



Universidad de León



Ingeniería Técnica Industrial

INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAFOMÉTRICAS. ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS

REVERSE ENGINEERING OF A TEST MODEL THROUGH PHOTOGRAMETRIC RESTITUTION TECHNOLOGIES. ANALYSIS AND RESULT COMPARISON

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL, INFORMÁTICA Y AERONÁUTICA

AUTOR: Ricardo Fernández Fernández

TUTOR: D. Fernando Jorge Fraile Fernández

FEBRERO 2013



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



Este trabajo de “INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS. ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS” constituye el TRABAJO FIN DE CARRERA de RICARDO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, alumno de la Escuela de Ingenierías Industrial e Informática de la Universidad de León.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por Fernando Jorge Fraile Fernández., profesor del Departamento de Tecnología Minera, Topográfica y de Estructuras de la Universidad de León.

VºBº Oficina Técnica:

Tutor:

Fdo. Manuel Castejón Limas

Fdo. Fernando Jorge Fraile Fernández

Autor:

Fdo. Ricardo Fernández Fernández



INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS. ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS



En el presente documento estudio la capacidad y precisión que posee la fotogrametría digital actual por medio de programas como el Photomodeler 7 en su versión Scanner y el Autodesk 123D Catch para la restitución de pequeños objetos que presentan diferentes geometrías, mediante el empleo de distintos equipos fotográficos (tanto domésticos como profesionales) y su posible uso en planimetría o aplicaciones de ingeniería inversa.

Through this document I have studied the capabilities and accuracy of the current digital photogrammetry making use of computer programs such as Photomodeler 7 –Scanner version- and Autodesk 123D Catch, and a variety of photographic devices –for domestic and professional use- for small, geometry-complex, objects restitution. It has also been studied their suitability for planimetry and reverse engineering applications.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**





**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAFÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



*“No hay nadie menos afortunado que el hombre al que la adversidad olvida,
pues no tiene oportunidad de ponerse a prueba”*

Lucio Anneo Séneca



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



Me gustaría agradecer de manera sincera la ayuda prestada por el Dr. Jesús Gonzalo De Grado, el Dr. Diego Domínguez y D. Deibi López, del Área de Ingeniería Aeroespacial, en todo el proceso de fabricación de la pieza necesaria para la realización de este proyecto, ofreciéndome en todo momento su tiempo y conocimiento sin reparo alguno.

Agradecer también a D. Fernando Chao Martínez la cesión y explicación de funcionamiento de todo el valioso material fotográfico que he usado y a D. José Antonio Merayo González sus consejos y asistencia en todo el trabajo de campo del presente documento.

No puedo olvidar tampoco la paciencia y comprensión de mi tutor, D. Fernando Jorge Fraile Fernández.



ÍNDICE GENERAL

1	FOTOGRAMETRÍA	13
1.1	Definición	13
1.2	Evolución histórica	13
1.2.1	Hitos en la historia fotogramétrica	17
1.3	Fundamentos de la fotogrametría.	22
1.3.1	La imagen digital	23
1.3.2	Proyección cónica.....	26
1.3.3	Proyección central	28
2	OBJETIVOS	31
3	DESARROLLO.....	33
3.1	Diseño del modelo	33
3.1.1	Material y herramientas empleadas	33
3.1.2	Diseño de la pieza con CATIA V5 R19	33
3.2	Generación de trayectorias para el mecanizado.....	38
3.2.1	Material y herramientas empleadas	38
3.2.2	Creación del archivo *.stl	39
3.2.3	Generación de las trayectorias con Cut 3D	40
3.3	Fabricación de la pieza	50
3.3.1	Material y herramientas empleadas	50
3.3.2	Proceso	51
3.4	Restitución del modelo por medio de Autodesk 123D Catch.....	59
3.4.1	Materiales y herramientas empleadas.....	59
3.4.2	Toma de fotografías.....	60
3.4.3	Procesado.....	62
3.4.4	Resultados.....	68
3.5	Restitución del modelo por medio de Photomodeler Scanner	69



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



3.5.1	Materiales y herramientas utilizados.....	69
3.5.2	Calibración de la cámara fotográfica	70
3.5.3	Generación de dianas	80
3.5.4	Realización de las fotografías	83
3.5.5	Procesado. Restitución por nube de puntos.	88
4	RESULTADOS.....	97
5	CONCLUSIONES	117
6	BIBLIOGRAFÍA	119
ANEXO A - GLOSARIO DE TÉRMINOS FOTOGRÁFICOS Y FOTOGRAMÉTRICOS		123
ANEXO B - ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL FOTOGRÁFICO		137
ANEXO C - FRESADORA ALARSIS FR180		153
PLANOS		157



