguidamente, para cerrar por completo el programa de CNC y dejarlo preparado para repetirlo de nuevo en caso necesario, se deberá de definir un comando similar al empleado al inicio del programa, el cual se identifica con END PGM. Este comando consta de las siglas anteriores, más el nombre del programa y las unidades de medida empleadas, siendo un ejemplo de ello el mostrado.

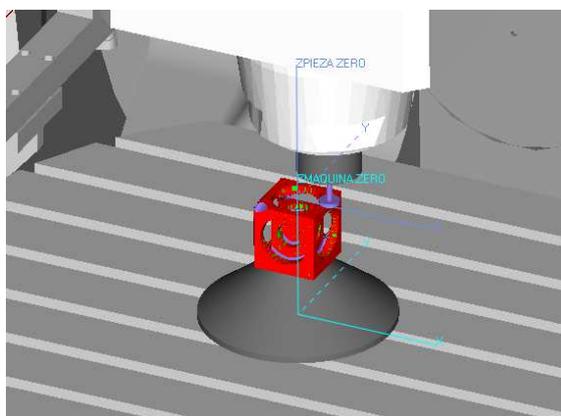
END PGM 001 MM	Finalización del programa CNC, de nombre 001 y definido en milímetros las medidas.
----------------	--

Debido a que ninguno de los comandos anteriores resetea la posición en la que queda la mesa de trabajo y el cabezal del husillo al finalizar el programa de CNC, será necesario antes de la activación de los comandos anteriores, resetear la posición y orientación de ambas partes de la máquina para facilitar el acceso a la pieza y dejar la máquina preparada para cualquier otro programa de CNC.

Para realizar tal reseteo, será necesario primeramente replegar la herramienta hasta una posición determinada donde la posibilidad de interferencia con la mesa de trabajo y la pieza sea prácticamente nula. Para ello, apoyándonos en los comandos auxiliares descritos en el manual del controlador iTNC 530 [10], encontramos el comando M140 MB (Move back), el cual permite retirar la herramienta del contorno en la dirección del eje de esta hasta 50 mm con respecto a la pieza, asegurándose así la imposibilidad de colisión durante su retirada. En caso de que se quiera retirar la herramienta hasta una posición más alejada de la mesa de trabajo, será necesario añadir a los comandos nombrados la variable MAX, retirando la herramienta hasta el límite del rango de desplazamiento. Por lo tanto, el bloque quedaría definido de la siguiente forma.

M140 MB MAX	Retirada de la herramienta en dirección de esta, es decir, en dirección Z hasta el límite máximo positivo del rango de desplazamiento
-------------	---

De acuerdo a lo establecido en el manual esta función podrá activarse, siempre y cuando, sea ubicada al final de una frase o de forma única en una línea. Nosotros para asegurarnos que dicha función es activada, la definiremos en un único bloque.



**Figura 107.** No interpretación del M140 en simulación

Durante la comprobación de dicha función en el simulador, observamos que este comando no es leído o activado por el controlador del simulador, no realizando ningún movimiento ante su lectura. Así pues, debido a que el simulador es posible que no recree de forma fiel al controlador de la máquina, dicha función será posteriormente analizada en la propia máquina.

Retirada la herramienta de la pieza, seguidamente resetearemos los giros en los que haya podido quedar la mesa de trabajo para facilitar el acceso a la pieza. Para realizar dicho reseteo se recurre a la función PLANE RESET, una función no recogida en el manual de nuestro controlador, pero soportada por el mismo. Dicha función debe ir acompañada posteriormente del tipo de movimiento que queremos, es decir, se puede definir TURN que gira solamente la mesa de trabajo o MOVE que gira y traslada la mesa de trabajo hasta la posición en la que la distancia entre herramienta y mesa de trabajo era la misma. En nuestro caso, definiremos que sea solamente girada la mesa de trabajo, asegurando que la herramienta permanece en la posición que anteriormente definimos con el comando M140, de esta forma el bloque para el reseteo de la mesa de trabajo será el siguiente.

PLANE RESET TURN
------------------

Así pues, recogiendo todos los comandos citados en este apartado en el orden cronológico correspondiente, obtendremos el conjunto de bloques a añadir al postprocesador para que este los introduzca al final de cualquier programa de CNC.

M140 MB MAX PLANE RESET TURN M30 END PGM 001 MM
--

Como ya digo, durante la simulación el desempeño de los comandos recogidos en el conjunto de bloques anteriores ha sido favorable, excepto el relativo a la retirada de la herramienta

(M140 MB MAX), el cual deberá de ser analizado sobre la propia máquina para asegurarse que es soportado o no por esta.

#### 7.1.4. Sistema de coordenadas tras giros

Una de las variables más importantes a tener en cuenta en cualquier postprocesador para una máquina de 5 ejes, es la activación/desactivación del RTCP (Rotation tool center point) o en el caso del sistema Heidenhain, el TCPM (Tool Center Point Management). Esta función trata de mantener siempre perpendicular la herramienta con respecto a la cara de la pieza a mecanizar o con un cierto ángulo de inclinación definido por el empleo de otra función adicional.

Para que el controlador de la máquina satisfaga la condición anteriormente citada, es necesario que este corrija automáticamente la trayectoria de la herramienta respecto a la geometría de la máquina y la longitud de esta, además de tener en cuenta la compensación del radio de la herramienta, evitando de esta forma producir daño alguno en la pieza al girar. Como se puede suponer, además de las funciones citadas el sistema de referencia de coordenadas usado, en nuestro caso el cero pieza, también será girado y trasladado en consonancia con los giros realizados por la mesa de trabajo, modificando el postprocesador de forma pertinente las coordenadas de los movimientos de la herramienta en el código.

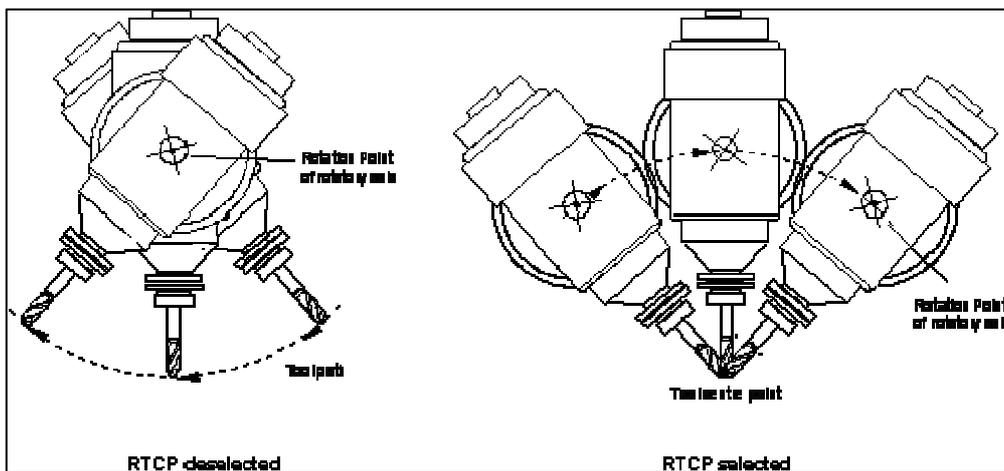


Figura 108. Función RTCP desactivada y activada

En resumen, al activar el RTCP el postprocesador modificará las coordenadas de movimiento de la herramienta de forma que cuando el programa de CNC sea leído por parte del controlador, este pueda realizar las compensaciones pertinentes, ubicando a la herramienta siempre perpendicular a la superficie a mecanizar. Además, durante el giro de la pieza la distancia entre el extremo de la herramienta y la pieza en sí será constante, acompañando la herramienta en todo momento al giro de la mesa de trabajo.

En caso de que no sea activado el TCPM como ha ocurrido durante las pruebas realizadas en el simulador, una vez girada la pieza los movimientos a realizar por la herramienta serán con respecto al sistema de coordenadas girado, pero como no ha sido tratado por el postprocesador la función TCPM, las coordenadas de la herramienta estarán definidas como si el sistema de referencia no hubiera sido girado, realizando de forma errónea el mecanizado, además de suponer un gran riesgo ante la posibilidad de colisión.

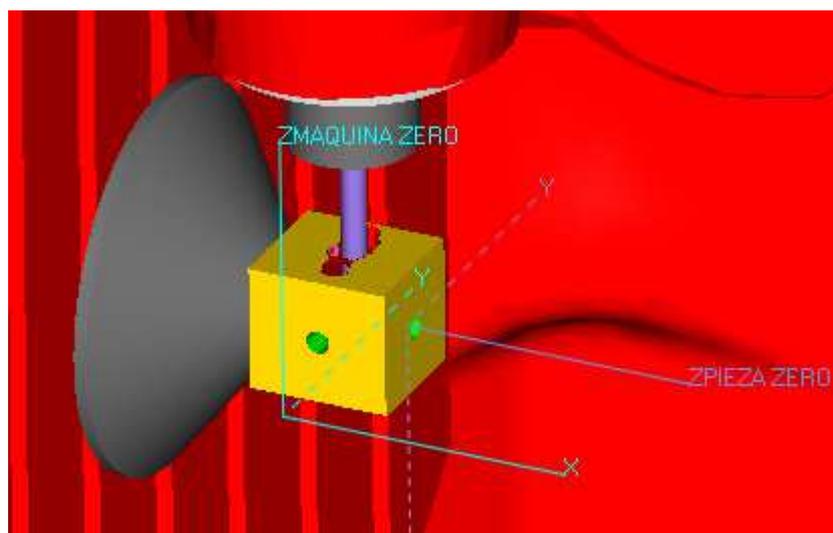
Tras la realización de sucesivas pruebas en el simulador, se ha identificado que es necesario definir de forma manual en el código APT la activación del TCPM antes de cualquier movimiento

que implique el giro de la mesa de trabajo, para que las operaciones de mecanizado a realizar por la máquina sean realizadas de forma correcta y de acuerdo a lo definido en el software CAD/CAM. La activación de tal función deberá ser realizada de forma manual por la imposibilidad de ser programado o configurado el postprocesador para que la active/desactive al postprocesar. Tal activación se llevaría a cabo mediante la definición de la siguiente función en lenguaje APT

MODE/TLVEC,ON \$\$ Turn on RTCP	Activación RTCP
MODE/TLVEC,OFF \$\$ Turn off RTCP	Desactivación RTCP

Tal función al ser interpretada por parte del postprocesador, activará en lenguaje conversacional Heidenhain la función M128, o bien, M129 en caso de desactivación, además de permutar la posición de las coordenadas de la herramienta al ser girado el sistema de coordenadas.

Se ha comprobado que el resultado no será el mismo en caso de que dicho comando M128/M129 sea introducido de forma manual en el código una vez este ya postprocesado, ya que como se ha comentado anteriormente, las coordenadas de la trayectoria de la herramienta no serán permutadas, realizando la herramienta movimientos extraños y sin sentido. Así pues, reiteramos que en caso de querer activar RTCP en el programa de CNC se deberá de realizar en el código ATP de forma manual o mediante la definición de instrucciones previamente en el software CAD/CAM.



**Figura 109.** Error al activar M128 sobre código postprocesado

Ahora bien, dependiendo del tipo de movimiento o giro que se vaya a realizar convendrá activar o desactivar la función de RTCP antes o posteriormente al giro a realizar. En nuestro caso, es decir, en lo que respecta a giros para la mecanización de diferentes caras de la pieza, la función RTCP será activada una vez ya girada la pieza por el hecho de no tener sentido que la herramienta vaya acompañando al giro de la pieza. De esta forma, la herramienta queda quieta mientras la pieza es girada, por lo que alcanzado la posición final del giro se activará el RTCP, haciendo que la herramienta realice los movimientos de forma correcta respecto al sistema de referencia girado.

En lo que respecta a otros tipos de giros como por ejemplo los realizados en las operaciones de chaflanado o de alguna geometría con superficies curvas, la función RTCP será activada desde inicio a fin de la operación, ya que en estos casos la trayectoria de la herramienta será definida

de tal forma que quede muy próxima a la pieza, evitando así posibles colisiones o movimientos indeseados, así como también porque se necesite mecanizar de forma continuada mientras se gira la pieza. En nuestro caso y ante la limitación que presenta nuestro postprocesador, estas situaciones de activación/desactivación del RTCP serán evaluadas por el programador, el cual evitará movimientos innecesarios y/o posibles colisiones, activando y desactivando el RTCP según los casos más favorables.

A modo de ejemplo, en nuestro caso se ha identificado innecesario activar M128 mientras que se gira la pieza para mecanizar las diferentes caras, salvo durante ciertas operaciones de chaflanado como por ejemplo la referida a los chaflanes de la cara superior, siendo aquí activado el RTCP de forma continua por la proximidad y continuidad de los mecanizados de los diferentes chaflanes. En el caso de los chaflanes de las aristas laterales, estos serán realizados interrumpiendo intermitentemente la función RTCP.

; OPERATION: Taladro II 150 TOOL CALL S2409 160 <b>M128</b> 170 L X-55.000 Y+.000 Z-25.000 B-90.000 R0 FMAX 180 L X-30.500 Y+.000 Z-25.000 R0 FMAX 190 L X-7.500 Y+.000 Z-25.000 R0 F590.2 200 L X-30.500 Y+.000 Z-25.000 R0 FMAX 210 L X-9.000 Y+.000 Z-25.000 R0 FMAX 220 L X+2.157 Y+.000 Z-25.000 R0 F590.2 230 L X-30.500 Y+.000 Z-25.000 R0 FMAX 240 L X-55.000 Y+.000 Z-25.000 R0 FMAX 241 <b>M129</b>	; OPERATION: Taladro II 250 TOOL CALL S2409 260 L C-90.000 R0 FMAX 261 <b>M128</b> 270 L X+.000 Y+55.000 Z-25.000 R0 FMAX 280 L X+.000 Y+30.500 Z-25.000 R0 FMAX 290 L X+.000 Y+7.500 Z-25.000 R0 F590.2 300 L X+.000 Y+30.500 Z-25.000 R0 FMAX 310 L X+.000 Y+9.000 Z-25.000 R0 FMAX 320 L X+.000 Y-2.157 Z-25.000 R0 F590.2 330 L X+.000 Y+30.500 Z-25.000 R0 FMAX 340 L X+.000 Y+55.000 Z-25.000 R0 FMAX 341 <b>M129</b>
--	---

En los códigos anteriores mostrados en columna a modo de ejemplo, observamos cómo se es activado y desactivado la función RTCP durante las operaciones de taladrado de las diversas caras de acuerdo a lo comentado en los párrafos anteriores.

Realizando las pruebas pertinentes en el simulador, observamos que según como se ha definido la activación del RTCP, el mecanizado será realizado de forma correcta, siendo extrapolable con mucha probabilidad de éxito a su aplicación en la máquina real.

#### 7.1.5. Interpolaciones circulares

Paralelamente al fallo anteriormente comentado, la definición de interpolaciones circulares constituye otro de los problemas con más impacto en las pruebas de simulación como en la configuración del postprocesador. Como se ha podido observar en los movimientos de la herramienta durante la simulación, todas las interpolaciones realizadas con respecto al sistema de referencia sin girar han sido un éxito, ahora bien, cuando el sistema de coordenadas es girado las interpolaciones circulares no son realizadas de forma correcta, ya que como se ha podido analizar tienden a realizar los movimientos circulares perpendicularmente a la superficie a mecanizar, como si estuvieran siendo realizados los movimientos circulares con respecto al sistema de referencia predeterminado e invariado de la máquina.

Se han realizado diversas pruebas en el simulador, como por ejemplo analizar los movimientos de las interpolaciones circulares estando activo el RTCP, lo cual ha sido un fracaso. Así como también se ha realizado ciertas pruebas deseleccionando la capacidad de interpolación circular

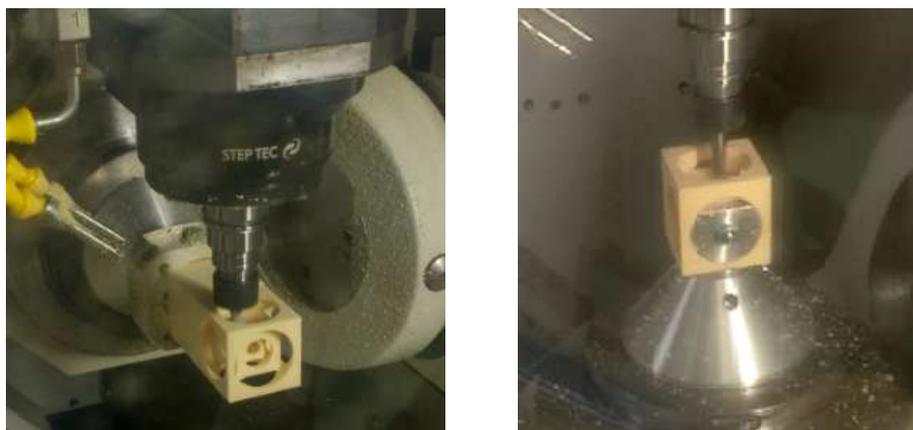
del postprocesador, obteniendo un resultado favorable. Así pues, remitiéndose a las pruebas se optó por la desactivación de las interpolaciones circulares, pero no solo en el postprocesador, sino también en el panel de control de generación del código APT en Catia con el objetivo de obtener un mayor número de puntos por trayectoria, lo cual mejoraría la precisión del mecanizado.

Ante la falta de tiempo y de accesibilidad a la máquina para realizar más pruebas, cabría investigar aún más los hechos por los cuales no se realiza de forma correcta las interpolaciones circulares, encontrando en las pruebas de simulación una posible solución cuyo fundamento apenas parece tener sentido. Esta solución, la cual ha tenido un resultado positivo en la simulación, consistiría en girar la pieza o la mesa de trabajo estando activado el RTCP, de tal forma que realizado el giro, el RTCP se desactivaría, siendo realizados los movimientos circulares y rectilíneos siguientes de forma correcta en la cara girada. Aunque como ya digo, se trata de una solución favorable en el simulador, pero que posee una alta probabilidad de fracaso en la máquina real ante la falta de fundamento de ello, ya que el activar y desactivar el RTCP haría que las coordenadas de la herramienta no fueran permutadas y por tanto, se movería esta como si el sistema de referencia no hubiera sido girado, existiendo una gran probabilidad que los movimientos no tengan sentido alguno.

Finalmente, la solución a aplicar de la cual se posee una gran certeza de éxito, será la desactivación de las interpolaciones circulares por parte del software CAD/CAM como del postprocesador.

### 7.2. PRUEBAS EN MÁQUINA

Aunque el simulador empleado para la realización de pruebas e identificación de errores del postprocesador se caracterice por emplear el mismo controlador que la máquina a emplear, existe una alta probabilidad de que no recree de forma fiel la lectura del código postprocesado, siendo por ello necesario realizar de forma adicional pruebas en la máquina real. Dichas pruebas consistirán en la mecanización de la pieza sobre material blando como poliuretano, mecanizándose a muy baja velocidad de avance de tal forma que se pueda anticiparse a los posibles movimientos no deseados.



**Figura 110.** Pruebas en máquina de amarre A y B

Con las primeras pruebas realizadas en el simulador se realizaría una criba inicial de aquellos problemas de mayor impacto, mejorándose en cierta medida el postprocesador. Seguidamente, con las presentes pruebas a realizar en la máquina real, se depurarán los posibles fallos restantes

del postprocesador, siendo estos comentados como sus correspondientes soluciones a continuación.

### **7.2.1. Desplazamiento optimizado de ejes giratorios**

El primero de los fallos detectados se produciría al realizar el giro de la pieza en C estando esta ya girada 90° con respecto a B para realizar el resto de taladros ubicados en las caras laterales del primer amarre. Así pues, cuando la máquina se disponía a rotar el plato (Giro en C) y estando activado el TCPM, esta giraría hasta la posición de 90° pero por el camino de mayor ángulo, es decir, en lugar de girar solamente 90°, el plato giraría 270° en sentido contrario para alcanzar la misma posición que de la otra forma.

El problema viene cuando al querer realizar dicho giro de tal forma y estar activado el TCPM, la herramienta ubicada en el centro y perpendicularmente a la cara que queda en la parte superior de la pieza, intenta acompañar a esta (Comportamiento normal activado TCPM) por el camino largo, lo cual supondría desplazar la herramienta siempre guardando la distancia con respecto a dicho punto de la cara a lo largo del giro completo. Si analizamos tal movimiento esto supondría un impacto de la herramienta con la pieza, ya que en el momento en la que la cara se encontrase en la parte opuesta a la superior, la herramienta intentaría posicionarse perpendicularmente a esta y a la misma distancia que la inicial, siendo por tanto encontrada la herramienta en el interior de la pieza.

Para solucionar este problema cabría realizar dos posibles soluciones, bien desactivar el TCPM durante el giro de la pieza, o bien, evitar que la pieza gire por el trayecto de más ángulo. Ante la duda, se implementarían ambas soluciones, siendo la solución de la desactivación del TCPM ya conocida, mientras que la solución para evitar tal giro no deseado consistiría en la activación de la función M126, conocida como desplazamiento optimizado de ejes giratorios. Simplemente se debería de activar al inicio de cualquier programa CNC o giro de la mesa, denotándolo en una línea sola. Terminado el programa de CNC, antes de resetear posición alguna de la mesa de trabajo, esta función será desactivada mediante su función compañera M127, asegurándonos con este par de comandos que el giro siempre sea realizado por el camino más corto.

### **7.2.2. Activación giro a derechas husillo**

Solucionado el problema anterior, encontraríamos a continuación que al cambiar de herramienta no sería activado el arranque de giro del husillo, dándose como a entender que la definición del comando M03 (Arranque husillo a derechas) para la herramienta inicial, haría que dicha función se comportara como sí modal fuera, no requiriendo de nuevo su activación en casos posteriores.

Tal comportamiento imprimido por el postprocesador no es correcto, por lo que se buscaría en el la opción de desactivar el tratar al comando de forma modal, no encontrando existo alguno. Así pues, tras la búsqueda de diversas soluciones se pensaría a una posible solución no deseada de fijar la función M03 en una línea de forma predeterminada cada vez que se cambiará de herramienta. Y digo no deseada por el hecho de que en caso de querer hacer girar a la herramienta en sentido contrario, es decir, activando la función M04, existirá cierta confusión en la máquina, teniendo que recurrir en dichos casos a la modificación manual del código. Por tales motivos tal solución quedaría desechada.

Además, otro de los problemas que hemos identificado con respecto a la activación del giro de la herramienta, se trata en que el comando M03/M04 es siempre definido al final de la línea de llamada de herramienta, tal y como se muestra a continuación.

TOOL CALL 4 Z S3000 M03	Llamada a la herramienta 4, posicionada a lo largo del eje Z, con velocidad inicial de giro de 3000 rpm y arranque a derechas
-------------------------	---

Lo cual estaría de acuerdo a la posición en la que se debe de definir tal función según el manual del controlador iTNC 530. Sin embargo, nos damos cuenta de que el controlador de nuestra máquina no tolera dicha estructura, siendo necesario definir las funciones M03/M04 de forma única en una línea aparte. Es por ello, que esto se intentaría programar de tal forma en el postprocesador, pero no se conseguiría éxito alguno, teniendo finalmente que recurrir a la definición de forma manual en el código postprocesado de la función M03/M04 cada vez que se realice un cambio de herramienta o de dirección de giro del husillo.

### 7.2.3. Velocidad de giro

Paralelamente al problema anterior, encontraríamos que en caso de querer modificar la velocidad de giro del husillo, estando previamente definida en la llamada de la herramienta, el postprocesador realizaría tal modificación de forma errónea sintácticamente, es decir, la estructura empleada no sería soportada por el controlador de la máquina. Dicha estructura consistiría en denotar con la letra S la variable a modificar, es decir, la velocidad de giro, más posteriormente la nueva velocidad, por ejemplo S3000.

Esta estructura como ya digo no es soportada por el controlador, siendo necesario para modificar la velocidad de giro utilizar de nuevo el comando de llamada de la herramienta, pero en este caso posteriormente se definiría la velocidad de giro. La estructura correcta sería así.

TOOL CALL S3000	Se define el comando de llamada de la herramienta, pero posteriormente solamente se fija la nueva velocidad de giro
-----------------	---

Como podemos observar, tal estructura no necesita de ningún complemento más como la dirección de la herramienta, el número identificativo de posición en el cargador... ya que dichos parámetros ya han sido definidos al cambiar o colocar la herramienta. Esta estructura sí sería posible programarla en el postprocesador, evitando así la aparición de nuevo de tal error.

### 7.2.4. Recogida y cambio de herramienta

Al observar en la máquina como se es realizado el proceso de cambio de herramienta, identificábamos ciertas acciones que aunque no sean consideradas como un error en sí, constituirían una fuente de posibles colisiones impredecibles.

Tal problema se basa en que cuando se es realizado el cambio de herramienta, esta es retraída hasta la puerta donde se almacenan las herramientas siguiendo la trayectoria más corta sin tener en cuenta la posibilidad de colisión alguna con la pieza. Además, observamos que la pieza o la mesa de trabajo pueden llegar a quedar giradas según los movimientos anteriores a la llamada de cambio de herramienta, suponiendo esto cierto problema ante el movimiento relativo entre la herramienta recién cambiada y la reubicación de la pieza para iniciar las siguientes operaciones de mecanizado.

Para solucionar tal problema y evitar movimientos no deseados, estableceremos una serie de bloques los cuales serán implementados de forma predeterminada en el postprocesador para

que este lo imprima en el código a postprocesar antes de iniciar cualquier cambio de herramienta. Tales comandos son muy similares a los encontrados en los bloques finales de programa anteriormente definidos, consistiendo primeramente en retirar la herramienta a lo largo de la dirección de esta mediante M140 y posteriormente resetear la posición de la mesa de trabajo mediante PLANE RESET TURN. De esta forma nos aseguramos que la herramienta es recogida sin posible colisión alguna y que además, al iniciar las siguientes operaciones tampoco habrá ningún movimiento extraño entre la pieza y la herramienta. A modo de ejemplo los bloques a definir serían.

M140 MB MAX	Retirada de la herramienta a lo largo del eje de esta hasta la posición más alejada.
PLANE RESET TURN	Girar la mesa de trabajo hasta la posición por defecto, para seguidamente cambiar de herramienta.



## 8. FABRICACIÓN

Diseñada la pieza, las operaciones de mecanizado pertinentes, configurado y comprendido las limitaciones del postprocesador, iniciaremos la fase relativa a la puesta en práctica de todo lo enumerado para llevar a cabo la fabricación de la pieza.

Durante el proceso de fabricación se deberá de reducir al máximo la probabilidad de fallo, siendo por ello realizado previamente durante las pruebas del postprocesador en la máquina real, la fabricación de la pieza sobre material blando, asegurándonos así que en los códigos postprocesados no existen movimientos, ni parámetros extraños o peligrosos. Así pues, gracias a tales pruebas, las cuales son mencionadas en el capítulo anterior, se fabricaría primeramente la pieza en ambos amarres en material blando, siendo prueba de ello la figura siguiente, como la figura 110.



**Figura 111.** *Pieza intermedia mecanizada en material blando*

Además de lo comentado anteriormente, existe una alta probabilidad que durante la fabricación nos encontremos con problemas inesperados, los cuales deberán de resolverse de la forma más eficaz y eficiente posible. Entre tales problemas podemos llegar a encontrar una pieza terminada no acorde a los requerimientos dimensionales, ya sea por vibraciones durante el mecanizado, dilataciones térmicas de la misma, parámetros de corte no óptimos... o incluso acabados superficiales no satisfactorios, pudiendo llegar a tener todos ellos un cierto impacto en la imposibilidad de poder montar el utillaje en la pieza, o bien, en caso de que la pieza tuviera aplicación industrial, la incapacidad de asegurar su intercambiabilidad y/o viabilidad de la misma.

Así pues, la fase presente en la que nos encontramos no se constituye como un paso más unidireccional para la obtención de la pieza diseñada, sino que se entiende como una fase cíclica en la que se permanecerá hasta llegar a dar solución a los diferentes problemas que podamos encontrarnos en caso que hubiere, pudiendo ser tales soluciones desde el re-diseño de la pieza, hasta modificaciones de las operaciones de mecanizado en lo que respecta a trayectorias de la herramienta, parámetros de corte, tipos de herramientas... consiguiendo superar tal fase reiterativa una vez que la pieza se encuentre de acuerdo a diseño.

Por lo tanto, en el presente capítulo será comentado todo el proceso de fabricación real seguido, así como los diferentes hechos inesperados con los cuales nos hemos tenido que enfrentar, recogiendo las diferentes soluciones aplicadas para garantizar finalmente que la pieza cumple

con los requisitos dimensionales exigidos. Toda esta información será recogida a continuación en diferentes apartados según el tipo de amarre en el que nos encontremos.

### 8.1. MECANIZADO I AMARRE A

Antes de iniciar la mecanización de la pieza en el primer amarre, se llevaría a cabo ciertas operaciones previas destinadas tanto a la configuración de la máquina, como del código del programa de CNC del primer amarre.

Primeramente, se aseguraría que cada una de las herramientas a emplear en el mecanizado se encontraba instaladas en el cargador de la máquina, que estaban medidas y que se correspondía su número identificativo con el configurado en el programa de CNC. La importancia de tales comprobaciones reside en evitar que las herramientas a emplear no sean otras y que se posea toda la información actualizada de las variables dimensionales de estas, para asegurar la correcta compensación tanto en radio y longitud de la herramienta durante las operaciones de mecanizado, fabricando la pieza de tal forma que cumpla los requerimientos dimensionales del diseño.

Además de lo comentado anteriormente, también se determinaría en la máquina la posición del cero pieza fijado en el software CAD/CAM con respecto al sistema de referencia predeterminado de la máquina. Para la obtención de dicha posición simplemente se mediría mediante un calibre de grandes dimensiones la distancia existente desde la base de la mesa de trabajo hasta la superficie de la preforma ya montada en el útil de base cónica (Figura 123), de tal forma que a dicha medida le sería restada el sobreespesor dejado en la preforma de 3.175 mm. Esta medida se definiría después en una de las variables de almacenamiento de sistemas de referencia que posee la máquina, siendo en nuestro caso la variable 20. El hecho por el cual solamente se ha tenido en cuenta la variable Z, es porque el cero pieza se encuentra alineado con el sistema de referencia de la máquina, estando este solamente desfasado en tal dirección.

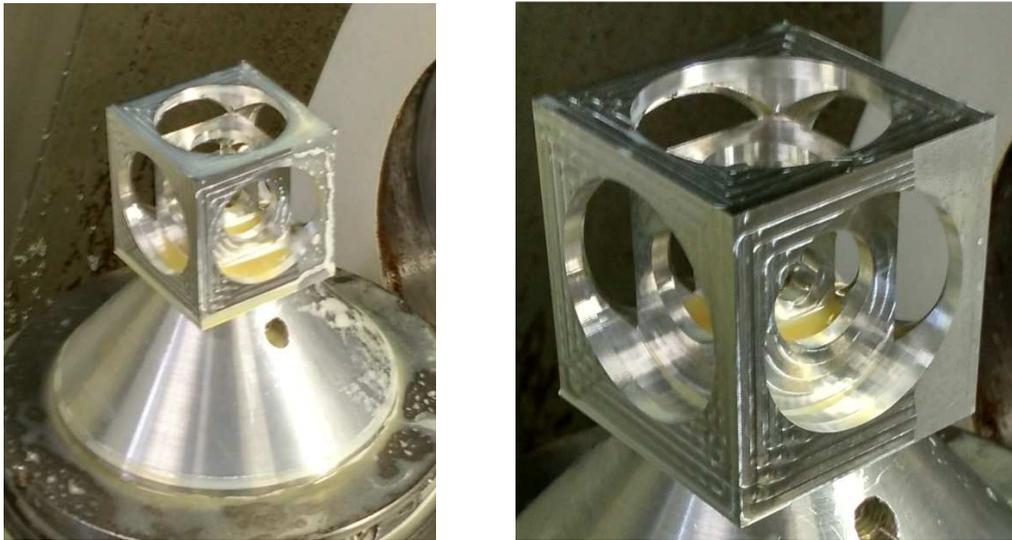


**Figura 112.** Preforma inicial en amarre A

Realizado todas las acciones anteriores y estando la preforma ya montada en la mesa de trabajo de la máquina, se iniciaría así las operaciones de mecanizado pertinentes, comenzando por los taladrados, seguidamente los planeados y cajeados y por último los ranurados. En caso de querer conocer en detalle cómo se han abordado cada uno de los mecanizados anteriores, en el capítulo 6, así como en el Anexo IV será encontrado toda la información relativa a tales mecanizados.

En lo que respecta a otros parámetros que no se encuentran recogidos en el programa de CNC del primer amarre, hemos de comentar que ha sido activada la taladrina durante las operaciones, más que para refrigerar, ha sido para lubricar, intentado de esta forma reducir en la medida de la posible las vibraciones.

Como se ha podido apreciar durante el mecanizado, los movimientos de la herramienta, como los giros de la mesa de trabajo han sido ejecutados de forma correcta, no produciéndose inconveniente alguno como la rotura de la herramienta, desgaste desmesurado de la misma o posibles colisiones. Ahora bien, el hecho anómalo que se ha podido apreciar durante la mecanización de las últimas operaciones, ha sido la generación de determinados sonidos estridentes, los cuales se podrían asociar a posibles vibraciones durante el mecanizado, agudizándose esto aún más a medida que el material eliminado es mayor, ya que la pieza perdería robustez y por tanto, adquiriría una mayor facilidad para vibrar.



**Figura 113.** Resultado mecanizado pieza en amarre A

### 8.1.1. Problema desfase herramienta

Analizando la pieza obtenida, lo primero que nos llama la atención sería la falta de mecanización de ciertas zonas de la cara exterior de la pieza. Como se puede apreciar en la figura anterior de la derecha, la cara lateral de la pieza no presenta un brillo homogéneo en toda su superficie, sino que encontramos que la parte de la derecha carece de cierto brillo y marcas de herramienta. Directamente asociamos tal defecto a un mecanizado parcial e incorrecto durante el planeado, lo cual tendrá un efecto adverso sobre las dimensiones de la pieza.

Así pues, para ratificar los defectos anteriormente citados, se realizaría la medición de la pieza mediante un instrumento de gran precisión como es un micrómetro, apreciando inicialmente que las caras exteriores no se encuentran de acuerdo a las dimensiones del diseño en lo que respecta a su anchura, sino que estas presentarán un mayor tamaño a la dimensión nominal en torno a +0.2 mm, lo cual afirmarí el error de mecanización durante los planeados, estando las dimensiones fuera de tolerancia.

Tal problema se podría asociar a diversos factores tales como a una vibración excesiva de la pieza, una incorrecta colocación y alineación de la preforma en el útil de base cónica, o bien, a una medida de la herramienta incorrecta, en este caso sería de la fresa toroidal de diámetro 10 mm.

Analizando uno por uno cada uno de las causas potenciales, descartaríamos inicialmente una vibración excesiva, tanto por la no existencia de falta de mecanización en otras zonas diferentes de la pieza, así como por no presentar marcas de herramienta intermitentes en la superficie de esta. Por otro lado, descartaremos también la posibilidad de estar incorrectamente alineada la preforma, ya que en dicho caso debería de aparecer en la cara alterna marcas de falta de mecanización también, defecto que solo aparece en una única cara. Además, la inmovilización de la preforma en lo que respecta a la rotación de la misma es total, gracias al eje colocado de forma pasante entre el tetón de la preforma y el útil de base cónica, no habiendo posibilidad alguna de posicionar a la preforma erróneamente, ni pudiendo esta rotar.

Así pues, por descarte identificaríamos que el posible error estaría asociado a un fallo en la medición de la herramienta, una descalibración de la misma o incluso hasta el afloje de esta por las vibraciones. Como medida resolutive se modificaría la variable dimensional de la longitud de la herramienta, sumándole a esta el desfase que faltaría para que la pieza llegará a alcanzar las dimensiones de diseño, es decir, 0.1 mm más a la longitud que ya poseía. Sería 0.1 mm más en lugar de 0.2 mm, ya que la desviación aparecida en la pieza se supone que ha sido repartida entre caras simétricas, siendo solamente necesario planear 0.1 mm más por cara para solucionar tal problema. Para evitar que quedará cierto resalte en la superficie de los cajeados entre la zona mecanizada por la fresa toroidal y la fresa de ranurar, esta última fresa también sería desfasada la misma distancia.

### 8.1.2. Problema utillaje

Paralelamente, a pesar de saber que sería necesario realizar una segunda pasada de mecanizado a la pieza para resolver el defecto comentado, probaríamos si el utillaje diseñado para el segundo amarre sería capaz de alojarse en el interior de la pieza. Ante nuestra sorpresa, comprobaríamos que el cuerpo del útil podría ser montado en la pieza con dificultad, siendo en el caso de los negativos imposible. El hecho por el cual no se podría alojar los negativos en la pieza se debería a que ciertas dimensiones del mismo no estarían dentro de las tolerancias diseñadas, sino que se encontrarían muchas de ellas a dimensión nominal. Tales dimensiones serían todas aquellas relacionadas con los diámetros de los agujeros de los cajeados, existiendo entre el utillaje y la pieza un ajuste con apriete.



**Figura 114.** Montaje cuerpo de útil en pieza intermedia

## 8.2. MODIFICACIÓN MECANIZADO I AMARRE A

Ante la dificultad y largo tiempo que llevaría modificar el utillaje debido a que sería necesario volver a mecanizar pieza por pieza hasta ajustarlas a las tolerancias definidas, se optaría por modificar la pieza en sí. Además, debido a que se debería de realizar una segunda pasada para sanear el defecto anterior, se pensó en modificar ligeramente los diámetros de cada uno de los cajeados que encontramos en la pieza, solucionando de esta forma en menor tiempo ambos problemas encontrados.

Atendiendo a lo comentado, las modificaciones a realizar se basarían prácticamente en acometer las mismas operaciones de mecanizado anteriores salvo con ciertas variaciones, es decir, debido a que se debe de retocar de nuevo la superficie de todas las caras, se volvería a realizar los planeados, así como los cajeados anteriores con la excepción de dar una única pasada al fondo de dichas superficies. Con respecto a los diámetros de los cajeados, los cuales deben ser incrementados en +0.05 mm, estos serán mecanizados mediante una operación de contorneado, no realizando de nuevo una operación de cajeadado completa con un offset determinado para evitar caer en tiempos muertos y movimientos en vacío de la herramienta.

En cuanto a los ranurados, al igual que los planeados y los cajeados, estos constarán de una única pasada a tope con la superficie de la pieza. Mientras que los taladros no volverán a ser repetidos, ya que no aportarían mejora alguna en el mecanizado de la pieza.

A pesar de ser resumido brevemente en los párrafos anteriores las operaciones de repaso a realizar, a continuación se detallaran las trayectorias y los parámetros de mecanizado de dichas operaciones, siendo estas comentadas en el orden cronológico que serán realizadas. En caso de requerir información en detalle y de forma esquemática, esta será recogida en la hoja de procesos ubicada en el Anexo 5.

### 8.2.1. Fase I – Planeado I

De acuerdo al planeado inicialmente definido, este se caracterizará por presentar la misma trayectoria de herramienta, salvo que solo constara de una única pasada, ya que al ser eliminado todo el sobreespesor dejado entre la preforma y la pieza en el mecanizado anterior, solo sería necesario mejorar con la herramienta ya desfasada la superficie de las caras de la pieza.

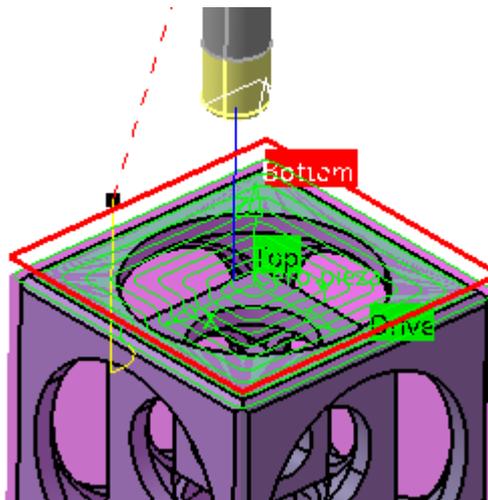


Figura 115. Trayectoria herramienta planeado

Como se puede observar, tanto las macros de entrada como de salida serán las mismas que las definidas en el planeado inicial, siendo también idénticos los parámetros de corte, es decir, las velocidades de giro y avances, los cuales eran referidos a mecanizado de alta velocidad.

### 8.2.2. Fase I – Contorneado I

Con objeto de cumplir con el principal de los objetivos de este mecanizado de repaso, encontramos el aumento de tamaño del diámetro del agujero de 40 mm para poder alojar en el, el utillaje diseñado y no fabricado de acorde a las tolerancias definidas. Para abordar tal mecanizado de aumento de diámetro, realizaremos un contorneado de tal agujero en lugar de volver a realizar el mismo cajeado definido anteriormente, ya que de esta forma ahorramos en tiempo muerto y movimientos en vacío de la herramienta.

Así pues, se aplicará un offset positivo del contorno del agujero de +0.025 mm, por lo que si sumamos dicho desfase positivo a ambos lados del agujero, el diámetro sufrirá un incremento de 0.05 mm, incremento suficiente para poder montar el utillaje. Como tal diámetro del agujero posee un ancho de 3.29 mm, lo cual nos llevaría más de 3 pasadas de acuerdo a los parámetros de corte fijados, nosotros desplazaremos la herramienta con respecto a la parte inferior de tal agujero en torno a -1.5 mm, permitiendo mecanizar todo el contorno con la periferia de la herramienta y de una única pasada.

Debido a que la profundidad radial a mecanizar es del orden de 0.025 mm, una dimensión insignificante, no existirá efecto adverso alguno porque realicemos el contorneado de tal agujero de una única pasada en lo que respecta a la profundidad axial. Así pues, los parámetros de corte serán los mismos que los empleados en los cajeados y planeados, es decir, propios de mecanizado de alta velocidad.

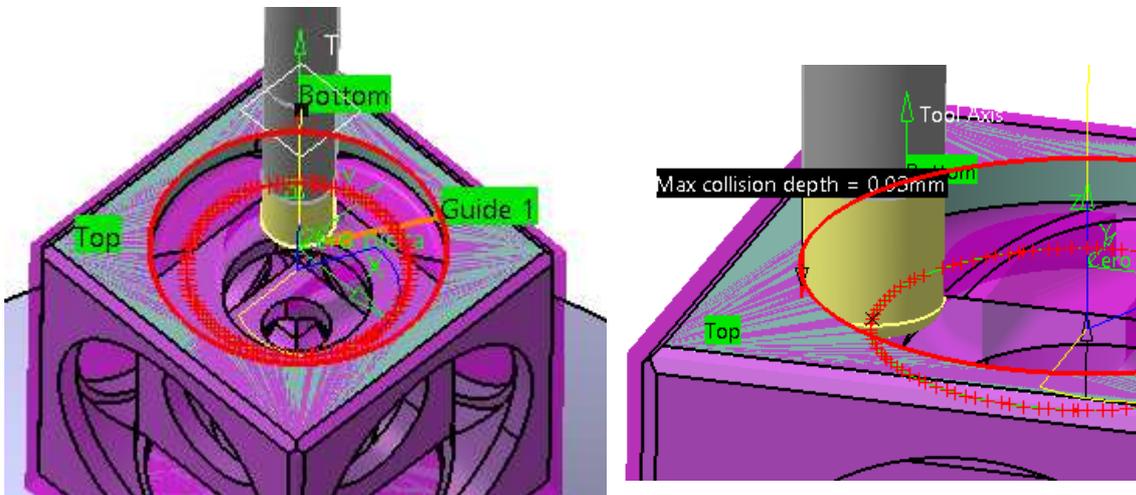


Figura 116. Trayectoria herramienta contorneado

A diferencia del resto de trayectorias observadas en otras operaciones de mecanizado, esta se caracteriza por estar marcada con rayas en color rojo. El significado de tales rayas es para avisarnos por parte del software CAD/CAM que se está mecanizando el diseño de la pieza, tratando esto como si de una colisión fuera. Debido a que nosotros somos conscientes de tal hecho y de lo que se pretende realizar, no tendrá más trascendencia tal aviso.

Aunque no se haya comentado hasta ahora, el contorneado presente se caracterizará por presentar un valor de sobre vuelta del 50%, de tal forma que se asegure que el contorno completo es mecanizado. Además, las macros de entrada y de salida son prácticamente

idénticas a las de los cajeados, es decir, penetra en la pieza por el centro del agujero desde el plano de seguridad y aproximada al contorno de forma tangencial. En el caso de la retirada de la herramienta, esta es retraída también tangencialmente y ubicada en el centro del agujero para preparar la herramienta para la siguiente operación de mecanizado.

### 8.2.3. Fase I – Cajeadado I

La presente operación de cajeadado no tiene como finalidad la eliminación y extracción del material sobrante existente en el, ya que en la primera pasada del mecanizado tal labor sería realizada. El objetivo de este cajeadado sería la rectificación del fondo del cajeadado, lo cual coincide con la superficie del cubo intermedio, mediante la herramienta desfasada, asegurándose así que se cumple las dimensiones definidas del diseño.