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Cámara oscura del siglo XVII.....	14
Figura 1.2: Vista desde la ventana en Le Gras. Primera fotografía (Wikipedia)	18
Figura 1.3: Primer estereoscopio (Wikipedia).....	18
Figura 1.4: Primera fotografía aérea, poblado de Petit-Bicêtre (google)	20
Figura 1.5: Esquema simplificado de una imagen digital.	23
Figura 1.6: Detalle y zoom de una imagen.....	24
Figura 1.7: Proyección cónica y elementos de proyección	27
Figura 1.8: Perspectiva de rectas paralelas.....	28
Figura 1.9: Esquema proyección central	29
Figura 3.1: Pieza original	35
Figura 3.2: Captura de modificación de los paralelepípedos.....	36
Figura 3.3: Captura de modificación del voladizo	37
Figura 3.4: Captura de modificación de los taladros no pasantes.	37
Figura 3.5: Captura de la pieza modificada totalmente.	38
Figura 3.6: Generación del archivo *.stl	40
Figura 3.7: Paso 1 en Cut 3D.....	41
Figura 3.8: Paso 2. Orientación y medidas.....	42
Figura 3.9: Paso 3. Materiales a mecanizar.	43
Figura 3.10: Paso 4. Estrategia de desbaste.....	44
Figura 3.11: Paso 5. Acabado superficial.....	46
Figura 3.12: Paso 6. Recorte.....	47
Figura 3.13: Paso 7. Simulación de trayectorias.	48
Figura 3.14: Paso 8. Exportación de archivos de trayectoria.	49
Figura 3.15: Fresadora Alarsis FR-180 (Alarsis)	50
Figura 3.16: Planchas de Poliestireno Extruido, XPS (Modisprem)	51
Figura 3.17: Fijación del bloque de material en la bancada de la fresadora.....	52
Figura 3.18: Referenciado del eje Z.	53
Figura 3.19: Captura del software de control Artsoft Mach 2.....	54
Figura 3.20: Etapa de desbaste.	54
Figura 3.21: Etapa de acabado superficial.....	55
Figura 3.22: Pieza finalizada.	56



Figura 3.23: Mecanizado de la nueva pieza 1.....	57
Figura 3.24: Mecanizado de la nueva pieza 2.....	57
Figura 3.25: Segunda pieza mecanizada.	58
Figura 3.26: Nikon D800E (Nikon)	59
Figura 3.27: Inicio de la toma de fotografías.	60
Figura 3.28: Esquema representación posiciones de la cámara	61
Figura 3.29: Creación de un trabajo nuevo.	63
Figura 3.30: Descripción del proyecto	63
Figura 3.31: Modelo restituido.....	64
Figura 3.32: Selección de mallado.	65
Figura 3.33: Referenciado de puntos.	66
Figura 3.34: Designación de distancia de referencia.	67
Figura 3.35: Esquema calibración.....	72
Figura 3.36: Plantilla de calibración.	73
Figura 3.37: Conjunto de las 12 fotografías de calibración.	76
Figura 3.38: Calibración. Selección de fotografías.....	77
Figura 3.39: Calibración. Búsqueda automática y referenciado de puntos de plantilla.....	77
Figura 3.40: Calibración. Referenciado y parámetros.	78
Figura 3.41: Calibración. Orientación de las capturas.	79
Figura 3.42: Generación de dianas.....	81
Figura 3.43: Diferentes tipos de dianas.....	82
Figura 3.44: Esquema itinerario.....	83
Figura 3.45: Situación de la pieza test sobre el “torno”.....	85
Figura 3.46: Colocación de pieza, torno, cámara y trípode.	85
Figura 3.47: Situación de todos los elementos.....	86
Figura 3.48: Mediciones fotómetro.....	86
Figura 3.49: Fotografía en una visual extrema.	87
Figura 3.50: Referenciado básico. Puntos inteligentes.	89
Figura 3.51: Referenciado básico. Selección de cámara calibrada.	90
Figura 3.52: Referenciado básico. Búsqueda automática de puntos.....	90
Figura 3.53: Referenciado de dianas codificadas.....	91
Figura 3.54: Escalado y aplomado del modelo.	92
Figura 3.55: Parámetros nube de puntos.	94
Figura 3.56: Pieza test restituida por nube de puntos.	95