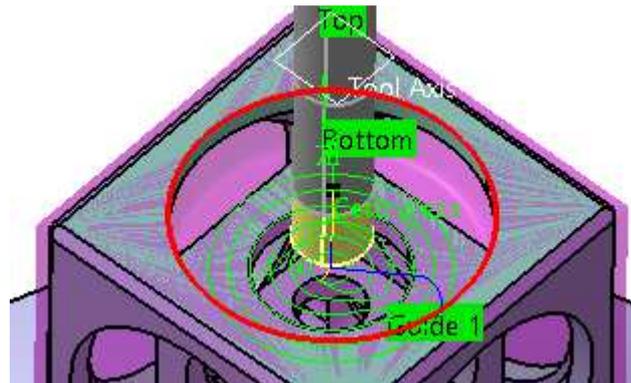


Figura 117. Trayectoria herramienta cajeadado superior

Debido a que solo se mecanizará el fondo del cajeadado, este solo poseerá una única pasada sobre la superficie del cubo intermedio, como si de un planeado se tratase. Como se puede observar, la macro de entrada ha sido definida de tal forma que la penetración de la herramienta en el cajeadado sea realizada por el centro de este, para después de haber terminado definir en la macro de salida que la herramienta sea retirada tangencialmente del contorno del cajeadado hasta ubicarla en el centro de este. En lo que respecta a los parámetros de mecanizado, estos se caracterizan por ser los mismos que los empleados en las operaciones de cajeadado inicialmente diseñadas.

### 8.2.4. Fase I – Contorneado y cajeadado II

Seguidamente se repetirán de forma cronológica las operaciones de mecanizado anteriores, es decir, las operaciones de contorneado y cajeadado en el agujero de diámetro 20 mm. La filosofía de la trayectoria, como de los parámetros de mecanizado será la idéntica a la comentada en las operaciones anteriores, siendo el resultado el mostrado a continuación,

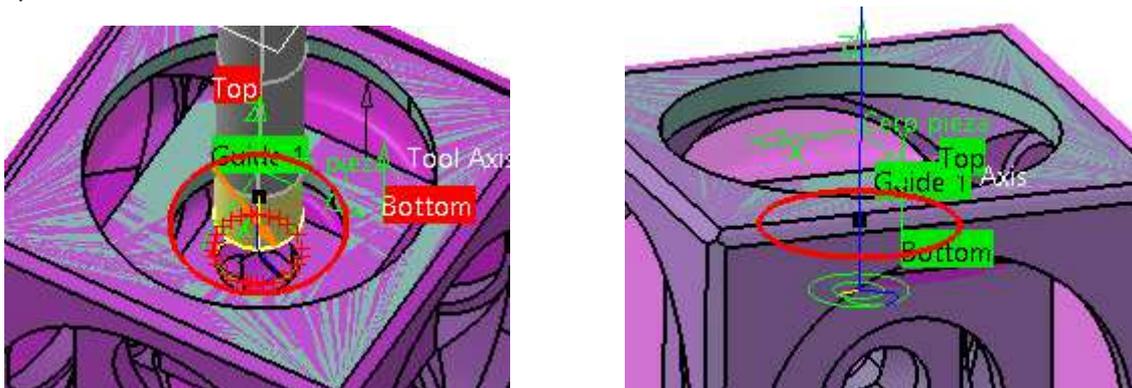


Figura 118. Trayectorias herramienta contorneado y cajeadado inferiores

De esta forma quedaría por completo rectificada una de las caras de nuestra pieza, solucionando tanto el defecto asociado a la descompensación de la longitud de la herramienta, como la modificación del tipo de ajuste entre el utillaje y la pieza, pasando a ser ahora de juego.

### 8.2.5. Fase I – Planeados II-V, contorneados y cajeados III-X

Posteriormente, todas las operaciones anteriores que han sido definidas para la cara superior de la pieza, serán repetidas en el resto de caras mediante la función *Copy Transformation Instruction*, realizando tal función la copia de las operaciones seleccionadas y sus respectivos giros en el resto de caras de la pieza.

### 8.2.6. Fase II – Ranurados I-X

Debido a que la fresa toroidal sería desfasada en un valor de 0.1 mm, la fresa de ranurar también se desfasaría un tamaño igual para evitar la existencia de posibles crestas o zonas sin mecanizar entre la parte mecanizada durante los cajeados y la zona de la superficie de los cubos mecanizada durante los ranurados.

Como consecuencia de ello, en la rectificación se incluiría de nuevo una operación de ranurado, pero esta vez en lugar de eliminar material radialmente, su objetivo sería quitar todo el material sobrante axialmente. Por tal motivo se diseñaría la operación de ranurado con una única pasada, la cual sería dada al pie de la superficie de los diferentes cubos interiores.

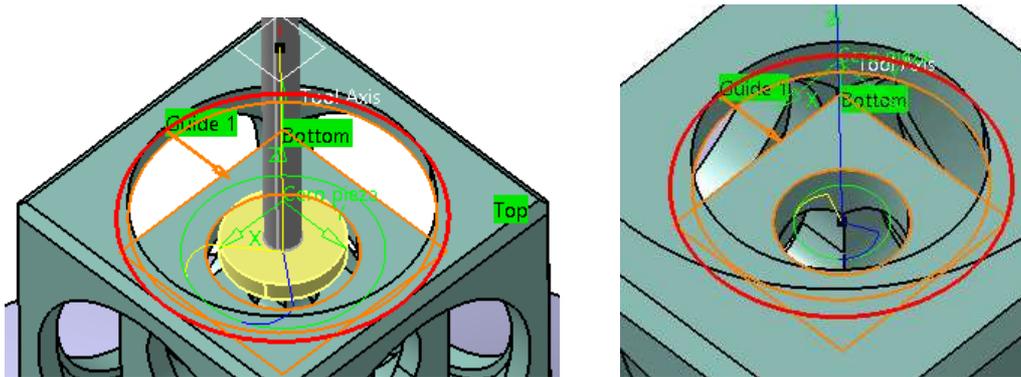


Figura 119. Trayectoria herramienta ranurados

La trayectoria de la herramienta será idéntica a la definida en las operaciones de mecanizado principales con la excepción de que solo constará de una única pasada. Al igual que en casos anteriores, la macro de entrada de ambos ranurados se definirá de forma que la herramienta penetre en los cajeados por el centro de estos, evitando así posibles colisiones. A su vez, tanto la proximidad como la retirada del contorno a ranurar serán realizadas de forma tangencial, consiguiendo así ir eliminando con la periferia de la herramienta todo el sobreespesor presente en la superficie de los cubos. Los parámetros de mecanizado serán también los mismos que los empleados en las operaciones definidas inicialmente.

Al igual que en los casos anteriores, sería repetido de nuevo las operaciones de ranurado en el resto de caras de la pieza mediante el empleo de la función *Copy Transformation Instruction*. Así pues, con todo este conjunto de operaciones el programa de CNC para la rectificación de la pieza quedaría definido completamente.

### 8.3. MECANIZADO II AMARRE A

Una vez postprocesado todas las operaciones de mecanizado de la rectificación y obtenido por tanto el programa de CNC, se iniciaría la puesta en práctica de la modificación del mecanizado en la máquina. Debido a que la pieza no habría sido desmontada del amarre para no alterar de forma alguna la posición de esta, no se sumaría ningún defecto más, solucionando los diferentes problemas anteriores.



**Figura 120.** *Pieza rectificada con y sin cuerpo del útil montado en un lateral*

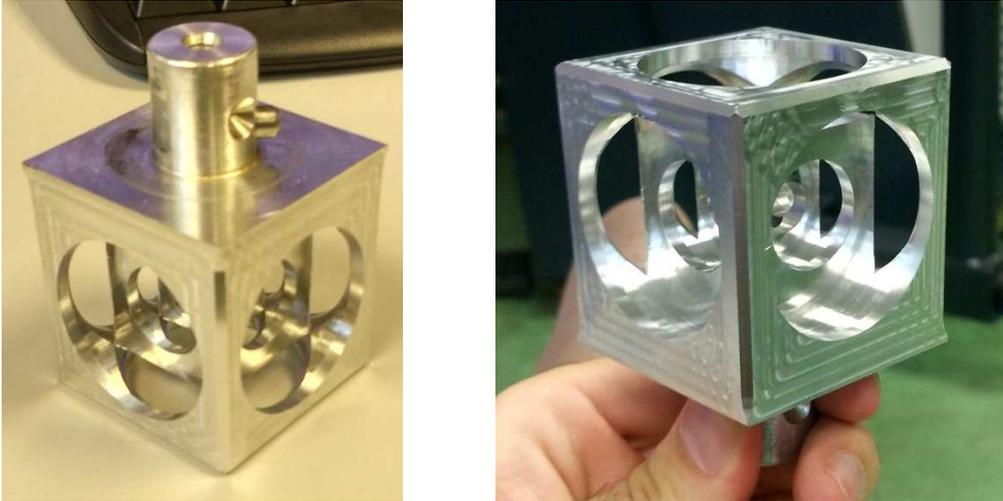
Analizando la pieza tanto visualmente (Imagen de la izquierda), como con los instrumentos de medida, observaríamos que no se repetiría de nuevo el defecto asociado a la mecanización parcial de las superficies, cumpliendo así con las medidas definidas para el diseño de la pieza. Además, el sobre mecanizado de los agujeros de la pieza con un offset de 0.05 mm fue realizado de forma correcta, permitiendo así absorber las desviaciones dimensionales del utillaje y por ende, pudiendo montar este en la pieza con un ajuste de juego (Imagén de la derecha).

Por otro lado, en lo que respecta a las posibles crestas de material sobrante entre las zonas mecanizadas durante el ranurado y el cajeado, hemos de comentar que el resalte entre ambas partes es mínimo, no apreciándose apenas cresta alguna.

En definitiva, este primer amarre estaría completado con éxito, habiendo obtenido una pieza intermedia acorde con los requerimientos dimensionales exigidos por el diseño, además de poseer un gran acabado superficial, ya que aunque en las imágenes se aprecien marcas de herramienta, la rugosidad de las mismas es tan baja que no es perceptible al tacto, siendo al tacto dichas superficies como si cristal fuera.

### 8.4. AMARRE B

Finalizado el mecanizado del primer amarre, la pieza intermedia sería desmontada del útil de base cónica, el cual se encuentra en la mesa de trabajo de la máquina. Esta pieza intermedia poseerá el tetón de la preforma inicial, el cual sirvió como elemento de sujeción de la pieza en el primer amarre.



**Figura 121.** *Pieza intermedia del amarre A*

Para evitar tener que mecanizar tal tetón, este se es cortado mediante una sierra mecánica, dejando la superficie completamente lisa como si no hubiera habido tetón alguno. De forma paralela, se realizaría también un taladro pasante en el centro de dicha superficie con el objeto de comprobar hasta que altura quedaría alojado el cuerpo del útil en la pieza y observar así, si se produciría colisión alguna durante el cajead.

Llegado a este punto se montaría el utillaje diseñado en la pieza, pudiendo comprobar como ciertas dimensiones de este a pesar de haberse rectificado la pieza presentarían un ajuste indeterminado, teniendo que ejercer cierta fuerza para su montaje. Además de ello, al estar el utillaje compuesto por diferentes partes, las cuales poseen una única posición muy ajustada, dificultaría aún más el montaje del mismo.



**Figura 122.** *Utillaje diseñado y montado en pieza intermedia*

Una vez montado el utillaje y este a su vez en el útil de base cónica como se puede apreciar en la figura anterior, comprobaríamos las posibles vibraciones u holguras que el conjunto útil-pieza presentan, siendo estas inexistentes. Así pues, a pesar de tener un montaje difícil debido a los ajustes, este aportaría al conjunto una gran robustez.

Al igual que en el amarre A se mediría la distancia del sistema de referencia de la pieza a la base de la máquina, es decir, del cero pieza con respecto al sistema de referencia predeterminado de la máquina. Sin embargo, en lugar de almacenar la posición del cero pieza nuevo en la misma

variable que para el amarre A, este se almacenaría en la variable 21, comunicando tal posición al programador para que modificará en consonancia el programa CNC.



**Figura 123.** *Medición posición cero pieza en amarre B*

Ahora bien, antes de comenzar a realizar ninguna operación de mecanizado en el segundo amarre se realizaría previamente el mecanizado sobre material blando, asegurándose así de que el código postprocesado sería el correcto y que no se produciría colisión alguna con el utillaje, habiendo esto ya sido comprobado mediante el simulador tanto del software CAD/CAM, como del verificador del código.



**Figura 124.** *Prueba mecanizado amarre B*

Así pues, realizada la prueba y habiéndose comprobado que se encuentra correcto el programa de CNC para el segundo amarre, se montaría el conjunto pieza-útil en la mesa de trabajo de la máquina, quedando como se muestra a continuación.



**Figura 125.** *Pieza intermedia montada en amarre B*

El presente mecanizado de acuerdo a lo definido en el capítulo 6, se caracterizaría por ser prácticamente idéntico al del mecanizado del amarre A, siendo este de menor duración y complejidad al presentar un menor número de giros por presentar la cara a mecanizar ubicada en la parte superior del amarre. Hemos de comentar que durante la mecanización, la generación de vibraciones no fue muy alta, justificando tal hecho por la ausencia de sonido estridente al remover el material, además de no observar en la superficie de la pieza marcas intermitentes algunas.

En lo que respecta a la forma de penetración de la herramienta, la cual se realizaría de forma helicoidal, no supuso ningún problema ni para la herramienta, ni para la robustez de la sujeción del utillaje, siendo comprobado que no supone ningún tipo de limitación este tipo de entrada de la herramienta.

Tras finalizar los chaflanados de las aristas, así como el ranurado para la liberación completa de los cubos, el resultado obtenido sería el mostrado a continuación, estando la pieza aún montada sobre el utillaje diseñado para el amarre B.



**Figura 126.** *Pieza final montada en utillaje*

Como podemos apreciar no existen marcas de falta de mecanización como en el caso del amarre A, ni marcas de la herramienta de forma intermitente. Además de ello, sobre todo en la imagen de la derecha, vemos como las esquinas del cubo intermedio e inferior se encuentran

completamente separadas del resto de la pieza, siendo esta buena señal de que la mecanización, como la compensación del radio de la herramienta ha sido correcto.

En lo que respecta al utillaje, en las figuras anteriores se puede apreciar como el desfase de las caras planas de los negativos y del extremo superior del cuerpo del útil ha sido definido correctamente, no habiendo supuesto ningún riesgo dichas partes durante la mecanización por su aproximación a la zona de trabajo. Además, aunque no todas las dimensiones de este se encontraran dentro de tolerancia, generando un ajuste indeterminado en ciertos casos, la inmovilización de los cubos han sido completa, pudiendo decir que el material del utillaje ante el fuerte apriete mediante el eje pasante absorbería las posibles desviaciones existentes en el conjunto.

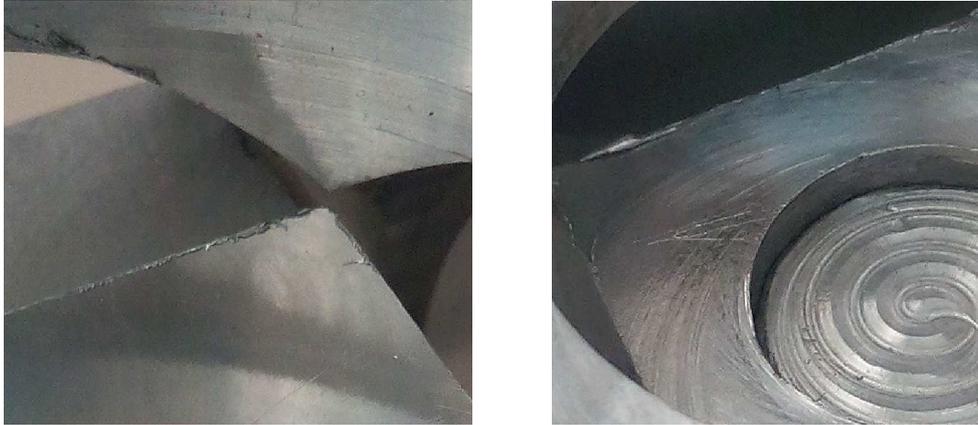
Inmediatamente desmontamos el utillaje de la pieza, lo cual supondría cierto esfuerzo al igual que su montaje, observamos que los cubos caen por su propio peso, quedando completamente sueltos sin la necesidad de separarlos manualmente.



**Figura 127.** *Pieza final mecanizada*

Realizando un análisis de la pieza en lo que respecta al acabo superficial, encontramos que por general las superficies de todos los cubos poseen una rugosidad muy baja, apenas perceptible

al tacto. Sin embargo, en la mayoría de las aristas de los cubos internos encontramos ciertas rebabas, estando mayoritariamente estas ubicadas cerca de las esquinas donde convergen las aristas. Tal motivo se debe a que durante el ranurado la herramienta empleada no presenta filos de corte en las esquinas, ni en su zona frontal, de tal forma que el material más próximo a la superficie de los cubos sería removido mayoritariamente por deformación, en lugar de por corte, generando así tales rebabas.



**Figura 128.** *Rebabas en aristas de los cubos interiores*

Como medida de solución a tal problema se podría recurrir al empleo de fresas de ranurar que presentasen pequeños filos de corte en su zona frontal, o bien, modificar los parámetros de mecanizado del ranurado en el sentido de incrementar aún más la velocidad de corte y por el contrario, reducir la velocidad de avance. De esta forma no solo podríamos llegar a eliminar tales rebabas, sino también mejorar el acabado superficial de las caras, sobretodo del cubo inferior, siendo este el más castigado en este sentido.

Por otro lado, el análisis dimensional revela que la mayoría de las variables tales como longitudes, diámetros y profundidades se encuentran dentro de las tolerancias de mecanizado, pudiendo afirmar que al mecanizar en alta velocidad mediante las operaciones de planeado y cajeado, hemos conseguido una gran precisión dimensional en las zonas críticas, ratificando así una de las características propias de esta técnica. Además de remarcar la precisión, hemos de afirmar también el gran acabado superficial conseguido, siendo algunas zonas empobrecidas por haber hecho pasar la fresa de ranurar, como por ejemplo las superficies de los cubos intermedio e inferior.

En términos generales el mecanizado realizado se comprende como un gran logro, ya que como se ha podido apreciar se ha conseguido cumplir con las exigencias dimensionales, de acabado y del control completo y seguro de la máquina, siendo ciertos defectos encontrados como los asociados al utillaje y a la descompensación de la herramienta, los cuales pueden considerarse como factores terceros del mecanizado.

## 9. CONCLUSIÓN

Finalizado el proceso de diseño, programación y fabricación de la pieza, así como de los elementos auxiliares empleados, hemos de destacar que se ha alcanzado y superado cada uno de los objetivos planteados, siguiendo en todo momento un proceso cíclico basado en el rediseño de las operaciones y análisis continuo de los resultados, ajustándonos en todos los casos a los diferentes medios de los que hemos dispuesto.

Según se ha podido dar cuenta, el objetivo general que engloba el espíritu del proyecto no es la obtención en sí de una determinada pieza, sino toda la tecnología y el arte que respaldan el proceso seguido para su consecución, viéndose todo ello demostrado en cada uno de los apartados que constituyen el presente proyecto. Gracias a ello, el proyecto se constituye como una puesta en práctica de grandes campos del mundo ingenieril, los cuales van desde el diseño de operaciones y componentes, hasta la aplicación de la tecnología de mecanización como proceso de fabricación, pasando por la programación y el control de las máquinas que hacen de puente entre la idea y la realidad.

Profundizando en cada uno de los campos citados, en el ámbito del diseño debemos destacar que se ha conseguido modelar una pieza no relativamente compleja, pero adaptada a los medios que se disponen y potenciadora de las capacidades cinemáticas de la máquina empleada, pudiendo poner en práctica movimientos y controles básicos propios de una máquina de 5 ejes. Además de ello, ante los diferentes inconvenientes encontrados a la hora de fabricar, hemos de destacar el diseño de herramientas auxiliares que han permitido la mecanización de la pieza, desarrollando para ello un utillaje de gran robustez. Tal diseño del utillaje puede considerarse un éxito, debido a que la relación entre el número de componentes y las funciones a realizar es relativamente bajo, pudiendo abordar el utillaje simultáneamente tanto la labor de inmovilización de los cubos interiores, como la de amarre completo de la pieza intermedia.

En lo que respecta a la tecnología de mecanización, resaltar el profundo estudio y análisis realizado de las trayectorias de movimiento de las herramientas, así como de los parámetros de corte definidos, consiguiendo procesos de mecanización óptimos, libres de colisiones y movimientos extraños. Paralelamente, dentro de estos términos hemos de destacar también la aplicación de una variante avanzada del mecanizado convencional, es decir, el mecanizado de alta velocidad, el cual nos ha brindado la oportunidad de conseguir un mecanizado de gran precisión dimensional y acabado superficial, acompañado de una gran reducción del tiempo de mecanización.

Por otro lado, el control de la máquina como el postprocesamiento han constituido un campo del proyecto de gran importancia, debido a la necesidad de crear y configurar un postprocesador propio para el controlador de la máquina, teniendo que realizar continuas pruebas tanto en simulador como en la máquina real para asegurarse que la mecanización sería realizada a la perfección, evitando incidentes catastróficos. Esta labor ha supuesto desde el aprendizaje de las funciones del controlador de la máquina y la configuración del postprocesador, hasta el estudio y análisis detallado de los resultados, descubriendo la gran complejidad asociada a esta fase.

En resumen, el proyecto se erige como una aplicación práctica exitosa de los conocimientos y tecnología de diferentes campos ingenieriles asociados al proceso de fabricación mediante mecanizado, mostrando el proceso o las pautas a seguir en cualquier proceso de fabricación de esta índole, reuniendo desde la concepción de lo que se quiere fabricar, hasta su obtención, pasando por el desarrollo de elementos auxiliares como utillajes, postprocesadores, estudio de la máquina... entre otros aspectos.



## 10. LÍNEAS FUTURAS

Partiendo de lo realizado en el presente proyecto con el objetivo de llevar a cabo ciertas mejoras o desarrollos continuados del mismo, enumeramos a continuación cada una de las posibles líneas futuras a abordar:

- Debido a las limitaciones encontradas en el postprocesador empleado, relacionadas a la generación de errores sintácticos en el código postprocesado, nos han conducido a realizar modificaciones manuales del código, así como reducir las capacidades de interpolación que ofrecen tanto el software CAD/CAM, como el postprocesador. Así pues, como una línea de mejora encontramos el estudio de tales limitaciones, en el sentido de realizar las correspondientes modificaciones del postprocesador, o bien, desarrollar un nuevo postprocesador completo para el controlador de nuestra máquina (iTNC 530), permitiendo optimizar el proceso de postprocesamiento con el objetivo de aportar una mayor repetitividad, precisión y automatización del proceso.
- Asentadas las bases principales para la mecanización de piezas en la máquina de 5 ejes, una posible línea futura sería la fabricación de piezas complejas, las cuales presenten superficies curvas o de difícil acceso y mecanización que mediante máquinas convencionales sería prácticamente imposible. Además de ello, completar tal fabricación con la mecanización en alta velocidad, siendo esta línea futura una forma de exprimir al máximo las capacidades que presenta la máquina Mikron HSM 400U.
- Con objetivo de definir un proceso de fabricación completo y autónomo, unas de las posibles líneas futuras sería la integración de un brazo robótico en la unidad de mecanizado, ahorrando de esta forma la figura de la persona tanto para la carga de material y cambio de amarre en caso necesario, así como de la extracción de las piezas de la máquina. Además, esta línea futura pondría en uso el brazo robótico con el que se cuenta en el taller, siendo por tanto un proyecto de mejora con aplicación práctica, pudiendo estudiar toda la tecnología y consecuencias que se encuentra detrás de un proceso industrial automatizado.



## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz. *Machine Tools for High Performance Machining*. Springer, UPV, País Vasco, 2009
- [2]. Mikell P. Groover. *Fundamentos de manufacturera moderna*. McGraw-Hill, México, 2007.
- [3]. S. Kalpakjian, S.R. Schmid. *Manufacturera, Ingeniería y Tecnología*. Pearson Educación, México, 2008.
- [4]. Interempresas. *Evolución técnica de la máquina-herramienta. Reseña histórica*. [En línea]. Disponible en web <<https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>>. Consultado 08/05/2017
- [5]. Sandvik. *High speed machining and conventional die and mould machining*. [En línea]. Disponible en web <<http://190.105.160.51/~material/tecmechanica/material/HSM.pdf>>. Consultado 16/06/2017.
- [6]. Marta Albertí Ibarz, Tesis doctoral: *Contribución al desarrollo del proceso de selección de centros de mecanizado de alta velocidad, basado en parámetros tecnológicos y de productividad*. Universidad de Girona, 2010.
- [7]. Pasko, R. – Przybylski, L. & Slodki, B. *High speed machining (HSM) – The effective way of modern cutting*. International Workshop CA Systems and Technologies, 72-79, 2009.
- [8]. UNE-EN 60034-1. *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento*. AENOR (2011).
- [9]. Universidad del País Vasco. *Teoría: Control numérico para máquinas-herramientas*. Dpto. de Ingeniería Mecánica. [En línea]. Disponible en web <[http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/737\\_ca.pdf](http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/737_ca.pdf)>. Consultado 23/07/2017.
- [10]. Heidenhain. *Manual de lenguaje conversacional Heidenhain para controlador iTNC 530*. Versión 2, 2003.
- [11]. AgieCharmilles. *Technical data MIKRON HSM 400U LP*. [En línea]. Disponible en web <[http://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/Milling2014/MIKRON%20HSM\\_400\\_400u\\_500\\_600\\_600u\\_800\\_lp\\_data\\_de.pdf](http://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/Milling2014/MIKRON%20HSM_400_400u_500_600_600u_800_lp_data_de.pdf)>. Consultado 05/08/2017.
- [12]. Sherline Products. *Making a Turner's Cube on a Sherline Lathe*. [En línea]. Disponible en web <<http://sherline.com/Wordpress/wp-content/uploads/2015/11/t1000cubeinst.pdf>>. Consultado 04/08/2017.
- [13]. CATIA V5. *Catia Version 5 Release 20 User's Documentation*. [En línea]. Disponible en web <[http://catiadoc.free.fr/online/CATIA\\_P3\\_default.htm](http://catiadoc.free.fr/online/CATIA_P3_default.htm)>. Consultado 11/08/2017.

- [14]. Izar cutting tools. *Parámetros de corte broca HSS*. [En línea]. Disponible en web <<http://www.izartool.com/es/catalogos/catalogo-industrial/taladro/brocas-mango-cilindrico/1013/33112-1>>. Consultado 15/08/2017
- [15]. Garrtool. *Cutting parameters recommendations for High Speed Milling*. [En línea]. Disponible en web <<https://www.garrtool.com/doc/pdf/TECHNICAL.pdf>> Consultado 19/08/2017
- [16]. Secotools. *Fresas enterizas para mecanizado de alta velocidad*. [En línea]. Disponible en web <<https://www.garrtool.com/doc/pdf/TECHNICAL.pdf>>. Consultado 19/08/2017
- [17]. Sandvik. *Machining training handbook*. [En línea]. Disponible en web <[http://sandvik.ecbook.se/se/es/training\\_handbook/](http://sandvik.ecbook.se/se/es/training_handbook/)>. Consultado 05/08/2017
- [18]. Young cutting tools. *Recommended cutting conditions for milling cutter*. [En línea]. Disponible en web <<http://youngcuttingtools.nl/wp-content/uploads/2015/09/milling-cutters.pdf>>. Consultado 20/08/2017
- [19]. UNE-EN ISO 286-1. *Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 1: Base de tolerancias, desviaciones y ajustes*. AENOR (2013).
- [20]. UNE-EN 22768-1. *Tolerancias generales. Parte 1: tolerancias para cotas dimensionales lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia*. AENOR (1994).
- [21]. Universidad de Cantabria. *Teoría: Tolerancias de fabricación*. [En línea]. Disponible en web <<https://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/4.1%20Tolerancias.pdf>>. Consultado 25/07/2017.
- [22]. L. Altिंग. *Procesos para Ingeniería de Manufactura*. Alfaomega, México, 1990.
- [23]. CATIA. *User documentation: Machining Resources*. [En línea]. Disponible en web <[http://catiadoc.free.fr/online/mfgug\\_C2/mfgugrf0700.htm](http://catiadoc.free.fr/online/mfgug_C2/mfgugrf0700.htm)> Consultado 05/09/2017.

---

# **ANEXO I. ESTUDIO TOLERANCIAS UTILLAJE**

---



## 1. INTRODUCCIÓN SISTEMA TOLERANCIAS Y AJUSTES

La definición de tolerancias dimensionales como los ajustes pertinentes entre diferentes partes de una pieza o conjunto supone un elemento esencial de cara a asegurar la viabilidad de las piezas una vez fabricadas, aportándoles la propiedad de intercambiabilidad y calidad por el cumplimiento de los requerimientos de diseño.

Así pues, en el presente anexo se describirá el estudio llevado a cabo para la determinación de las diferentes tolerancias que definirán por completo las dimensiones a tener en cuenta del utillaje diseñado. Ciertas de estas dimensiones son catalogadas como dimensiones claves por el hecho de que el no cumplimiento de las tolerancias asociadas a ellas, provocarían que el comportamiento del utillaje no fuera el idóneo, pudiéndose producir efectos no deseados tales como no poder montar el útil en la pieza, o bien encontrar ciertas holguras excesivas que produjeran vibraciones en el conjunto pieza-útil, traduciéndose esto último en una pérdida tanto de la calidad del acabado superficial como de la precisión dimensional de la pieza.

Para abordar tal estudio nos hemos apoyado en los sistemas de codificación de tolerancia y ajustes recogidas por las normativas UNE, siendo empleadas tanto la normativa UNE EN ISO 286-1:2011 para ajustes y la norma UNE EN 22768-2 para tolerancias libres [19,20]. El empleo de dicha normativa ha sido motivado por la facilidad que ofrece para la categorización de las dimensiones, así como poder aportar cierta estandarización a nuestro utillaje.

Antes de comenzar con el estudio detallado, se llevará a cabo una breve explicación de los conceptos y teoría básica sobre la que se fundamenta la definición de tolerancias y ajustes. Entre los conceptos destacables, el cual nos acompañara a lo largo del anexo, encontramos el concepto de tolerancia, siendo este definido como el espacio permisible de variación del valor de medida de una determinada variable dimensional, es decir, el rango de valores sobre el cual deberá de encontrarse la variable medida. La aplicación de este concepto nace de la dificultad para la fabricación de piezas con dimensiones exactas, de tal forma que la definición de tolerancias facilitará el intercambio de piezas, desarrollando el concepto de intercambiabilidad.

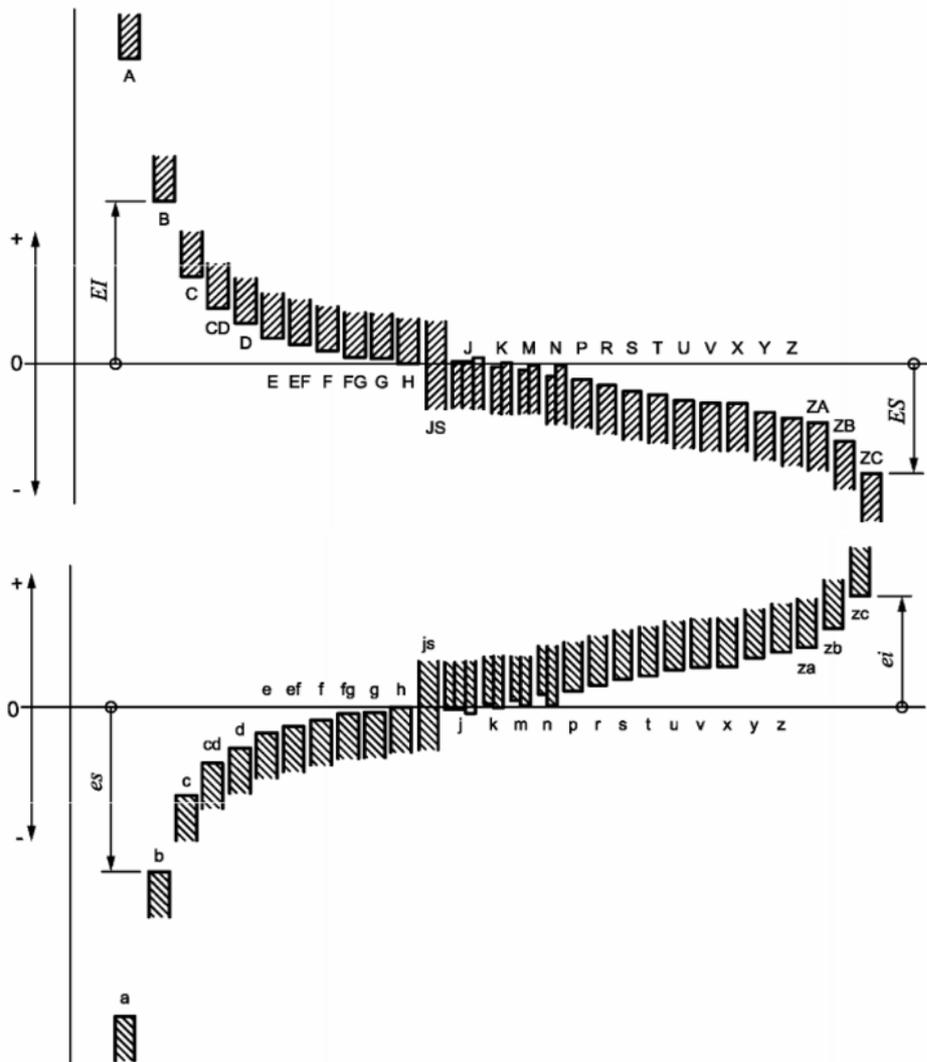
Enlazado con la tolerancia, encontramos un concepto importante en lo que respecta al ensamblaje de componentes, conocido como ajuste. Este término es definido como la relación entre una entidad dimensional externa y una interna que se ensamblarán, pudiendo ser dicha relación de apriete (inmovilización completa de los elementos), de juego (movilidad entre los componentes) o indeterminada (posibilidad de ambos casos anteriores). Así pues, según la norma ISO para la definición de un ajuste se necesitan de tres características principales,

Ejemplo: **40 H 8 / h 10**  
(1) (2) (3)

- **Dimensión nominal (1):** valor teórico o exacto que posee una dimensión, siendo respecto a esta la definición de los límites inferiores y superiores.
- **Posición del intervalo de la tolerancia (2):** se trata de una letra, mayúscula en el caso de ser agujero o elemento absorbedor, o minúscula en el caso de ser eje o elemento a absorber. Dicha letra, define la posición de la zona de tolerancia ya sea para ejes o agujeros, pudiendo saber cómo se ubicarán los límites inferiores y superiores de la tolerancia. En la figura siguiente se muestra dicha disposición tanto para ejes como agujeros respecto a la línea de referencia. La posición de la tolerancia es dada mediante varias tablas recogidas en

la norma ISO-286-1:2011, dando la posición de la desviación inferior o superior dependiendo de la ubicación de la tolerancia.

- **Grado del intervalo de tolerancia (3):** número representativo de la anchura de la zona de tolerancia, siendo denotado por el término IT, más el número referido, por ejemplo IT6. El valor del grado de la tolerancia es recogida en la tabla 1 de la norma EN UNE ISO 286-1:2011, de tal forma que el tamaño de la tolerancia variará según el tamaño del elemento a estudiar y del grado de la tolerancia correspondiente, siendo mejor contra menor sea el número del grado de tolerancia.



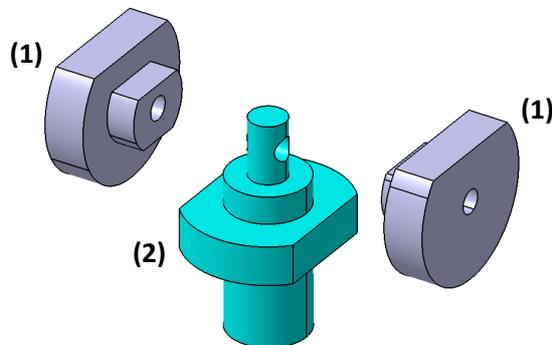
**Figura 129.** Posición tolerancia agujeros (Gráfica superior) y ejes (Gráfica inferior)

Así pues, dependiendo de la posición relativa de las zonas de tolerancia entre agujero y eje determinaremos el tipo de ajuste. De tal forma que si no se produce ningún tipo de solapamiento entre agujero y eje, y se encuentra ubicada la zona de tolerancia del eje por debajo de la del agujero tendremos juego. En caso contrario, se produciría apriete, y en caso que exista un solapamiento parcial entre ambas zonas obtendremos indeterminado.

Con respecto al resto de vocablos que pueda llegar a encontrar en el presente anexo, así como ciertas ecuaciones y una versión extendida de la teoría del sistema de codificación de tolerancias

podrá ser encontrada en las respectivas normas mencionadas. Aun así, durante el desarrollo del estudio ciertos conceptos básicos serán brevemente explicados para facilitar la comprensión.

Debido a que el número de variables a determinar su tolerancia y ajuste es muy elevado, el presente estudio se dividirá en tantos apartados como piezas o partes tenga el utillaje diseñado, encontrando en cada uno de ellos los estudios pertinentes realizados.



**Figura 130.** Conjunto utillaje

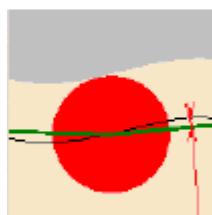
Las partes que componen nuestro utillaje es mostrado en la figura presente, encontrando por un lado los negativos (1), elementos que presionaran lateralmente los cubos e impedirán el giro de la pieza con respecto al utillaje. Y por otro lado, encontramos el cuerpo del útil (2) que además de realizar funciones similares a los de los negativos, este es el encargado tanto de mantener unido el útil con respecto a la pieza, así como actuar de amarre para la misma.

Sin embargo, antes de comenzar con cada pieza del útil, determinaremos las tolerancias clave de nuestra pieza a mecanizar, ya que estas condicionarán en gran medida el resto de ajustes y tolerancias del utillaje.

## 2. TOLERANCIAS PIEZA

Las principales variables dimensionales de la pieza a mecanizar que poseen una gran influencia sobre el útil son los diámetros de cada uno de los agujeros de la pieza, así como la profundidad entre estos. El hecho de su importancia reside por ser zonas que determinarán si el útil puede ser alojado en su interior o no, y del grado de holgura presente entre ambos.

De acuerdo a la tolerancia a desarrollar en el mecanizado, esta es fijada en  $\pm 0.025$  mm en el software CAD/CAM, una escala perfectamente tolerable por parte de nuestra máquina Mikron HSM 400U ya que emplea una escala en sus movimiento que llega hasta la milésima de milímetro. El reparto de dicha tolerancia sería sobre la trayectoria realizada por la herramienta, pudiendo estar por fuera o por dentro de la trayectoria teórica como podemos ver en la figura siguiente.



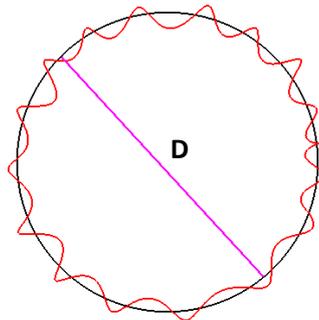
**Figura 131.** Tolerancia mecanizado

Cabría también pensar en tener presente la tolerancia aportada por las herramientas de corte, pero no se considerará necesario ya que las tolerancias de las herramientas son prácticamente insignificantes, estando definidas mayoritariamente por una tolerancia h6. En el caso de la herramienta de mayor tamaño, la tolerancia estaría comprendida entre 0 mm y -0.009 mm, una medida apenas influyente, siendo para el resto de herramientas aún más inferior.

Así pues, teniendo en cuenta el valor de la tolerancia de mecanizado fijada, determinaremos la amplitud de la tolerancia tanto en los agujeros como en la profundidad de estos, siguiendo en la medida de lo posible la codificación del sistema ISO.

### 1.1. Diámetro cajeado agujeros circulares

Sí dibujásemos la trayectoria real (Color rojo) seguida por la herramienta durante el mecanizado sobre la teórica (Color negro), observaríamos las fluctuaciones que podríamos llegar a encontrarnos. Dichas fluctuaciones están comprendidas entre  $\pm 0.025$  mm, por lo que si trazamos una línea recta (Color morado) que pase por el centro del círculo para determinar el diámetro del mecanizado real, nos damos cuenta de que a ambos extremos del segmento existirían posibles desviaciones.



**Figura 132.** Trayectoria real y teórica del mecanizado circular

Por tanto, el diámetro del agujero podría ser:

- En el caso de que la herramienta haya realizado durante todo el mecanizado una trayectoria por el exterior de la teórica dentro del valor permisible de la tolerancia de mecanizado, el diámetro sería

$$D_{real} = D_{nominal} + 0.025 * 2 = D_{nominal} + 0.05 \text{ mm}$$

- En el caso de que la herramienta haya mecanizado por el interior de la trayectoria teórica dentro del valor permisible de la tolerancia de mecanizado, el diámetro sería:

$$D_{real} = D_{nominal} - 0.025 * 2 = D_{nominal} - 0.05 \text{ mm}$$

Por lo que teniendo en cuenta los valores anteriores, el rango de desviaciones y por ende, la tolerancia será:

$$Desviaciones_{Diametro} = \pm 0.05 \text{ mm} \rightarrow Tolerancia_{Diametro} = 0.1 \text{ mm}$$

Debido a que las desviaciones son simétricas con respecto a la dimensión nominal y observando en las gráficas de posición de tolerancias para agujeros (Figura 129), encontramos que la zona de tolerancia estaría definida por las letras JS.

Con respecto al grado de las tolerancias (IT) estas dependerán principalmente de las dimensiones de los diámetros. Por lo que entrando en la tabla 1 de la norma ISO 286-1:2011 con las dimensiones de los diámetros nominales encontraremos el grado de la tolerancia. En nuestro caso, para:

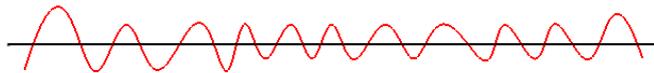
$$D_{Mayor} = 40 \text{ mm y } T = 0.1 \text{ mm} \rightarrow IT10 = 0.1 \text{ mm}$$

$$D_{Medio} = 20 \text{ mm y } T = 0.1 \text{ mm} \rightarrow IT10 = 0.084 \text{ mm} < T < IT11 = 0.13 \text{ mm}$$

Debido a que no todas las tolerancias de los diámetros coinciden con el grado de tolerancia dado por la normativa ISO, obviaremos la categorización presente en dicha norma. El hecho que nos motiva a realizar esto es evitar la pérdida de información dimensional, es decir, si categorizamos las tolerancias según los grados de tolerancia próximos, podremos estar restringiendo aún más las medidas, o bien, dando tolerancias que no son reales, teniendo todo esto efectos sobre las dimensiones del utillaje.

## 1.2. Profundidad cajeado agujeros circulares

La tolerancia de mecanizado también se encuentra relacionada con el plano vertical que contiene a la herramienta, es decir, la desviación que puede llegar a sufrir la herramienta ya sea por encima o por debajo de su trayectoria verticalmente, lo cual determinará la planitud de la superficie mecanizada y en nuestro caso, la profundidad real que presente el agujero. En la figura siguiente se muestra la trayectoria real seguida por la herramienta (Color rojo) sobre la trayectoria teórica de esta (Color negra) en el plano vertical.



**Figura 133.** Trayectoria real y teórica en plano vertical.

Dichas desviaciones de la superficie estarán comprendidas dentro de la tolerancia del mecanizado, es decir, en un rango de  $\pm 0.025 \text{ mm}$ . Así pues, como la profundidad del agujero será medida desde la superficie exterior de la pieza mecanizada hasta la cara del cubo interior pertinente, deberemos de tener en cuenta las desviaciones tanto de la cara exterior como interior, por lo que la profundidad en los casos extremos será,

- En el caso de que la desviación de la cara superior estuviera en el máximo posible de la desviación superior, y la cara inferior en el caso contrario, la profundidad será,

$$P_{Real} = P_{Nominal} + 0.025 * 2 \text{ mm} = P_{Nominal} + 0.05 \text{ mm}$$

- En el caso de que la desviación de la cara superior estuviera en el máximo posible de la desviación inferior, y la cara inferior en el caso contrario, la profundidad será,

$$P_{Real} = P_{Nominal} - 0.025 * 2 \text{ mm} = P_{Nominal} - 0.05 \text{ mm}$$

Por lo que teniendo en cuenta los valores anteriores, el rango de desviaciones y por ende, la tolerancia de la profundidad del agujero será:

$$Desviación_{profundidad} = \pm 0.05 \text{ mm} \rightarrow Tolerancia_{profundidad} = 0.1 \text{ mm}$$

Aunque no se trate del diámetro de un agujero, esta dimensión puede ser tratada como tal, ya según recoge la normativa ISO, la tolerancia entre caras paralelas será regulada también por la presente normativa. Así pues, la cara de mayor tamaño será considerada como si de un agujero fuera y viceversa, por lo que podrá clasificarse la zona de tolerancia con letras mayúsculas. En este caso, le corresponde JS debido a que la profundidad real podrá variar de forma simétrica con respecto a la dimensión de la profundidad nominal.

En lo que respecta al grado de la tolerancia, este dependerá de la dimensión de la profundidad a considerar, siendo el proceso seguido para su identificación el comentado en el caso anterior para los agujeros circulares, es decir, entrando con la dimensión nominal y la tolerancia, buscamos el grado de tolerancia para el cual coincida el valor, o en su defecto el rango donde este comprendida. Así pues, en nuestro caso encontramos:

$$P_{Cubo_{Mayor-Medio}} = 10 \text{ mm y } T = 0.1 \text{ mm} \rightarrow IT11 = 0.09 \text{ mm} < T < IT12 = 0.15 \text{ mm}$$

$$P_{Cubo_{Medio-Pequeño}} = 7 \text{ mm y } T = 0.1 \text{ mm} \rightarrow IT11 = 0.09 \text{ mm} < T < IT12 = 0.15 \text{ mm}$$

Como podemos observar el grado de la tolerancia recogida en la tabla no coincide de forma exacta con la tolerancia calculada, siendo por ello que para el resto de casos en los que sea necesaria, se empleara los valores del cálculo. De lo contrario, estaríamos ampliando la tolerancia del mecanizado o restringiéndola más de lo real, lo cual podría tener un efecto no positivo en el funcionamiento entre útil y pieza.