Figura 4.1: Medición de la pieza con calibre.....	97
Figura 4.2: Mediciones con láser.....	98
Figura 4.3: Vista de pieza y ejes de referencia.	99
Figura 4.4: Captura detalle 1.	100
Figura 4.5: Gráfica error absoluto detalle 1.....	102
Figura 4.6: Gráfica error relativo detalle 1.	102
Figura 4.7: Captura detalle 2.	103
Figura 4.8: Gráfica error absoluto detalle 2.....	104
Figura 4.9: Gráfica error relativo detalle 2.	105
Figura 4.10: Captura detalle 3.	105
Figura 4.11: Gráfica error absoluto detalle 3.....	106
Figura 4.12: Gráfica error relativo detalle 3.	106
Figura 4.13: Captura detalle 4.	107
Figura 4.14: Gráfica error absoluto detalle 4.....	108
Figura 4.15: Gráfica error relativo detalle 4.	109
Figura 4.16: Captura detalle 5.	109
Figura 4.17: Gráfica error absoluto detalle 5.....	110
Figura 4.18: Gráfica error relativo detalle 5.	110
Figura 4.19: Captura detalle 6.	111
Figura 4.20: Gráfica error absoluto detalle 6.....	112
Figura 4.21: Gráfica error relativo detalle 6.	112
Figura 4.22: Captura detalle 7.	113
Figura 4.23: Gráfica error absoluto figura 7.....	114
Figura 4.24: Gráfica error relativo detalle 7.	115
Figura B.1: Cámara Nikon D800E (Nikon).	137
Figura B.2: Cámara Nikon P7100 (Nikon).....	143
Figura B.3: Objetivo Nikon AF-S 35mm F/1,4 G (Nikon)	145
Figura B.4: Flash Nikon SB-910 (Nikon)	146
Figura B.5: Flash Nikon SB-800 (Nikon).	149
Figura B.6: Fotómetro Sekonic Flashmatic L-308-S (Sekonic).....	150
Figura C.1: Fresadora Alarsis FR180 (Alarsis).	153
Figura C.2: Mandrino KRESS 1050 FME (Kress).....	154



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros de corte.....	44
Tabla 3.2: Ajuste de velocidades de desbaste.	45
Tabla 3.3: Parámetros de trayectoria.....	45
Tabla 3.4: Ajuste de velocidades de acabado.	46
Tabla 3.5: Ajuste de velocidades de recorte.	48
Tabla 4.1: Mediciones detalle 1.	101
Tabla 4.2: Errores detalle 1.	101
Tabla 4.3: Mediciones detalle 2.	103
Tabla 4.4: Errores detalle 2.	104
Tabla 4.5: Mediciones detalle 3.	105
Tabla 4.6: Errores detalle 3.	106
Tabla 4.7: Mediciones detalle 4.	107
Tabla 4.8: Errores detalle 4.	108
Tabla 4.9: Mediciones detalle 5.	109
Tabla 4.10: Errores detalle 5.	110
Tabla 4.11: Mediciones detalle 6.	111
Tabla 4.12: Errores detalle 6.	111
Tabla 4.13: Mediciones detalle 7.	113
Tabla 4.14: Errores detalle 7.	114
Tabla 4.15: Errores generales de la pieza	115
Tabla B.1: Especificaciones Nikon D800E (Nikon).	137
Tabla B.2: Especificaciones de Nikon P7100 (Nikon).	143
Tabla B.3: Especificaciones del objetivo Nikon AF-S 35mm (Nikon).	145
Tabla B.4: Especificaciones del Flash Nikon SB-910 (Nikon).	147
Tabla B.5: Especificaciones del flash Nikon SB-800 (Nikon).	149
Tabla B.6: Especificaciones del fotómetro Sekonic Flashmatic L-308-S (Sekonic).	150
Tabla C.1: Características técnicas del mandrino KRESS 1050 FME (Kress).	154
Tabla C.2: Especificaciones del mandrino KRESS 1050 FME (Kress).	155



1 FOTOGRAMETRÍA

1.1 Definición

Como primera aproximación al término *fotogrametría* podemos decir que es la ciencia o técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de la medida o medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, o de una fotografía y el modelo digital del objeto o terreno correspondiente al medio representado, el cual ha de ser realizado anteriormente por intersección de dos o más fotografías.

La palabra fotogrametría se deriva del vocablo “fotograma” (de “phos”, “potos”, luz y “gramma”, trazado, dibujo), como algo listo, disponible (una foto) y “metrón”, medir. Por lo que resulta que el concepto *fotogrametría* es: “medir sobre fotos”.

Si trabajamos con una foto podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos fotos, en la zona común a éstas zonas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica (información tridimensional).

En definitiva, se trata de una técnica de medición de coordenadas en tres dimensiones, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota como medio fundamental para la medición. Es por tanto, una disciplina resultado de la convergencia de la óptica, la fotografía y las matemáticas.

1.2 Evolución histórica

Podemos vincular los inicios de la fotogrametría con los de la óptica, al estar ambas estrechamente relacionadas. Esta ciencia tuvo un desarrollo práctico fundamental tanto en la captura de imágenes, como en su posterior reconstrucción y cuya evolución tanto teórica como práctica permitió la popularización por parte de los pintores, de la cámara oscura (Figura1.1), la cual constituye la base de la actual cámara fotográfica.

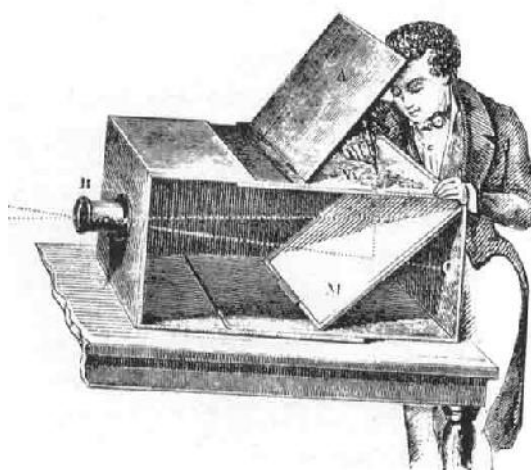


Figura 1.1: Cámara oscura del siglo XVII

Durante el siglo XVIII había alcanzado tal popularidad, que eran fabricadas casi en serie, adaptadas a los usos y circunstancias. Así pues, cuando aparecieron las primeras emulsiones fotográficas, ya contaban con un aparato relativamente perfeccionado donde podían ser colocadas para captar la luz. Paralelamente, los métodos matemáticos para realizar el alzado de objetos utilizando perspectivas, también habían sido desarrollados para el momento de la aparición de la fotografía, por lo que la utilización de la misma para el trazado de planos, fue inmediatamente puesto en práctica, con resultados satisfactorios. La utilidad comprobada de la fotografía, para trabajos topográficos, estimuló el desarrollo de técnicas que llevaron a mejorar las aplicaciones de la fotogrametría.

Podemos considerar como primera aproximación de Fotogrametría en la historia antigua la utilización de la cámara lúcida por los pintores de la época. Una cámara lúcida es un dispositivo óptico usado por artistas como ayuda para dibujar. Fue patentado en 1806 por William Hyde Wollaston. Parece ser que la cámara lúcida no es más que una reinención de un dispositivo descrito claramente 200 años antes por Johannes Kepler en su obra *Dioptrice* (1611). Hacia el siglo XIX la descripción de Kepler cayó en el olvido, así que nadie demandó a Wollaston. El término cámara lúcida es de Wollaston. La cámara lúcida realiza una superposición óptica del tema que se está viendo y de la superficie en la que el artista está dibujando. El artista ve las dos escenas superpuestas, como en una fotografía que se haya expuesto dos veces. Esto permite al artista transferir puntos de referencia de la escena a la superficie de dibujo, ayudándole así en la recreación exacta de la perspectiva. En la forma



más simple de la cámara lúcida, el artista mira hacia la superficie de dibujo a través de un espejo semitransparente inclinado 45 grados. Esto superpone la visión directa del dibujo de la superficie y el reflejo de una escena horizontal en frente del artista. El instrumento a menudo incluye una lente negativa débil, creando una imagen virtual de una escena de más o menos la misma distancia de la superficie de dibujo, de forma que ambas se pueden ver bien enfocadas simultáneamente.

A partir de aquí, en el desarrollo de la fotogrametría se pueden distinguir cuatro grandes etapas:

- **Metrofotografía (1850-1900):** Se inicia con la invención de la fotografía por Niépce y Daguerre en 1839 en Francia. El término metrofotografía fue acuñado en 1851 por el coronel francés Aimé Laussedat, a quien se considera el fundador de la Fotogrametría.

En aquella época, la principal aplicación era la fotogrametría aérea. La metrofotografía fue definida en su día como el método que consiste en levantar planos por medio de los datos obtenidos en fotografías panorámicas de la región. Según una revista de obras públicas de los primeros años del siglo XX, el método no parecía haberse adoptado de una manera tan general como hubiera sido de esperar. Sin embargo, a causa de sus ventajas, sobre todo en los países abruptos, se pueden citar importantes trabajos geográficos realizados en Rusia.