### 3. TOLERANCIAS Y AJUSTES PARA LOS NEGATIVOS

Siendo conscientes de los valores de tolerancia del mecanizado y en especial de las tolerancias de las variables anteriormente calculadas, podremos determinar los ajustes necesarios entre utilaje y pieza para asegurar un ensamblaje y funcionamiento óptimo de este. Analizando el negativo respecto a sus variables dimensionales, encontramos una serie de cotas que deben de tenerse en cuenta para garantizar el correcto comportamiento del útil.

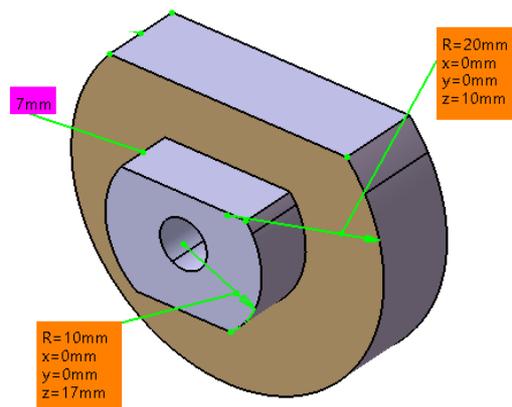


Figura 134. Medidas a estudiar del negativo

#### 3.1. Contornos circulares

De las medidas remarcadas en la figura anterior, estudiaremos por un lado los diámetros que posee el negativo (Dimensiones color naranja) por el hecho de que si dichos contornos circulares se fabricarán con un tamaño excesivamente pequeño se generarían vibraciones entre útil-pieza

y en caso opuesto, si fueran más grandes que el diámetro de la pieza no podrían llegar a alojarse en ella.

El ajuste que buscamos principalmente entre estos contornos circulares y los agujeros de la pieza a fabricar, sería de juego, es decir, un ajuste con el juego justo para poder ser montado el utillaje y que a su vez no existan apenas holguras para evitar posibles vibraciones del conjunto.

Por lo tanto, partiendo de las desviaciones y tolerancia anteriormente calculadas para agujeros circulares de la pieza, encontramos que las tolerancias para los diferentes contornos circulares son,

- **Diámetro mayor (D=40 mm):** en el caso del agujero:

$$\text{Diámetro}_{\text{Nominal}} = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Desviación}_{\text{Superior}} = \text{Des}_{\text{Sup}} = +0.1 \text{ mm} \rightarrow \text{Diámetro}_{\text{Superior}} = 40.05 \text{ mm}$$

$$\text{Desviación}_{\text{Inferior}} = \text{Des}_{\text{Inf}} = -0.1 \text{ mm} \rightarrow \text{Diámetro}_{\text{Inferior}} = 39.95 \text{ mm}$$

En el caso del eje, al buscar un juego justo, el juego mínimo que es definido como la diferencia entre el diámetro inferior del agujero ( $D_I$ ) y el diámetro superior del eje ( $d_S$ ) deberá de ser cero. De esta forma nos aseguramos que en el peor de los casos, en el que el agujero mecanizado de la pieza sea lo menor posible dentro de tolerancia y el utillaje fabricado tenga un diámetro mayor que el nominal dentro de tolerancia, este podrá ser montado muy justo en la pieza. Al ser dicho juego cero, en el caso anterior citado no existirá posibilidad de que haya holgura, asegurando que el ajuste en el conjunto sea lo más justo posible. Por lo tanto, se deberá de cumplir que,

$$\text{Juego}_{\text{Minimo}} = J_{\text{Min}} = D_I - d_S = 0$$

En el caso del juego máximo, el cual es definido como la diferencia entre el posible diámetro superior del agujero ( $D_S$ ) y el menor diámetro posible del eje ( $d_I$ ), deberá de ser mayor que cero, de lo contrario se produciría apriete, ya que en dicho caso el agujero de la pieza sería mucho más pequeño que el del útil, no pudiendo alojarse este en su interior.

$$\text{Juego}_{\text{Maximo}} = J_{\text{Max}} = D_S - d_I > 0$$

A estas restricciones hemos de sumarle una determinada tolerancia, es decir, un determinado grado de tolerancia según la normativa ISO. De acuerdo a estudios y documentos de metrología [21] se cita que para componentes o conjuntos mecánicos tales como maquinaria, utillaje... el grado de tolerancia ha de estar comprendido entre IT4 y IT11, siendo los grados superiores para piezas más burdas, donde no hace falta que haya gran precisión.

**Tabla 4.** Aplicaciones grado de tolerancias

Rango grado de tolerancias	Aplicaciones
IT1 e IT0	Especial precisión, patrones
IT1 a IT3	Calibres y piezas de gran precisión
IT4 a IT11	Piezas o elementos que han de ajustar
IT12 a IT18	Superficies libres

En nuestro caso se trataría de piezas a ajustar, siendo por ello que seleccionaremos el rango de IT4 a IT11, y en especial, el de mayor grado (IT11) con el objetivo de aportar una mayor flexibilidad a la fabricación del utillaje al poseer un rango de tolerancia mayor. Por lo tanto,

podremos establecer que la diferencia entre el diámetro mayor posible del útil ( $d_s$ ) y el de menor tamaño posible ( $d_i$ ) deberá de tener una tolerancia fijada por IT11, de tal forma que entrando en la tabla 1 de la normativa ISO 286-1:2011 con la dimensión nominal y el grado de tolerancia seleccionado, obtenemos

$$IT11 \text{ y } d_{Nominal} = 40 \text{ mm} \rightarrow \text{Tolerancia} = T = 0.16 \text{ mm}$$

Obteniendo otra condición más a añadir

$$T = 0.16 \text{ mm} = d_s - d_i$$

Por lo que teniendo en cuenta esta restricción, como el resto relacionadas con el juego mínimo y máximo, podremos determinar los diámetros superiores e inferiores del utillaje para un juego justo. Así pues, sabiendo que

$$D_S = 40.05 \text{ mm} \quad D_I = 39.95 \text{ mm}$$

Y que las condiciones son,

$$T = 0.16 \text{ mm} = d_s - d_i$$

$$J_{Min} = D_I - d_S = 0$$

$$J_{Max} = D_S - d_i > 0$$

Podremos determinar

$$J_{Min} = 39.95 - d_s = 0 \rightarrow d_s = 39.95 \text{ mm}$$

$$T = 0.16 \text{ mm} = 39.95 \text{ mm} - d_i \rightarrow d_i = 39.79 \text{ mm}$$

Cumpliendo así también la siguiente condición

$$J_{Max} = 40.05 - 39.79 = 0.26 \text{ mm} > 0$$

En lo que respecta a la posición de la tolerancia, siendo conocedores de que se trata como si de un eje fuera y que la desviación superior es,

$$\text{Desviación}_{SuperiorEje} = des_{Sup} = d_s - d_{Nominal} = 39.95 - 40 = -0.05 \text{ mm}$$

Entramos en la tabla 4 de la norma ISO 286-1:2011, y con el valor nominal y la desviación superior buscamos la letra que más coincida. En nuestro caso, sería la letra e, por lo que la tolerancia para el utillaje sería

$$40e11 \rightarrow 40_{-0.21}^{-0.05} \text{ mm}$$

Dicha tolerancia, permitirá la existencia de un ajuste con juego justo, es decir, en caso de que el agujero sea lo más pequeño posible y el eje lo más grande posible, la holgura será de 0 mm. Mientras que en el caso contrario, agujero con tamaño lo más grande posible y eje lo más pequeño posible, la holgura será de 0.26 mm, una holgura imperceptible.

- **Diámetro medio** (D=20 mm): el proceso a seguir será el mismo que para el caso del diámetro anterior resuelto, es decir, partiendo de los valores de tolerancia de los agujeros, así como, del grado de tolerancia anteriormente fijado en IT11, obtendremos el juego justo entre útil y pieza. Dichos valores mencionados son,

$$D_{Nominal} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Superior Agujero}} = D_S = 20 + 0.05 = 20.05 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{Inferior Agujero}} = D_I = 20 - 0.05 = 19.95 \text{ mm}$$

Y el valor del grado de tolerancia para la dimensión del diámetro nominal del eje será

$$IT11 \text{ y } D_{\text{Nominal}} = 20 \text{ mm} \rightarrow T = 0.13 \text{ mm}$$

Por lo tanto, aplicando las condiciones anteriores, es decir,

$$T = 0.13 \text{ mm} = d_S - d_I$$

$$J_{\text{Min}} = D_I - d_S = 0$$

$$J_{\text{Max}} = D_S - d_I > 0$$

Obtendremos los valores de los diámetros superior e inferior posibles del eje,

$$d_S = 19.95 \text{ mm} \quad d_I = 19.82 \text{ mm}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta la desviación superior del eje,

$$\text{Desviación}_{\text{Superior Eje}} = des_{\text{Sup}} = -0.05 \text{ mm}$$

Buscamos en la tabla 4 de la normativa ISO 286-1:2011, la posición que más se acerque a dicha desviación. En nuestro caso, encontramos que para la dimensión nominal de 20 mm la desviación superior estará comprendida entre dos posibles desviaciones fundamentales,

$$\text{Letra } e \rightarrow des_{\text{Sup}} = -0.04 \text{ mm}$$

$$\text{Letra } d \rightarrow des_{\text{Sup}} = -0.065 \text{ mm}$$

Por lo que teniendo que elegir una de ellas, seleccionaremos aquella menos restrictiva y que cumpla con la condición de juego, de tal forma que si seleccionamos la posición dada por la letra e, tendremos apriete debido a que el juego inferior será negativo.

$$J_{\text{Min}} = 19.95 - (20 - 0.04) = -0.01 \text{ mm}$$

Sin embargo, en caso de que se seleccione la letra d, el juego no será justo al existir una cierta holgura en el juego inferior, pero no obteniendo apriete.

$$J_{\text{Min}} = 19.95 - (20 - 0.065) = 0.015 \text{ mm}$$

Por este motivo, seleccionaremos la letra d como posición de la tolerancia de tal forma que nos aseguramos que independientemente de cómo sea el diámetro del utillaje, siempre y cuando este comprendido dentro de las tolerancias, este podrá ser montado en la pieza. Así pues, readaptando los cálculos anteriores, encontramos que

$$d_S = d_{\text{Nominal}} - des_{\text{Sup}} = 20 - 0.065 = 19.935 \text{ mm}$$

$$d_I = d_S - T = 19.935 - 0.13 = 19.805 \text{ mm}$$

Siendo los juegos inferior y superior

$$J_{Min} = D_I - d_S = 19.95 - 19.935 = 0.015 \text{ mm}$$

$$J_{Max} = D_S - d_I = 20.05 - 19.805 = 0.245 \text{ mm}$$

Como podemos observar son cumplidas las condiciones para que exista juego al ser todas las ecuaciones anteriores mayores que cero, sin embargo, no tendremos un juego justo, pero sí relativamente cercano. Así pues, la tolerancia para dicho diámetro será

$$20d11 \rightarrow 20_{-0.195}^{-0.065} \text{ mm}$$

Asegurándonos que el utilaje podrá ser montando en la pieza, introduciendo apenas vibración en el conjunto al ser insignificantes las holguras con respecto al diámetro de la pieza.

### 3.2. Anchura tetón

En el caso de las anchuras de los tetones del negativo (Color rosa, figura 134) también serán estudiadas, ya que si dicha dimensión fuera superior a la nominal nos encontraríamos que la cara anterior al tetón (Color marrón) no haría tope con el cubo intermedio, no realizando su función de inmovilización total del mismo. En caso contrario, si fuera más corta el tetón no presionaría al cubo inferior, no realizando tampoco su función.

Para llevar a cabo el estudio de las tolerancias de tales variables, hemos de destacar que se perseguirá un ajuste de tipo indeterminado, es decir, un ajuste donde podría existir escaso juego o bien, escaso apriete. El hecho por el cual nos lleva a seleccionar este tipo de ajuste, es debido a que al ser el aluminio un material relativamente blando, podrá absorber fácilmente las posibles holguras o aprietes entre las piezas al deformarse ligeramente por la aplicación de una fuerza de compresión, la cual será dada por el eje pasante del útil. Así pues, la anchura a estudiar será,

- **Grosor contorno circular de pequeño diámetro:** (Anchura de 7 mm): partiendo del hecho de que nuestra pieza puede poseer una longitud real comprendida dentro de unas determinadas desviaciones posibles, encontramos que las longitudes extremas serían,

$$Longitud_{Nominal} = 7 \text{ mm}$$

$$Longitud_{SuperiorPieza} = L_S = 7 + 0.05 \text{ mm} = 7.05 \text{ mm}$$

$$Longitud_{InferiorPieza} = L_I = 7 - 0.05 \text{ mm} = 6.95 \text{ mm}$$

Según lo comentado, buscaremos un ajuste indeterminado, en especial centrado ya que como se ha comentado en la introducción de este apartado, el aluminio al poseer un módulo de elasticidad muy bajo, fácilmente puede absorber las posibles holguras o resaltes mediante su compresión. Así pues, nuestras condiciones estarán limitadas por un lado por el grado de la tolerancia, seleccionando un grado de IT11 ya que como podemos observar en la tabla 4 el rango recomendado sería entre IT4 e IT11 por las características del útil, seleccionando el menos restrictivo de ellos para aportar mayor flexibilidad en la fabricación del mismo. Por lo tanto, entrando en la tabla 1 de la normativa ISO 286-1:2010, la tolerancia será

$$L_{Nominal} = 7 \text{ y IT11} \rightarrow \text{Tolerancia} = 0.09 \text{ mm}$$

Otra condición a tener en cuenta será que el ajuste sea indeterminado, por lo que para facilitar la determinación de la posición de la tolerancia supondremos que esta ha de ser simétrica, siendo definida la posición de la tolerancia con las letras js. Letras minúsculas porque el tetón del eje se comportara como pieza a absorber. Por lo tanto, al ser simétrica las desviaciones, estas serán fácilmente calculadas,

$$Desviación_{Superior} = des_{Sup} = \frac{T}{2} = \frac{0.09}{2} = 0.045 \text{ mm}$$

$$Desviación_{Inferior} = des_{Inf} = \frac{T}{2} = \frac{0.09}{2} = 0.045 \text{ mm}$$

Por lo que si analizamos los juegos superior e inferior, observamos

$$J_{Max} = L_S - l_I = 7.05 - 6.955 = 0.095 \text{ mm}$$

$$J_{Min} = L_I - l_S = 6.95 - 7.045 = -0.095 \text{ mm}$$

Se cumple el ajuste indeterminado, ya que el juego mínimo es negativo, lo cual significaría apriete, mientras que el juego máximo sería positivo, es decir, tendríamos juego. Así pues, la tolerancia de dicha anchura quedaría definida,

$$7JS11 \rightarrow 7^{+0.045}_{-0.045} \text{ mm}$$

Con esta tolerancia nos garantizamos que el negativo realice su función correctamente, pudiendo alojarse perfectamente en el interior de la pieza, ya que en caso de tener apriete o juego será fácilmente absorbido por el material al comprimirlo.

### 3.3. Dimensiones restantes

El resto de dimensiones que podemos llegar a encontrar en el negativo, se caracterizan por no jugar un papel relativamente clave en el correcto funcionamiento del utillaje. En la figura siguiente encontramos el resto de variables que no han sido analizadas, de tal forma que a continuación se realizará un determinado estudio de forma general de las tolerancias que deberían de aplicarse a cada una de ellas.

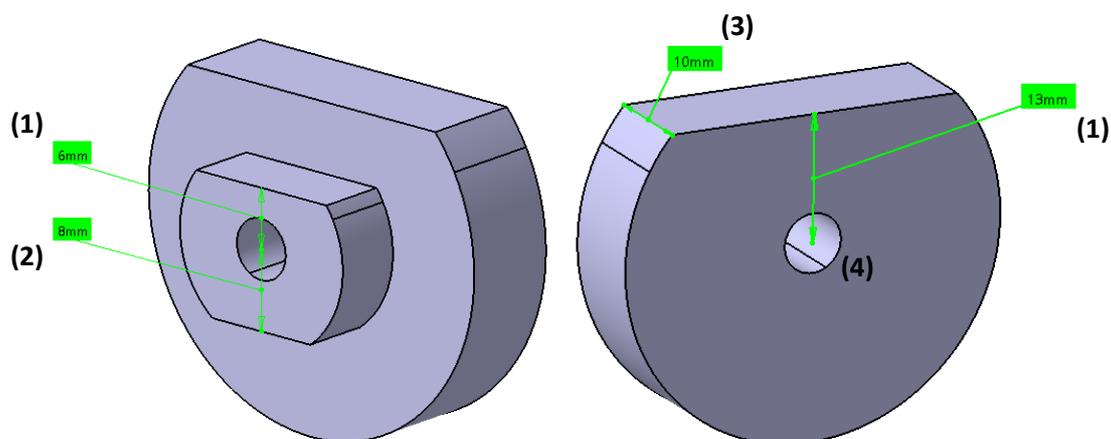


Figura 135. Medidas secundarias a estudiar en negativo

- **Distancias desde eje a planos superiores (1):** este tipo de medida no es relativamente importante en lo que respecta a posibles desviaciones de su medida nominal, ya que se ha dejado una gran distancia entre las caras planas superiores de los negativos y las caras a mecanizar de los cubos con el objetivo de evitar posibles interferencias con la herramienta durante el mecanizado. Dicho espacio es de 2 mm, de tal forma que aunque se produjera cierta desviación (No mayor de 2 mm) de las medidas señaladas, el negativo no interferirá con la herramienta.

Teniendo en cuenta lo comentando, podremos establecer una determinada tolerancia que no sea superior a 2 mm, sobre todo en lo referido a la desviación superior. Por lo que entrando en la tabla 1 de la normativa UNE EN 22768-1 y con las correspondientes medidas nominales de las dos alturas, se fijará las siguientes tolerancias,

$$L_{N_1} = 13 \text{ mm} \rightarrow T_{Muy\ grosera} = \pm 1 \text{ mm} \rightarrow Variable_1: 13_{-1}^{+1} \text{ mm}$$

$$L_{N_2} = 6 \text{ mm} \rightarrow T_{Muy\ grosera} = \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow Variable_2: 6_{-0.5}^{+0.5} \text{ mm}$$

- **Distancia desde eje a plano inferior (2):** de todas las variables mencionadas en este apartado, esta sería la que mayor importancia posee, ya que si dicha medida fuera mayor que la nominal, el cuerpo del utillaje no podría ser introducido en el agujero alterno a donde se alojaría el negativo. En caso contrario, que fuera más corta que la medida nominal, podría rotar el negativo ciertos grados, de tal forma que si la desviación de la medida fuera excesiva podría ocurrir que girara demasiado el negativo creando posible interferencia con la herramienta.

Así pues, teniendo esto en cuenta deberemos de fijar una tolerancia relativamente estrecha, por lo que entrando en la tabla 1 de la norma UNE EN 22768-1 con la medida nominal, obtenemos

$$T_{Fina} = \pm 0.1 \text{ mm} \rightarrow Variable: 8_{-0.1}^{+0.1}$$

- **Anchura contorno circular grande (3):** dicha variable no tiene un gran efecto sobre el conjunto útil-utillaje, ya que en caso de que fuera más ancha que su longitud nominal, simplemente sobresaldría por la cara exterior de la pieza no afectando al comportamiento del útil, ni generando la posibilidad de alguna interferencia.

En caso contrario, si la anchura fuera más corta que la nominal el negativo no quedaría enrasado con la cara exterior del cubo, realizando sin embargo perfectamente su función que sería la inmovilización de la pieza en general, así como la presión del cubo intermedio por la cara interna de esta parte del negativo.

Teniendo esto en cuenta y de acuerdo a la normativa UNE EN 22768-1, debido a la función que posee dicha variable se podría aplicar una tolerancia muy grosera, de tal forma que entrando con este tipo de tolerancia y con la longitud nominal en la tabla 1 de la normativa mencionada, le correspondería la siguiente tolerancia,

$$T_{Muy\ grosera} = \pm 1 \text{ mm} \rightarrow Variable: 10_{-1}^{+1} \text{ mm}$$

#### 4. TOLERANCIAS Y AJUSTES PARA CUERPO DEL UTIL

Al igual que para los negativos, el cuerpo del útil presenta ciertas partes cuyas dimensiones son esenciales para el correcto funcionamiento del utillaje, tales como inmovilizar por completo la pieza evitando vibraciones en el conjunto, poder alojar el útil en el interior de la misma... Entre las dimensiones responsables de ello encontramos los contornos circulares, así como la altura que poseen, siendo señalados en la figura siguiente.

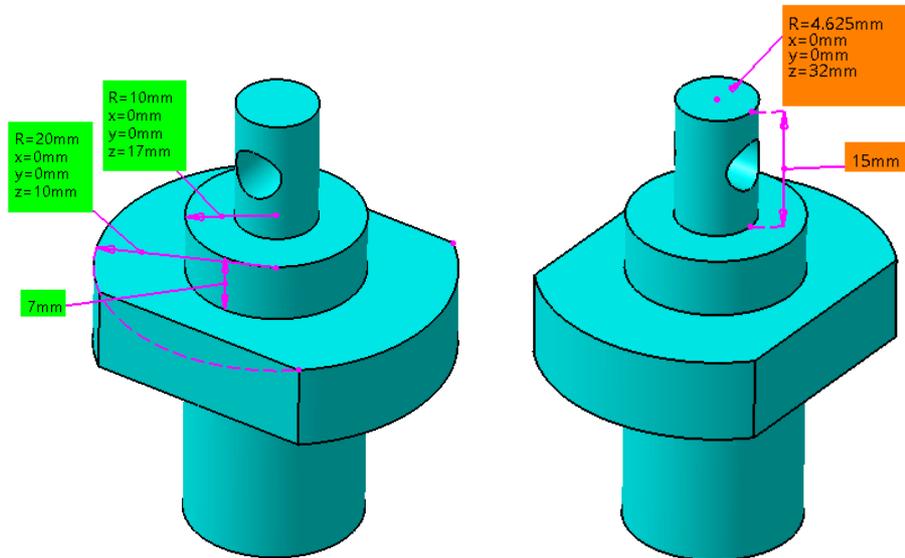


Figura 136. Medidas cuerpo del útil

Debido a la geometría repetitiva que presenta la pieza en cada una de sus caras, encontramos que el cuerpo del útil posee unas determinadas dimensiones idénticas (Dimensiones color verde, figura anterior) a las que posee los negativos en lo que respecta a los diámetros y alturas de los contornos circulares. Así pues, todas las tolerancias calculadas que aparecen en los apartados 2.1 y 2.2 del presente anexo, serán las mismas a aplicar para las medidas marcadas en color verde en la figura anterior, por lo que para evitar ser repetitivos, en caso de querer saber cuáles son dichas tolerancias y ajustes estos serán recogidos en los apartados mencionados.

Por lo tanto, en los apartados siguientes se citaran las medidas marcadas en color naranja por la necesidad que presentan de tener asociada una tolerancia y ajuste determinado debido a su importancia. Y por otro lado encontraremos, un apartado donde se recogerán el resto de medidas secundarias.

##### 4.1. Diámetro agujero

El diámetro referido es el contorno circular de menor diámetro, el cual es alojado en el interior del cubo de menor tamaño. La importancia de esta dimensión reside en la necesidad de asegurar el juego entre dicho tetón y el agujero del cubo inferior de la pieza, ya que de lo contrario el cuerpo del utillaje no podría ser alojado en la pieza o bien, la holgura será tal que las vibraciones durante el mecanizado serán muy altas.

Antes de iniciar con el procedimiento para determinar la tolerancia de esta dimensión, hemos de decir que el agujero del cubo inferior será realizado por la entrada y salida de una broca helicoidal, estando determinada la tolerancia del agujero por la propia tolerancia de la broca. En

nuestro caso, la broca que emplearemos generará un agujero con tolerancia H8, por lo que aplicado a la dimensión nominal será,

$$9.25h8 \rightarrow 9.25_{-0.022}^0 \text{ mm}$$

Por lo tanto, conociendo los posibles valores del agujero, determinaremos el ajuste necesario para que haya juego, un juego que sea relativamente justo de tal forma que el juego mínimo sea 0 y el juego máximo lo más mínimo posible para evitar holguras. Por tanto las condiciones serán,

$$Juego_{Minimo} = J_{Min} = D_I - d_S = 0$$

$$Juego_{Maximo} = J_{Max} = D_S - d_I > 0$$

A todo ello hemos de sumarle que buscaremos un grado de tolerancia comprendida dentro del rango de piezas a ajustar, es decir de IT4 a IT11 según la tabla 3. Dentro de este rango seleccionare el mayor para dar mayor flexibilidad a la fabricación del útil, es decir, IT11. Por lo que teniendo en cuenta la dimensión nominal, la tolerancia será

$$D_{Nominal} = 9.25 \text{ mm y IT11} \rightarrow T = 0.09 \text{ mm}$$

Por lo tanto apoyándome en la tolerancia y en las dos condiciones anteriores, obtendré,

$$D_I - d_S = 0 \rightarrow 9.228 - d_S = 0 \rightarrow d_S = 9.228 \text{ mm}$$

$$T = d_S - d_I = 0.09 \rightarrow d_I = 9.138 \text{ mm}$$

Por lo que la desviación superior será,

$$Des_{Sup} = d_S - d_N = 9.228 - 9.25 = -0.022 \text{ mm}$$

Por lo que la posición de tolerancia estará comprendida entre,

$$Posición \textit{ef} \rightarrow des_{Sup} = -0.018 \text{ mm}$$

$$Posición \textit{g} \rightarrow des_{Sup} = -0.025 \text{ mm}$$

De las dos posibilidades seleccionaremos la letra g, ya que con la posición ef nos arriesgamos a tener cierto apriete, dificultando el alojamiento del útil en el interior del cubo inferior. Por lo tanto, con esta posición las variables quedan,

$$d_S = 9.25 - 0.025 = 9.225 \text{ mm}$$

$$d_I = 9.225 - 0.09 = 9.135 \text{ mm}$$

Y por tanto las desviaciones,

$$des_{Sup} = -0.025 \text{ mm} \quad des_{Inf} = -0.115 \text{ mm}$$

Siendo la tolerancia

$$9.25g11 \rightarrow 9.25_{-0.115}^0 \text{ mm}$$

Con la tolerancia determinada conseguiremos que el tetón del cuerpo del útil sea alojado sin apenas holgura en el cubo inferior, de tal forma que en el peor de los casos en el que el agujero sea lo más pequeño posible y el útil lo más grande posible, este podrá alojarse en su interior de forma muy justa. En caso contrario, la holgura a existir será insignificante, no introduciendo vibraciones en el conjunto pieza-útil.

#### 4.2. Dimensiones restantes

Entre las dimensiones restantes, las cuales son mostradas en la figura siguiente, no poseen un papel decisivo en el comportamiento útil-pieza, pero sí que una ligera modificación de las mismas podría tener ciertos efectos adversos en el conjunto. Entre dichas dimensiones, encontramos la distancia de las caras planas laterales con respecto al eje, la altura de los contornos circulares y el diámetro del cilindro de amarre.

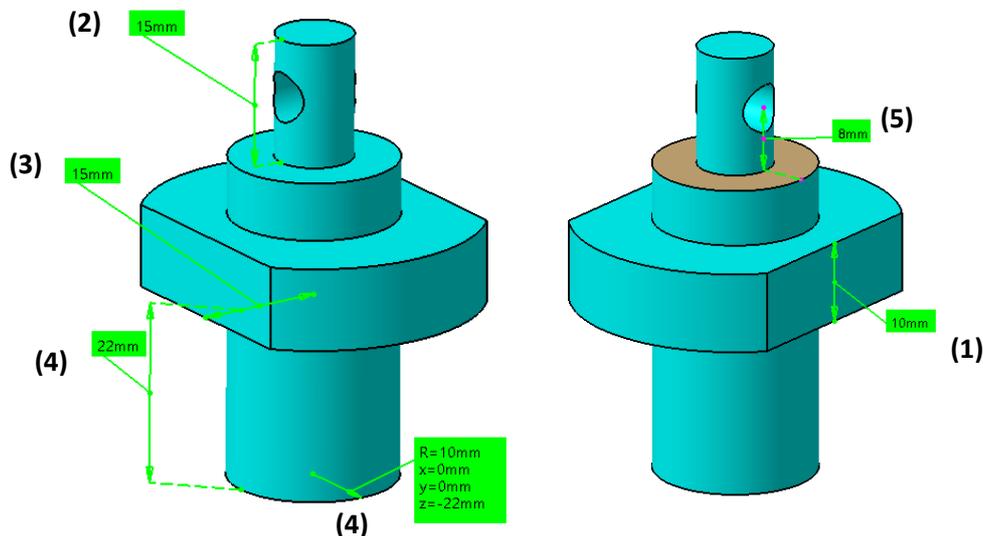


Figura 137. Medidas secundarias a estudiar en cuerpo del útil

Así pues, una vez identificadas cada una de las dimensiones secundarias, comenzaremos a realizar un breve estudio de cada una de ellas para determinar la tolerancia idónea según su función e importancia.

- **Altura contorno semicircular (1):** al igual que en el caso de la anchura de la parte circular de mayor diámetro del negativo, la variación de la altura de esta variable no es algo fundamental. En el caso que sea mayor que la nominal simplemente sobresaldrá por la cara exterior del cubo, mientras que si fuera menor que la nominal quedaría hundida dicha parte del cuerpo del útil en la pieza, no afectando al funcionamiento.

Por tal motivo y considerando los diferentes tipos de tolerancia que existen según la normativa UNE EN 22768-1, aplicaremos una tolerancia muy grosera, la cual para la medida nominal que posee dicha dimensión sería,

$$T_{Muy\ grosera} = \pm 1\ mm \rightarrow Variable: 10_{-1}^{+1}\ mm$$

- **Altura contorno circular de menor diámetro (2):** la altura que presenta este contorno circular tendrá cierta influencia a la hora de diseñar las operaciones de mecanizado, ya que determinará cuanto hay que profundizar la broca para la realización del agujero donde se alojará dicho contorno circular del cuerpo del útil.

La altura de esta parte del útil deberá de ser superior a la longitud de la mitad de la cara del cubo interior para poder alojar en el, el taladro pasante. Sin embargo, tampoco debe de exceder la longitud de la cara del cubo interior, ya que de lo contrario sobresaldría generando interferencia con la herramienta a mecanizar la cara del cubo. Por lo tanto,

sabiendo que el tamaño de dicha cara es de 16 mm, se dejará 1 mm para evitar cualquier posible interferencia.

Debido a que la holgura dejada es de 1 mm, observando en la normativa identificamos que la tolerancia idónea para su longitud nominal sería media, siendo una tolerancia fina excesiva e innecesaria, y por el contrario una tolerancia grosera dejaría solo una holgura de medio milímetro con la cara a mecanizar, siendo algo relativamente arriesgado. Por lo tanto, la tolerancia y la variable serán,

$$T_{Media} = \pm 0.2 \text{ mm} \rightarrow 15_{-0.2}^{+0.2} \text{ mm}$$

- **Distancia cara plana lateral respecto a centro del cuerpo del útil (3):** esta variable guarda cierta importancia sobre todo en lo que respecta a una posible desviación superior de la dimensión nominal, ya que en dicho caso el negativo pertinente no podrá alojarse correctamente en su posición, sobresaliendo una distancia igual a la desviación. Por el contrario, en función del tamaño de la desviación inferior con respecto a la nominal facilitará en cierta medida el giro del cuerpo del útil al no encontrarse este a tope con los negativos, cargando tensionalmente el eje pasante.

Así pues, debido a la importancia que posee consideramos que la tolerancia a aplicar debería de ser fina o media, apostando por una tolerancia media tanto para dar flexibilidad a la fabricación y por el hecho de que el aluminio posee un buen comportamiento para la absorción de holguras o resaltes mediante su deformación al comprimirse. En caso extremo, para la tolerancia seleccionada el aluminio debería de deformarse en torno a 0.2 mm mediante la compresión del mismo, siendo un tamaño fácilmente alcanzable. Por tanto, la variable quedará,

$$T_{Media} = \pm 0.2 \text{ mm} \rightarrow 15_{-0.2}^{+0.2} \text{ mm}$$

- **Variables dimensionales zona amarre (4):** en lo que respecta a las variables tanto de altura como de diámetro de la zona de amarre no guardan un papel fundamental, ya que las variaciones tanto en longitud como en diámetro son fácilmente absorbidas por el útil cónico empleado para su sujeción.

En el caso de la longitud, si su longitud fuera superior a la nominal simplemente no apoyaría el útil sobre el útil cónico, sobresaliendo en tanto como la desviación sea, lo cual no afectará apenas a la sujeción del útil. Por el contrario, si fuera inferior, el útil quedaría apoyado en la base del útil cónico, no viéndose limitado la inmovilización del mismo. Por otro lado, el sistema de sujeción del útil cónico se basa en ejercer presión mediante un elemento mecánico a las caras laterales del cuerpo cilíndrico inferior del útil, por lo que en caso de que existiera holguras fácilmente serían absorbidas.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, consideramos que para la longitud se considere una tolerancia grosera mientras que para el diámetro una tolerancia media debido al ajuste relativo que debe de tener, quedando las variables por tanto

$$T_{Grosera} = \pm 0.5 \text{ mm} \rightarrow \text{Variable}_{Longitud}: 22_{-0.5}^{+0.5} \text{ mm}$$

$$T_{Media} = \pm 0.2 \text{ mm} \rightarrow \text{Variable}_{Diámetro}: 20_{-0.2}^{+0.2} \text{ mm}$$

- **Altura centro orificio pasante (5):** la posición del taladro ubicado en el tetón es de gran importancia, ya que la desviación del mismo sea superior o inferior a la nominal, haría que no pudiera ser instalado el eje encargado de inmovilizar el útil con la pieza.

Con respecto a la forma en la que se ha definido la medida, esta ha sido desde la base del contorno circular (Color marrón) hasta el eje pasante del orificio. El hecho por el cual se ha realizado de esta forma es porque dicha base actuará de referencia principal, es decir, en caso de que el contorno circular intermedio (Ubicado justo por debajo de la cara marcada en marrón) tuviera una altura superior a la nominal, la cara marrón haría tope con el cubo inferior, actuando de referencia para ubicar el orificio pasante. En caso contrario, si el contorno circular intermedio tuviera una altura inferior a la nominal, la cara marrón tendría cierta holgura con respecto a la cara del cubo inferior, con un tamaño igual a la desviación sufrida por esta variable.

Así pues, a la hora de determinar la tolerancia de la presente medida, tendremos en cuenta la desviación inferior de la altura del tetón intermedio, la cual ha sido previamente estudiada en el apartado 2.2 del presente anexo, siendo dicha desviación,

$$Des_{Inf} = -0.045 \text{ mm}$$

En caso de la desviación superior, esta no afectará a la medida por los motivos comentados anteriormente.

Teniendo en cuenta lo anterior, el tipo de tolerancia adecuada para esta aplicación sería una tolerancia bastante restrictiva, de tal forma que según la normativa UNE-EN 22768-1 sería una tolerancia fina y que respecto a la dimensión nominal sería,

$$T_{Fina} = \pm 0.1 \text{ mm}$$

De tal forma en el peor de los casos, es decir, en el caso de que el contorno circular intermedio tuviera una altura inferior a la nominal y la dimensión de la posición del orificio fuera inferior a la nominal dentro de tolerancia, la desviación sería,

$$Desviación = -0.045 - 0.1 = -0.145 \text{ mm}$$

El resto de posibles combinaciones poseen una desviación ligeramente inferior a 0.1 mm, lo cual no influye apenas en comparación con la desviación anteriormente calculada. Así pues, si asignamos dicha tolerancia la máxima desviación que nos podremos llegar a encontrar es la anterior, pudiendo ser fácilmente absorbida por el propio material mediante posibles deformaciones. Por lo tanto, la variable quedará definida como,

$$T_{Fina} = \pm 0.1 \text{ mm} \rightarrow \text{variable: } 8_{-0.1}^{+0.1} \text{ mm}$$

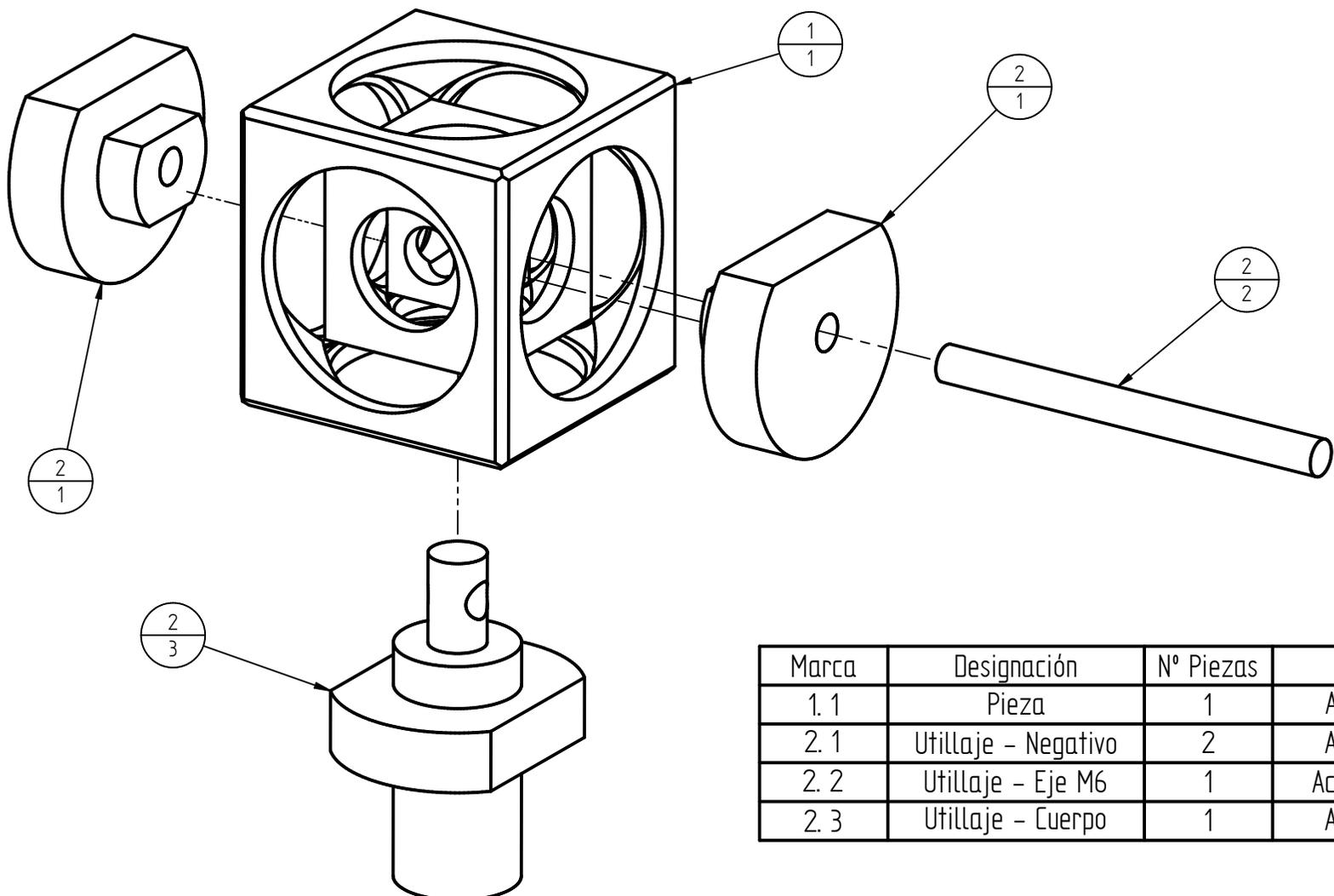


---

## **ANEXO II. PLANOS**

---

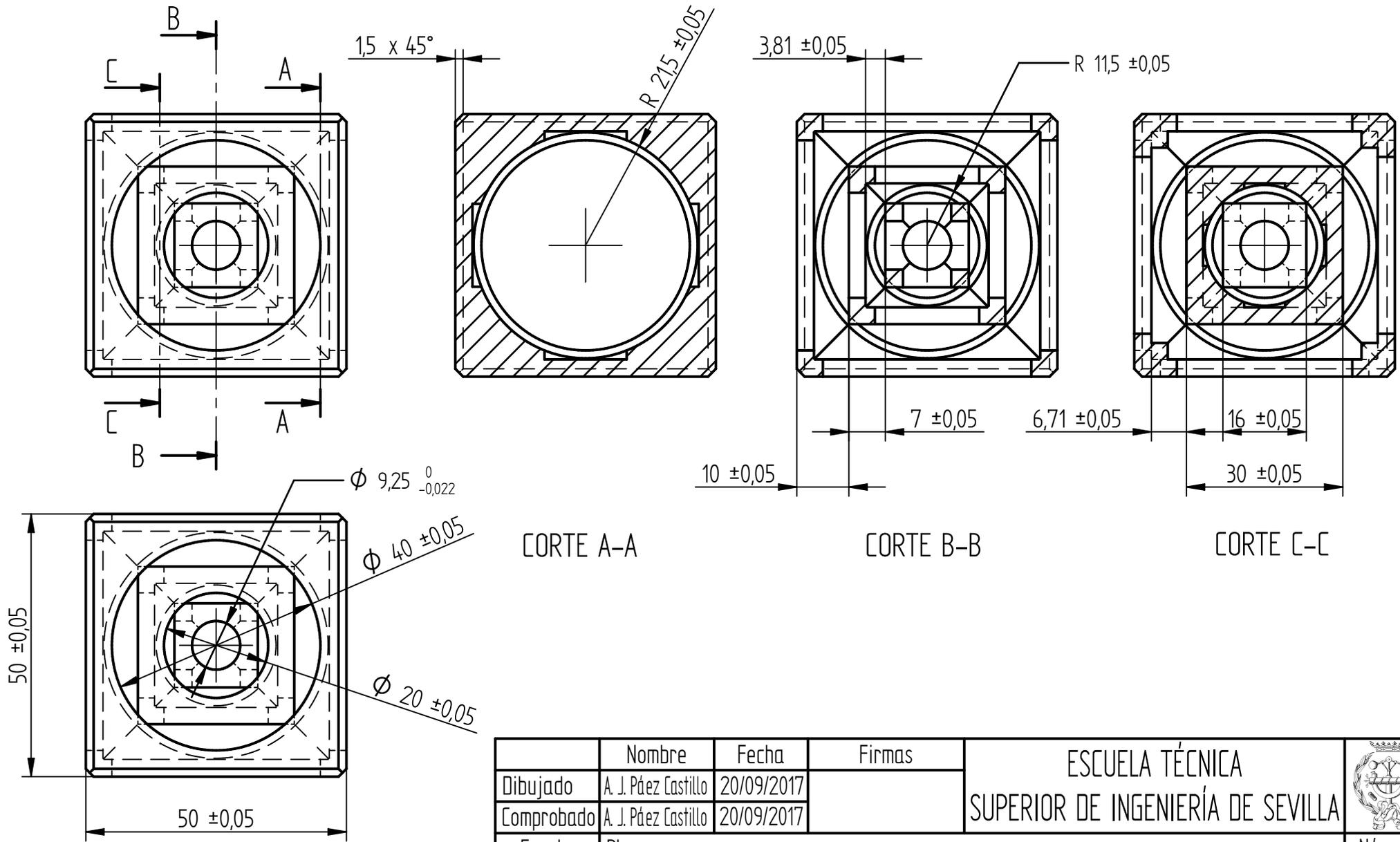




Marca	Designación	Nº Piezas	Material	Plano
1.1	Pieza	1	Aluminio 7075	1.01
2.1	Utillaje - Negativo	2	Aluminio 7075	1.02
2.2	Utillaje - Eje M6	1	Acero Inoxidable	-
2.3	Utillaje - Cuerpo	1	Aluminio 7075	1.03

	Nombre	Fecha	Firmas	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE SEVILLA	 Número
Dibujado	A. J. Páez Castillo	20/09/2017			
Comprobado	A. J. Páez Castillo	20/09/2017			
Escala	Plano:			<b>CONJUNTO PIEZA Y UTILLAJE</b>	1
1 : 1	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PRODUCTO EN UN CENTRO DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD EN 5 EJES		Hoja 1 de 1		





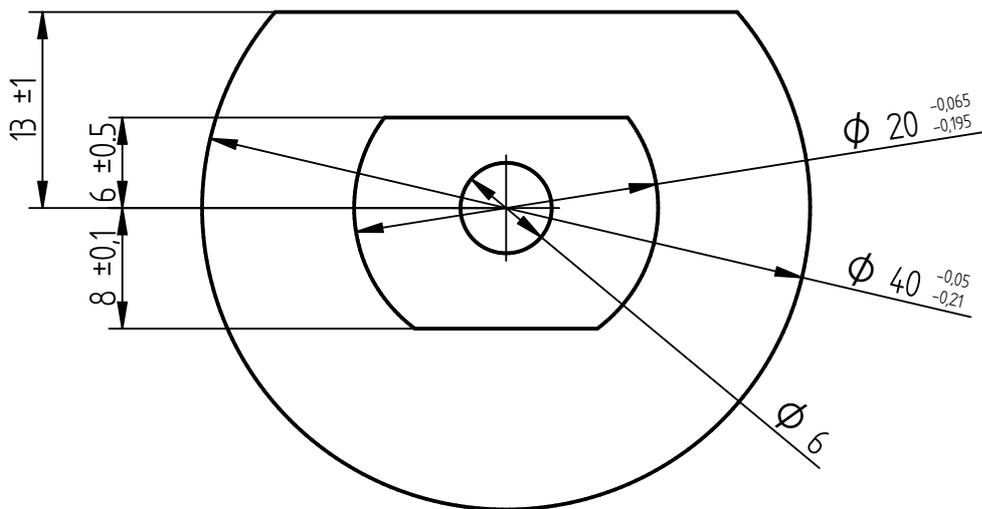
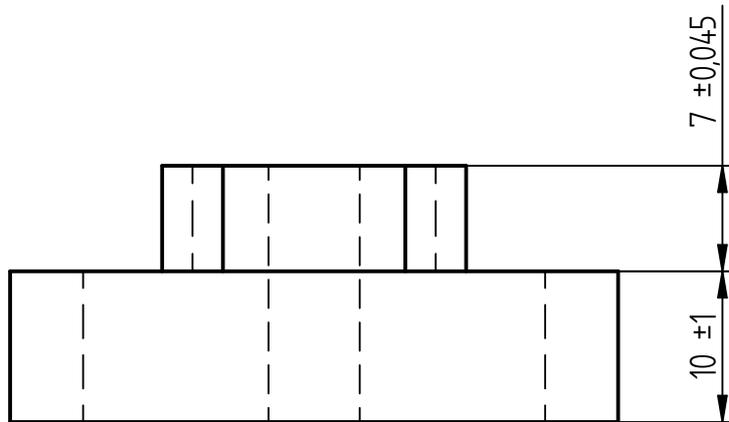
CORTE A-A

CORTE B-B

CORTE C-C

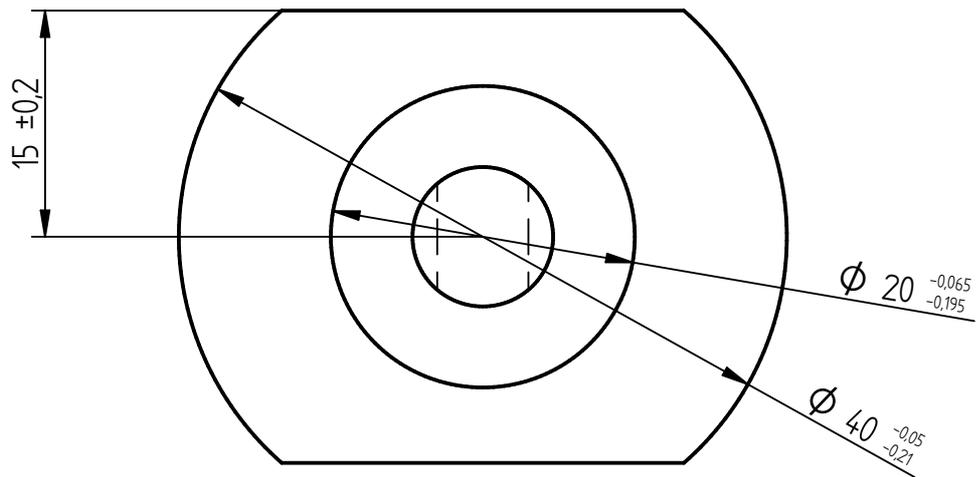
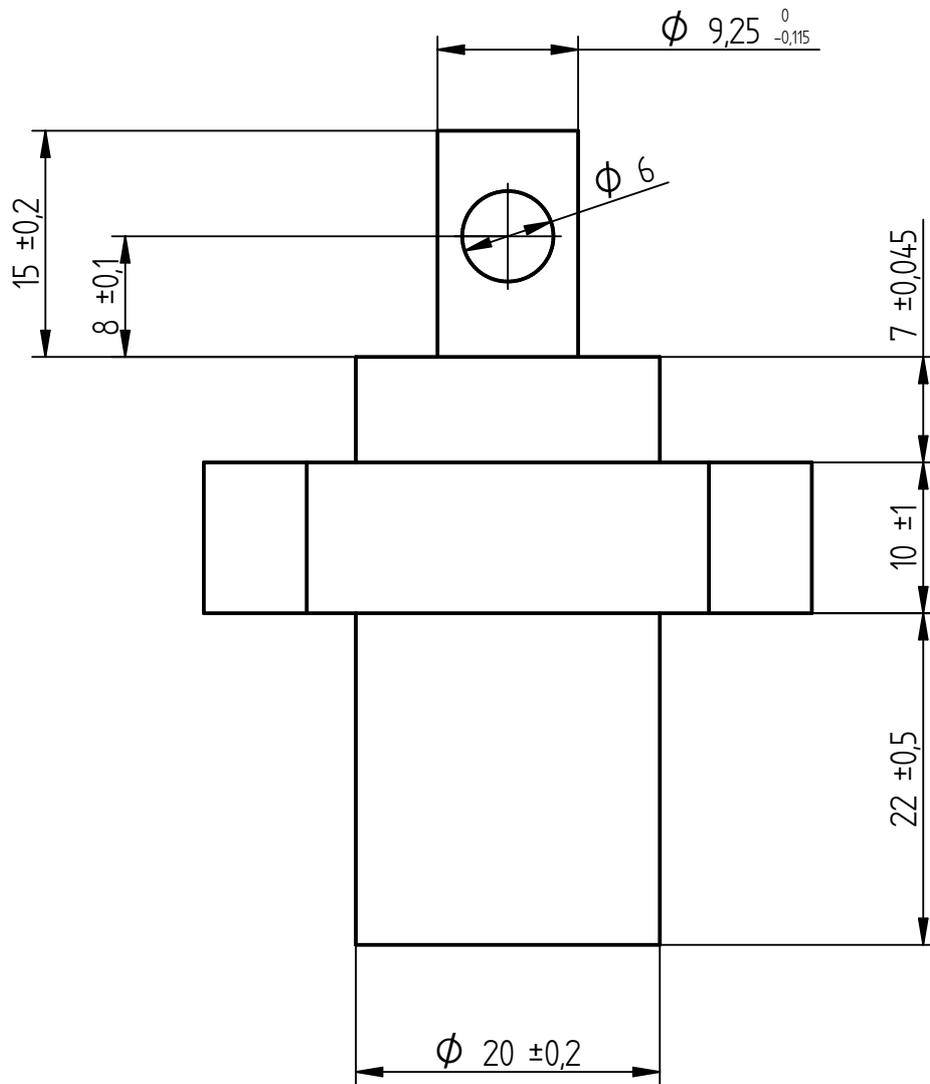
	Nombre	Fecha	Firmas	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE SEVILLA	
Dibujado	A. J. Páez Castillo	20/09/2017			
Comprobado	A. J. Páez Castillo	20/09/2017		PIEZA	Número 1.01
Escala	Plano:				
1:1	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PRODUCTO EN UN CENTRO DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD EN 5 EJES			Hoja 1 de 1	





	Nombre	Fecha	Firmas	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE SEVILLA	
Dibujado	A. J. Pdez Castillo	20/09/2017			
Comprobado	A. J. Pdez Castillo	20/09/2017			
Escala	Plano:	UTILLAJE - NEGATIVO			Número 1.02
2 : 1					
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PRODUCTO EN UN CENTRO DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD EN 5 EJES				Hoja 1 de 1	





	Nombre	Fecha	Firmas	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE SEVILLA	
Dibujado	A. J. Pdez Castillo	20/09/2017			
Comprobado	A. J. Pdez Castillo	20/09/2017			
Escala	Plano:			UTILLAJE - CUERPO	Número 1.03
2 : 1	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PRODUCTO EN UN CENTRO DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD EN 5 EJES				



---

# **ANEXO III. HERRAMIENTAS DE CORTE**

---



## 1. INTRODUCCIÓN HERRAMIENTAS DE CORTE

En el presente anexo se recoge los datos geométricos [23] y tecnológicos [14, 15, 16,18] de las herramientas empleadas, siendo realizado con tales datos el cálculo y estudio de los parámetros de corte para las diferentes operaciones de mecanizado diseñadas, siendo esto de gran importancia ya que el cálculo de tales propiedades revelarán si los parámetros a emplear son tolerables o no por la máquina.

Los parámetros de corte dependerán de factores variados como la geometría y material de la herramienta, el tipo de operación a realizar y el material de la pieza a fabricar. Mayoritariamente, tales factores son dados por el propio fabricante de la herramienta como recomendación para un mecanizado y durabilidad de la herramienta óptima, aunque en caso de no disponer de tal información, también se podrán definir tales parámetros a partir de experiencias y pruebas realizadas con un resultado favorable.

Así pues, de los parámetros anteriores se podrá desarrollar cada una de las variables que definan por completo la operación de mecanizado, siendo ciertas de ellas empleadas en la programación de la máquina, así como para saber si son tolerables o no por esta. Las principales variables limitantes de una máquina son las relativas a la potencia de corte, la velocidad de giro del husillo y la velocidad de avance de la mesa de trabajo y/o cabezal. Ahora bien, a tales variables hay que sumarle aquellas limitaciones impuestas también por la herramienta, como por ejemplo el tipo de material a mecanizar, velocidad de giro alcanzable por la herramienta, en el sentido del calentamiento tolerable por esta durante el mecanizado y sobretodo, la longitud relativa a la zona de corte de la herramienta, la cual determinará en parte la profundidad del mecanizado.

Antes de comenzar a realizar los cálculos pertinentes para la obtención de las variables, se considera acertado realizar una breve explicación de cada una de las variables de corte [22], su forma de cálculo y sus respectivas unidades de medida. Debido a que todas las operaciones a realizar se caracterizan por no ser procesos de mecanizado de piezas con simetría, nos centraremos principalmente en la tecnología de mecanizado desarrollado por herramientas rotativas, como es el caso las brocas y fresas entre otras.

Una de las variables fundamentales de una operación de mecanizado de esta índole, es la velocidad de corte, la cual se define como la velocidad lineal que posee la herramienta en su periferia, siendo medida en metros por min (m/min). Su forma de calcular consiste en el producto de la velocidad de giro del husillo ( $n$ ) por el diámetro de la herramienta ( $D_c$ ), todo ello en las respectivas unidades de medida correspondientes, es decir, velocidad de giro en revoluciones por minuto y el diámetro en milímetros. De esta forma la expresión de la velocidad de corte sería,

$$V_c = \frac{n D_c \pi}{1000} \quad (m/min)$$

Otros factores de gran importancia son las variables relativas al movimiento de avance, el cual en el caso del mecanizado de piezas no simétricas, es desarrollado por la pieza, es decir, es la pieza en sí la que se desplaza y no la herramienta, caso contrario al encontrado en el torneado. Así pues, el avance ( $f$ ) se define como el desplazamiento sufrido por la pieza mientras la herramienta da una vuelta completa, siendo medido en milímetros por revolución (mm/rev). Ahora bien, tal medida se puede expresar también en función de los dientes de la herramienta, obteniendo así el avance por diente ( $f_z$ ), lo cual es referido al desplazamiento de la pieza entre la acción cortante de dos dientes sucesivos.

Por lo tanto, la velocidad de avance será el producto de las revoluciones de la herramienta por el avance, o bien, el producto de las revoluciones de la herramienta por el avance por diente y por el número de dientes que posea la herramienta, siendo medido en milímetros por min (mm/min). La ecuación de la velocidad de avance quedaría como se muestra.

$$V_f = n f = n z f_z \quad (mm/min)$$

Donde Z es el número de dientes de la herramienta.

Paralelamente, otro parámetro a calcular será la potencia de corte, una variable no muy habitualmente calculada pero que como se ha comentado posee una gran importancia al estar relacionada con una de las variables limitantes de la máquina. La potencia de corte se puede calcular de diferentes formas, siendo en nuestro caso empleado el Método de la presión de corte de Boothroyd [5558], cuya expresión es,

$$P_C = k_S(\bar{h}_1) \cdot \dot{z} \quad (kW)$$

Donde las variables que encontramos son el caudal de viruta,

$$\dot{z} = p_R \cdot p_A \cdot V_f \quad (mm^3/min)$$

El espesor promedio de viruta indeformada ( $\bar{h}_1$ ) medido en milímetros y la energía específica de corte ( $k_S$ ) medida en Julios por milímetro cúbico.

Analizando cada uno de las variables anteriores, observamos que el caudal de viruta eliminada por unidad de tiempo es obtenido del producto del volumen de la viruta por la velocidad de avance, es decir, de multiplicar la profundidad radial ( $p_R$ ) y axial ( $p_A$ ) de la viruta y/o del mecanizado por el espacio recorrido en un minuto por la pieza, siendo medido por tanto en milímetros al cubo por minuto.

Por otro lado, encontramos la variable denominada energía específica de corte, la cual representa el trabajo necesario a realizar para obtener una viruta de determinadas dimensiones, representando tales dimensiones mediante el espesor promedio de la viruta indeformada. Como se puede observar en la figura siguiente, tal valor de la energía puede ser calculado gráficamente, dependiendo del tipo de material a mecanizar y del espesor de la viruta obtenida, aunque sí se realiza su extrapolación matemática, dicha variable se podrá calcular mediante la siguiente ecuación,

$$k_S = \frac{m}{h_1^{0.46}} \quad (J/mm^3)$$

Siendo m un parámetro adimensional característico del tipo de material a mecanizar. Ahora bien, el valor del espesor promedio de la viruta dependerá a su vez principalmente del tipo de operación a realizar, ya que en función de cómo se mecanice, las formulas empleadas para su determinación variarán. Además, dentro de un mismo tipo de operación deberemos de distinguir si el mecanizado es realizado de forma periférica o frontal, variando así el espesor de la viruta. Así pues, para simplificar el cálculo de tal variable, será empleada una gráfica tabulada con los espesores de viruta para el fresado (figura 139), estando en función del diámetro de la herramienta, de la profundidad radial y del tipo de mecanizado, es decir periférico o frontal.

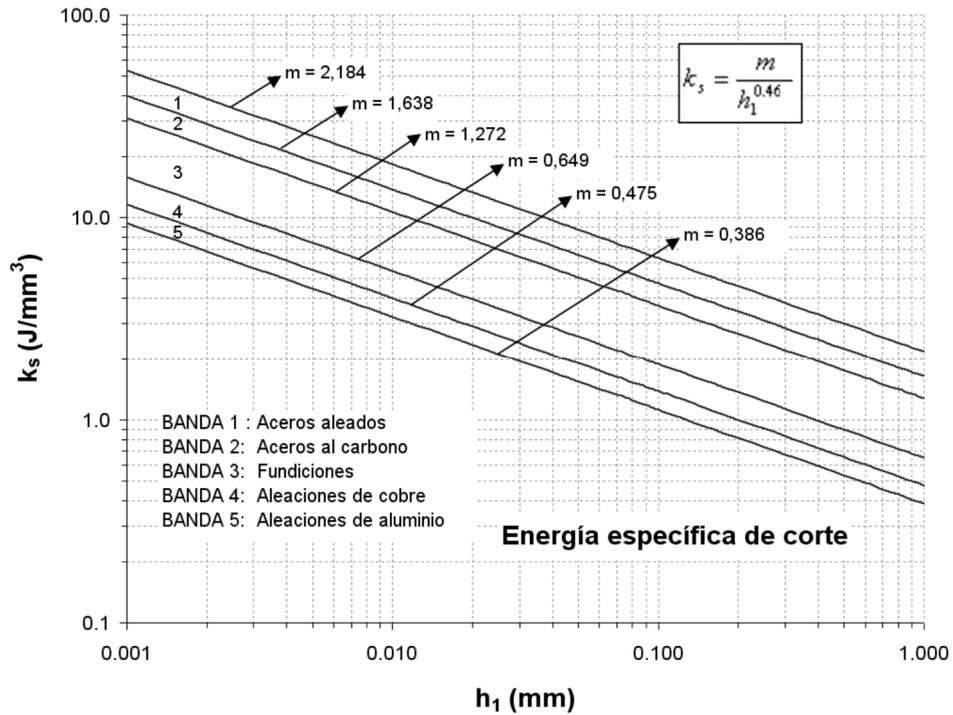


Figura 138. Gráfica energía específica de corte, Método de Boothroyd

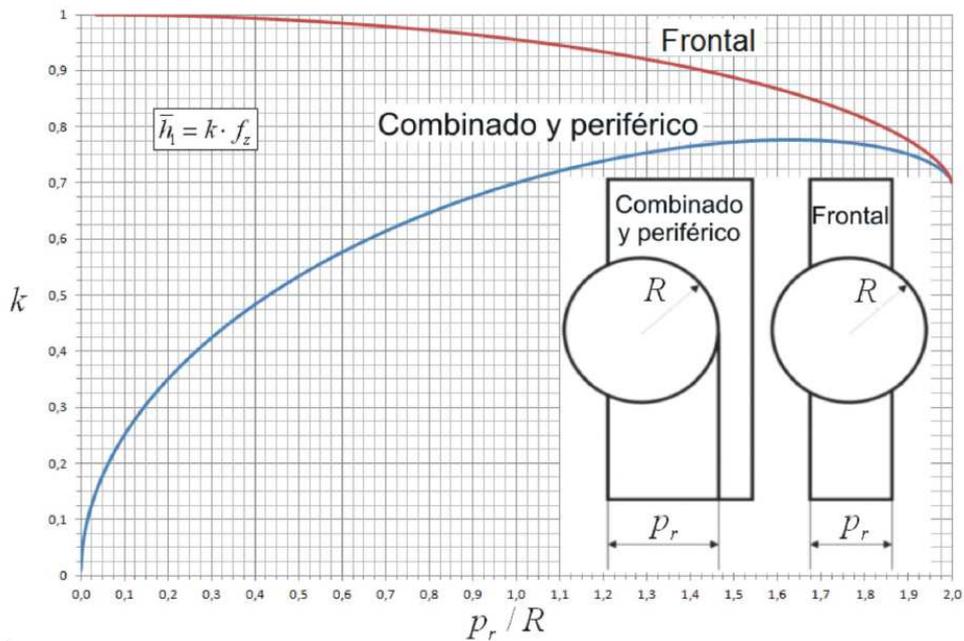


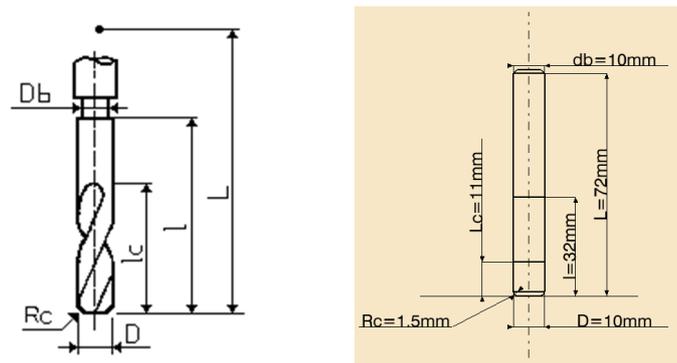
Figura 139. Espesor de viruta indeformada en procesos de fresado

Comentado brevemente cada uno de los parámetros que participan en el mecanizado, pasaremos al desarrollo de los cálculos de cada una de las operaciones, aplicando todos los conocimientos expuestos. Debido a que los parámetros de corte serán los mismos independientemente de la operación que se realice con una misma herramienta, según como se ha dispuesto en la programación del mecanizado, obstaremos por calcular los parámetros simplemente para cada una de las herramientas implicadas, no siendo de esta forma repetitivos.

## 2. FRESA TOROIDAL

La broca toroidal será empleada en todos los procesos de planeado, cajeado, chaflanado y en menor medida, contorneado durante el rectificado de la pieza, siendo en todas las operaciones empleados los mismos parámetros de corte debido a la similitud del mecanizado. El tipo de mecanizado de tales operaciones será de tipo periférico y en especial, de alta velocidad, lo cual conlleva altos avances y altas velocidades de giro frente a profundidades radiales y axiales relativamente pequeñas.

En lo que respecta a la geometría de la herramienta, las distintas variables que la definen son recogidas en la siguiente tabla, siendo mostrada paralelamente la representación gráfica de la herramienta en sí y de la posición de sus variables en ella.



**Figura 140.** Representación gráfica parámetros geométricos fresas toroidales

**Tabla 5.** Parámetros geométricos fresa toroidal

Variables geométricas	Valores
Longitud de corte ( $l_c$ )	11 mm
Longitud sin mango ( $l$ )	32 mm
Longitud total ( $L$ )	72 mm
Radio de corte ( $R_c$ )	1.5 mm
Diámetro de corte ( $D_c$ )	10 mm
Diámetro de mango ( $D_b$ )	10 mm
Número de dientes ( $Z$ )	2

Así pues, estudiando la herramienta nos encontramos que se trata de metal duro, siendo apta para ser empleada tanto en el mecanizado de alta velocidad, como para mecanizar aluminio. Ahora bien, apoyándonos en la información de corte proporcionada por el fabricante, vemos que no es suministrado parámetros propios de alta velocidad, sino del mecanizado convencional. Por lo tanto, al no tener experiencias contrastadas del empleo de este tipo de herramienta en este tipo de mecanizado iniciamos la búsqueda de los parámetros en fabricantes que tuvieran herramientas similares o idénticas, encontrando dos de ellos.

Tales fabricantes [15,16] sí proporcionan los parámetros buscados para una herramienta de características idénticas y para aluminio, además de compartir valores muy similares tanto en avance, como en velocidad de giro. Moviéndonos entre los valores de ambos fabricantes, seleccionaremos el parámetro de avance más bajo, mientras que la velocidad de giro seleccionada será la más alta posible, consiguiendo así un mejor acabado superficial. En cuanto a la profundidad axial seleccionaremos 1 mm como máximo, estando del lado de la seguridad, mientras que para la profundidad radial seleccionaremos el máximo posible, el 50% del diámetro de la herramienta. Por lo tanto los valores de partida son,

**Tabla 6.** *Parámetros de corte fresa toroidal*

VARIABLES DE CORTE	VALORES
Velocidad de corte	760 m/min
Avance por diente	0.2 mm/diente
Profundidad radial	2.5 mm
Profundidad axial	1 mm

Apoyándonos en los valores anteriores, calcularemos el resto de parámetros necesarios para definir las operaciones de mecanizado en el software CAD/CAM y por tanto, en el programa de CNC que controlará la máquina. En lo que respecta al número de revoluciones, estas serán,

$$n = \frac{1000 V_C}{\pi D_C} = \frac{1000 * 760}{\pi * 10} = 24192 \text{ rpm}$$

Sí comparamos tal valor con el máximo de revoluciones dadas por nuestra máquina, encontramos que este es inferior en cerca de 6000 rpm, siendo por tanto tolerable por el husillo de la máquina.

En lo que respecta a la velocidad de avance de la mesa de trabajo y del cabezal, esta será,

$$V_f = f_z n z = 0.2 * 2 * 24192 = 9676.6 \text{ mm/min}$$

Siendo también un valor de velocidad bastante inferior al máximo marcado en la tabla de propiedades de nuestra máquina, siendo tal límite fijado en 60 000 mm/min. Finalmente, calculados todos los parámetros necesarios para el software CAD/CAM, determinaremos la potencia de corte necesaria para saber sí la máquina tolera tales parámetros. Primeramente determinaremos el caudal de viruta,

$$\dot{z} = p_R p_A V_f = 1 * 2.5 * 9676.6 = 24192 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Por otro lado, sabiendo que el tipo de mecanizado en todas las operaciones serán de tipo periférico, ya que en ningún momento la herramienta será enterrada o rodeada en la mayoría de su periferia por material y conociendo el valor de la relación adimensional de  $p_R/R$ , extraeremos de la gráfica de la figura 139 que el espesor promedio de la viruta es,

$$\bar{h}_1 = 0.1067 \text{ mm}$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación del Método de Boothroyd, obtenemos

$$k_S = \frac{m}{\bar{h}_1^{0.46}} = \frac{0.475}{0.1067^{0.46}} = 1.33 \text{ J/mm}^3$$

Siendo la potencia de corte,

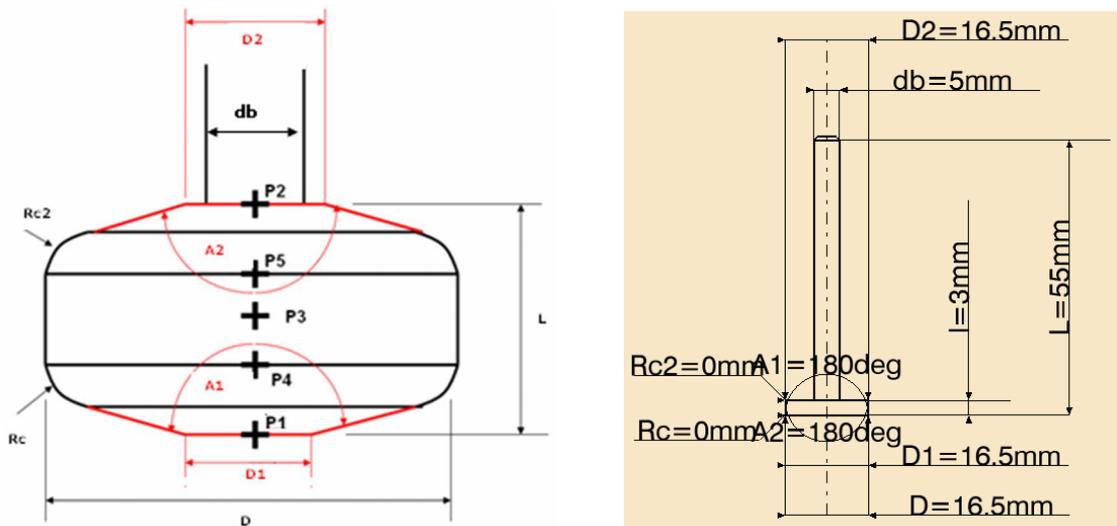
$$P_C = k_S \dot{z} = 1.33 * 24192 = 32175.36 \text{ J/min} = 536.27 \text{ J/s} = 0.54 \text{ kW}$$

Como se puede apreciar tal parámetro es bastante inferior a la mitad de la potencia máxima, pudiendo mecanizar de forma continua al no sobrepasar el límite de 40% de 13.5 kW, ED S6.

### 3. FRESA DE RANURAR

La presente herramienta se caracteriza por ser de acero rápido y por ende, solamente utilizable con parámetros de corte convencionales, los cuales se caracterizan por pequeñas velocidades de giro y avance. Esta herramienta será utilizada como su propio nombre indica, en operaciones

de ranurar, no siendo aunque fuera posible por parte de la herramienta llevar a cabo un mecanizado de alta velocidad. En lo que respecta a su geometría esta es recogida en la siguiente tabla, estando referenciada a las variables mostradas en la figura siguiente.



**Figura 141.** Representación gráfica parámetros geométricos fresa de ranurar

**Tabla 7.** Parámetros geométricos fresa de ranurar

Variabes geométricas	Valores
Ángulo parte superior (A2)	0°
Ángulo parte inferior (A1)	0°
Longitud de corte (l)	3 mm
Longitud total (L)	55 mm
Diámetro de corte (D)	16.5 mm
Diámetro parte inferior (D1)	16.5 mm
Diámetro parte superior (D2)	16.5 mm
Diámetro mango (db)	5 mm
Radio de corte (Rc)	0 mm
Radio de corte 2 (Rc2)	0 mm
Número de dientes (Z)	10

Apoyándonos en la información de corte dada por el fabricante [18] para una herramienta de acero rápido, de 16.5 mm de diámetro y para mecanización de aluminio, conseguimos los siguientes parámetros.

**Tabla 8.** Parámetros de corte fresa de ranurar

Variabes de corte	Valores
Velocidad de corte	100 m/min
Avance por diente	0.025 mm/ diente
Profundidad radial	1.5 mm
Profundidad axial	3 mm
Diámetro	16.5 mm
Nº de dientes	10

A partir de la información anterior, calcularemos el resto de parámetros de corte necesarios para la definición de las operaciones de ranurado en el software de CAD/CAM. La velocidad de

giro del husillo será mucho más inferior que la del caso anterior, debido a una baja velocidad de corte y un diámetro mayor,

$$n = \frac{1000 V_C}{\pi D_C} = \frac{1000 * 100}{\pi * 16.5} = 1929 \text{ rpm}$$

Siendo tal número de revoluciones completamente tolerable por la máquina. En cuanto a la velocidad de avance, esta será también bastante inferior al caso anterior, no habiendo problema con los límites de la máquina.

$$V_f = f_z n z = 0.025 * 10 * 1929 = 482.28 \text{ mm/min}$$

Aunque sepamos que tal operación no rebasará el límite de potencia de la máquina al presentar parámetros de corte muy convencionales y bajos, realizaremos el cálculo pertinente para hacernos una idea de la potencia consumida en comparación con el caso anterior. En el caso del caudal de viruta observamos que al tratarse de un mecanizado no perteneciente al grupo de alto rendimiento, la cantidad de material eliminada por unidad de tiempo es bastante baja en comparación con el caso contrario.

$$\dot{z} = p_R p_A V_f = 1.5 * 3 * 482.28 = 2170 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Apoyándonos en que el mecanizado será periférico debido a la geometría que presenta la pieza y al valor de la relación  $p_R/R$ , entrando en la gráfica de la figura 139, obtenemos que el espesor promedio de la viruta será,

$$\bar{h}_1 = 0.00834 \text{ mm}$$

Por lo que calculando directamente la potencia de corte,

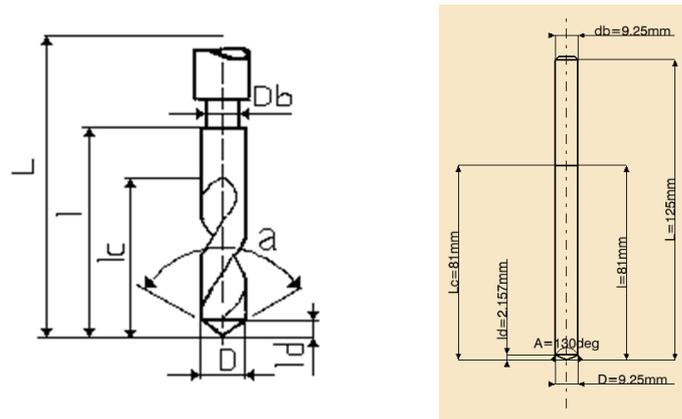
$$P_C = k_S \dot{z} = \frac{m}{\bar{h}_1^{0.46}} \dot{z} = \frac{0.475}{0.00834^{0.46}} * 2170 = 9320.02 \text{ J/min} = 0.158 \text{ kW}$$

Al tratarse de una operación convencional, vemos que la potencia de corte es prácticamente insignificante al lado del límite de la máquina. Con respecto al caso anterior, la diferencia no es muy abismal, lo cual demuestra la eficiencia del mecanizado de alta velocidad.

#### 4. BROCA HELICOIDAL

En el caso del taladrado las ecuaciones con respecto al avance serán las mismas que las explicadas anteriormente, con la salvedad de que en determinados casos la velocidad de avance podrá ser desarrollada por la herramienta que se desplaza, y no por la pieza como en el normal de los casos del fresado. En nuestro caso, la velocidad de avance será aplicada a la herramienta debido a la cinemática que posee nuestra máquina, siendo el cabezal que aloja la herramienta el que se desplaza en Z.

En lo que respecta a la geometría de la herramienta, las distintas variables que la definen son recogidas en la siguiente tabla, siendo mostrada paralelamente la representación gráfica de la herramienta en sí y de la posición de sus variables en ella.



**Figura 142.** Representación gráfica parámetros geométricos broca helicoidal

**Tabla 9.** Parámetros geométricos broca helicoidal

Variables geométricas	Valores
Ángulo de ataque	130°
Longitud de corte (lc)	81 mm
Longitud sin mango (l)	81 mm
Longitud total (L)	125 mm
Diámetro de corte (D)	9.25 mm
Diámetro mango (db)	9.25 mm
Número de dientes (Z)	2

La broca a emplear será de acero rápido, siendo por tanto sus parámetros de corte convencionales y relativamente inferiores a los empleados en el mecanizado de alto rendimiento. Según los parámetros recomendados por el fabricante [14] para el taladrado de aluminio con una broca que posee un ángulo de ataque de 135°, estos serán los mostrados en la tabla siguiente.

**Tabla 10.** Parámetros de corte broca helicoidal

Variables de corte	Valores
Velocidad de corte	70 m/min
Avance	0.245 mm/rev
Diámetro	9.25 mm

Por lo tanto para tales parámetros, las revoluciones por minuto para definir por completo la operación de taladrado, serán

$$n = \frac{1000 V_c}{\pi D_c} = \frac{1000 * 70}{\pi * 9.25} = 2409 \text{ rpm}$$

Siendo la velocidad de avance,

$$V_f = f n = 0.245 * 2409 = 590.16 \text{ mm/min}$$

Ahora bien, debido a que la viruta generada es diferente a la obtenida cuando fresamos, las ecuaciones para el cálculo de la potencia de corte también serán diferentes, sobre todo en lo que respecta al caudal de viruta y al espesor de esta. Así pues, el caudal de viruta será calculado por el producto de la velocidad de avance por el área mecanizada axialmente, siendo tal variable,

$$\dot{z} = \frac{\pi D_c^2}{4} V_f = \frac{\pi * 9.25^2}{4} * 590.16 = 39659.1 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Como podemos observar es del orden del fresado de alta velocidad, pudiendo afirmar la obtención de un gran desbaste con este tipo de operación y herramienta. Por otro lado, el espesor medio de la viruta vendrá dado por la ecuación siguiente,

$$\bar{h}_1 = \frac{f}{Z} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{0.245}{2} * \sin\left(\frac{135^\circ}{2}\right) = 0.11 \text{ mm}$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación del Método de Boothroyd para determinar la energía específica de corte, obtenemos

$$k_S = \frac{m}{\bar{h}_1^{0.46}} = \frac{0.475}{0.11^{0.46}} = 1.314 \text{ J/mm}^3$$

Siendo finalmente la potencia de corte,

$$P_C = k_S \dot{z} = 1.314 * 39659.1 = 51999.1 \text{ J/min} = 0.866 \text{ kW}$$

Como podemos observar debido en parte a que el caudal de viruta desalojado es relativamente alto, la potencia a desarrollar por el husillo también lo será, siendo aun así perfectamente tolerable por nuestra máquina al no llegar ni a la mitad del máximo de potencia.



---

# **ANEXO IV. HOJA DE PROCESOS**

---



## 1. INTRODUCCIÓN HOJA DE PROCESOS

Aunque a día de hoy el proceso de mecanización se encuentre completamente automatizado, antiguamente la hoja de procesos constituía un documento esencial para el operario, ya que sin él, este no sabría que operaciones realizar, que parámetros de corte configurar, que herramienta emplear... Con el paso del tiempo y el comienzo del control de las máquinas mediante programas de CNC, el trabajo del operario, como el uso de la hoja de procesos se vería reducido, siendo la figura de este necesaria para trabajos de supervisión ante posibles fallos, montaje del material, extracción de la pieza... además de ciertas operaciones de configuración de la máquina de CNC, es decir, operaciones que requieren de la mano del hombre en caso de no encontrarse automatizado el proceso.

Así pues, aun siendo conscientes de tal hecho, creemos necesario realizar tal hoja de procesos de cara a dar a conocer en detalle y esquemáticamente el proceso de mecanización seguido para la fabricación de la pieza diseñada, siendo recogida en la tabla siguiente cada una de las fases que componen el proceso, el orden de estas, el tipo de operación, hasta los parámetros de corte empleados como velocidad de giro, velocidad de avance o profundidad radial/axial entre otros.

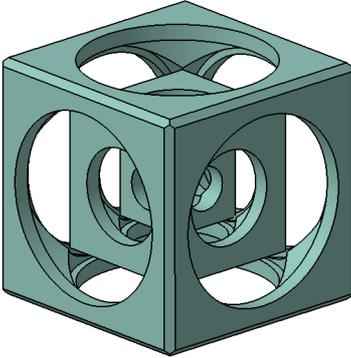
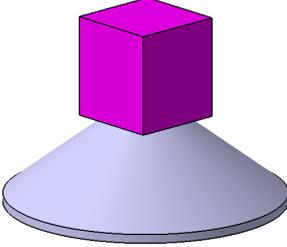
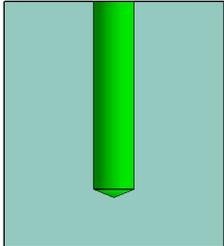
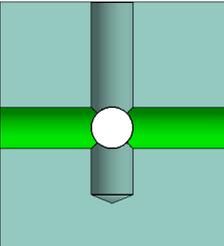
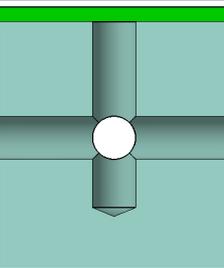
De esta forma, a nivel de taller el operario tendrá una guía completa de todo el proceso, pudiendo identificar desde aquellas operaciones más críticas, hasta el tiempo restante de mecanización, pasando por conocer cómo y cuál será el amarre siguiente y en consonancia planificar los trabajos siguientes a realizar, en cuanto al utillaje o herramientas a usar a continuación. Como podemos darnos cuenta, aunque el operario no posea una gran experiencia en la fabricación de tal determinada pieza, él tendrá la información necesaria para ser consciente que trabajo realizar y de la forma más óptima.

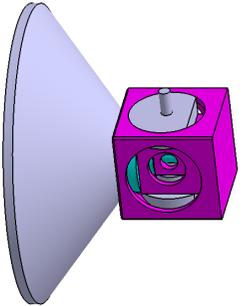
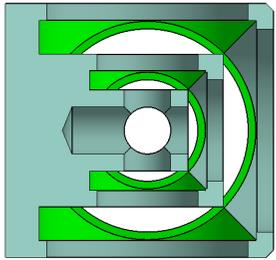
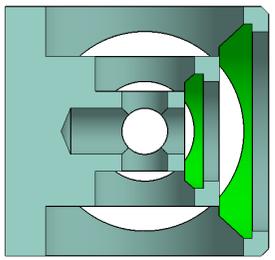
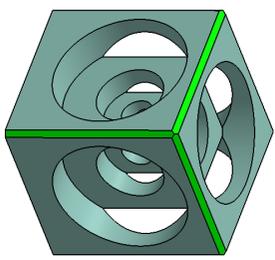
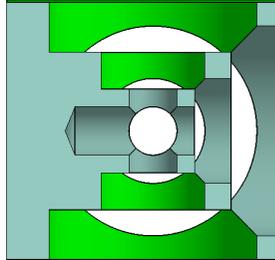
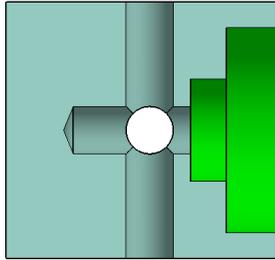
En la presente hoja de procesos se denotarán los aspectos esenciales relativos a la pieza como el tipo de material a emplear, las dimensiones de la preforma, el amarre en el que se encuentra y la necesidad de emplear utillaje auxiliar o no. A todo ello sumarle, una representación gráfica de cada una de las operaciones, lo cual aporte información sobre si el mecanizado se es realizado de acuerdo a lo definido en el software CAD/CAM. Por otro lado, se citarán también los parámetros de corte empleados, la herramienta y su número identificativo en el cargador de la máquina, además del tiempo de duración de cada operación de mecanizado.

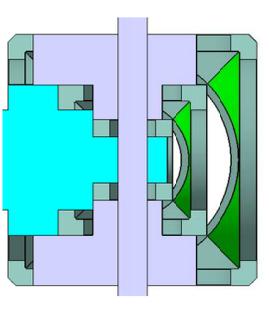
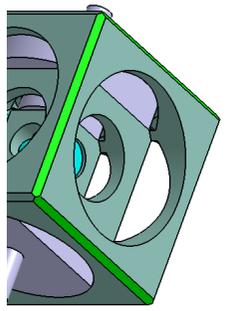
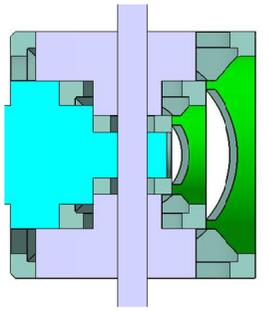
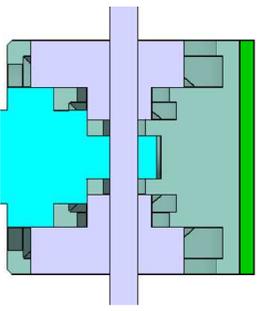
Por último, comentar que las operaciones estarán agrupadas a su vez en fases, diferenciando de una fase de otra mediante el empleo de herramientas diferentes, pudiendo estar compuesta una misma fase por múltiples operaciones de mecanizado diferentes. A su vez, la secuencia de fases serán reseteadas a cero, cada vez que se inicie un amarre de la pieza nuevo, al igual que las operaciones.

En caso de requerir más información relativa al tipo de trayectoria definida en cada operación, los parámetros de corte seleccionados, la secuencia de las operaciones... así como cada una de las respectivas justificaciones dadas, estas son recogidas en el capítulo 6 del presente proyecto.

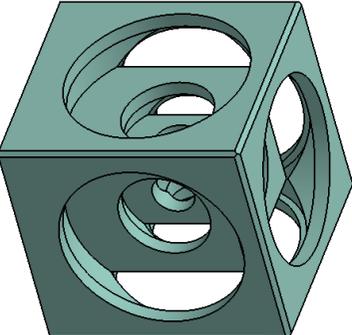
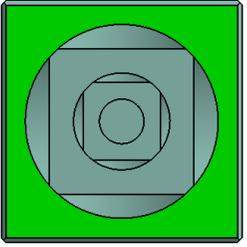
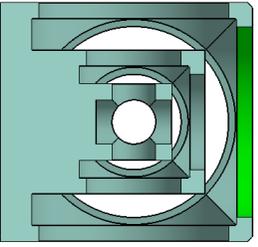
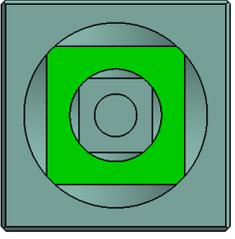
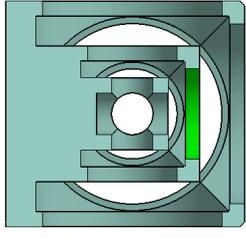
En las páginas siguientes se mostrará la hoja de procesos para ambos amarres definidos, así como la hoja de procesos de la rectificación/modificación de la pieza ante los problemas detectados durante su fabricación, siendo todos ellos recogidos en el capítulo 6.

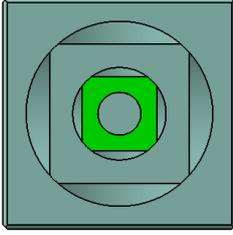
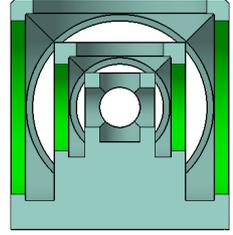
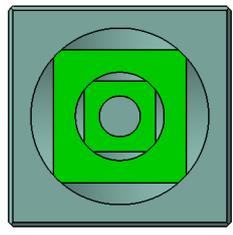
HOJA DE PROCESOS										
MATERIAL	DIMENSIONES BRUTO	MAQUINA	MECANIZADO				TIEMPO TOTAL			
Aluminio	51x51x56.35	Mikron HSM 400U	Amarre A y B				18 min 8.32 s			
										
Amarre	Fase	Operación	Descripción	Croquis	Herramienta	V. de Giro (rpm)	V. de avance (mm/min)	Prof. Radial* (mm)	Prof. Axial* (mm)	Tiempo
A	I	1	Sujeción del bruto en mesa de trabajo		Operación manual				2.5 min	
		2	Taladrado I		Broca helicoidal Ø9.25 mm	2409	590.16	-	-	6.35 s
		3	Taladrados II-V (Realización de los taladros en caras restantes)		Broca helicoidal Ø9.25 mm	2409	590.16	-	-	17.42 s
	II	4	Planeado I		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	2.5	1	28.16 S

B	A				
	III		II		
I			7	6	5
1	9	8	7	6	5
Montaje de útil y cambio de amarre	Ranurados III-X	Ranurados I-II	Chafilanados I-VIII	Planeados II-V y cajeados III-X (Realización de planeados y cajeados en caras restantes)	Cajeados I-II
					
Operación manual	Fresa de ranurar Ø16.5 mm	Fresa de ranurar Ø16.5 mm	Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm
	1929	1929	24192	24192	24192
	482.28	482.28	9676.62	9676.62	9676.62
	1.5	1.5	2.5	2.5	2.5
	3	3	1	1	1
4 min	270.96 s	67.74 s	12.51 S	137.58 s	28.22

B			
=	I		
5	4	3	2
Ranurados XI-XII	Chafilanados IX-XII	Cajeados XI-XII	Planado VI
			
Fresa de ranurar Ø16.5 mm	Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm
1929	24192	24192	24192
482.28	9676.62	9676.62	9676.62
1.5	2.5	2.5	2.5
3	1	1	1
67.74 s	5.26 s	28.22 s	28.16 s

\* Variables referidas por pasada de herramienta.

HOJA DE PROCESOS								
MATERIAL	DIMENSIONES BRUTO	MAQUINA	MECANIZADO	TIEMPO TOTAL				
Aluminio	51x51x56.35	Mikron HSM 400U	Rectificado amarre A	4 min 45.7 s				
								
A		Amarre						
I		Fase						
				Operación				
				Descripción				
				Croquis				
				Herramienta				
				V. de Giro (rpm)				
				V. de avance (mm/min)				
				Prof. Radial* (mm)				
				Prof. Axial* (mm)				
				Tiempo				
1	Planeado I		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	2.5	1	10.36 s
2	Contorneado I		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	0.025	3	2.43 s
3	Cajeado I (Se planea el fondo del cajeado anteriormente realizado)		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	2.5	1	6.52 s
4	Contorneado II		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	0.025	3	2 s

A	5	Cajeado II (Se planea el fondo del cajeado anteriormente realizado)		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	2.5	1	4.29 s
		6	Operaciones de 1 a 5 repetidas en el resto de caras		Fresa toroidal Ø10 /R1.5 mm	24192	9676.62	2.5 / 0.025	1 / 3
	7	Ranurados I-X (Realización de ranurados en todas las caras de la pieza)		Fresa de ranurar Ø16.5 mm	1929	482.28	1.5	3	157.71 s

\* Variables referidas por pasada de herramienta.