De estos trabajos forma parte la descripción de un aparato fotográfico de siete cámaras y siete objetivos, destinado a ser suspendido de un cometa o de un globo cautivo, para tomar vistas panorámicas extensas: una de las cámaras se enfoca verticalmente hacia el suelo, y las otras seis, dispuestas simétricamente en corona alrededor de ella, toman vistas oblicuas que abrazan todo el horizonte. Cuando el aparato está a una altura suficiente y en la posición horizontal, o sea, vertical el eje del primer objetivo, se desenganchan a la vez los siete obturadores.

Todas estas disposiciones son estudiadas por M. Thiele que, además, indica el modo como ha de emplearse este “autopanorámografo”, que pesa 6 kilogramos. También publica las fotografías obtenidas con este aparato.



- **Fotogrametría analógica** (1900-1960): basada en la evolución de los aparatos de restitución y es la responsable de la realización de la mayoría de la cartografía mundial. En ella, un par de fotografías son colocadas en un aparato restituidor de tipo óptico o mecánico.

El operador realiza en forma manual la orientación interior y exterior para crear el modelo estereoscópico, debidamente escalado y nivelado. El levantamiento de la información planimétrica y altimétrica del modelo se realiza también en forma manual, mediante el seguimiento con la marca flotante posada sobre los detalles de la superficie del modelo. Esta información es ploteada en una cartulina colocada sobre la mesa trazadora, relacionada con el modelo por medios mecánicos o eléctricos.

- **Fotogrametría analítica** (1960-1980): Aparece como un desarrollo natural de la interrelación entre los aparatos restituidores analógicos y el surgimiento de la computación. En ella, la toma de información es analógica y el modelado geométrico es matemático.

Mediante el uso de un monocomparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas 'x' e 'y' de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas del computador del sistema. Este realiza el procesamiento de la orientación interior y exterior en forma analítica y procesa el levantamiento de la información del modelo que realiza el operador, para llevarla a su correcta posición ortogonal, y finalmente almacenarla en una base de datos tipo CAD.

- **Fotogrametría digital** (1980-actualidad): Actualmente en auge, surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadores.

Con la fotogrametría digital crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, ortoimágenes y estereortoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales etc. Para llevar a cabo la restitución digital, las imágenes digitales son ingresadas en el computador, y mediante visualización en pantalla de las mismas, el operador ingresa los puntos necesarios para realizar el proceso de orientación en forma matemática. La restitución puede ser un proceso iterativo con el operador o ser realizada en forma automática por correlación



de imágenes. La salida en la fotogrametría digital puede ser en formato raster (matriz) o formato vectorial.

1.2.1 Hitos en la historia fotogramétrica

A continuación se detalla cronológicamente los hechos más relevantes en la evolución de esta técnica:

1038: Alhazen publica su tratado sobre óptica, traducido al latín en el año 1270, bajo el título *Opticae Thesaurus Alhazeni libri vii*. En este tratado se aborda el estudio de las propiedades visuales en relación con los lentes de aumento. Esta nueva comprensión de los lentes, fundada en la geometría y la experimentación, inspira el arte de los ópticos holandeses quienes, ubicando un lente frente a otro, inventaron la luneta astronómica, permitiendo a Galileo revolucionar la astronomía.

1553: Giovanni Battista della Porta describe detalladamente la cámara oscura; su construcción, así como los usos que se le pueden dar. Constituyó uno de los dispositivos ancestrales que condujeron al desarrollo de la fotografía. Los aparatos fotográficos actuales heredaron la palabra cámara de las antiguas cámaras oscuras. Originalmente, consistía en una sala cerrada cuya única fuente de luz era un pequeño orificio practicado en uno de los muros, por donde entraban los rayos luminosos reflejando los objetos del exterior en una de sus paredes. El orificio funciona como una lente convergente y proyecta, en la pared opuesta, la imagen del exterior invertida tanto vertical como horizontalmente.

1704: Sir Isaac Newton publica el libro *Opticks*, estableciendo los principios de la óptica moderna.

1725: M. A. Capeller produce un mapa del Monte Pilatus, basándose en dibujos en perspectiva.

1727: Johan Heinrich Schulze determina la sensibilidad de las sales de plata a la luz.



1759: Johan Heinrich Lambert desarrolló en su obra Perspectiva libre, el procedimiento sistemático para la transformación de una perspectiva.

1802: Thomas Wedgwood inicia las primeras aplicaciones de las ideas de Schulze.

1819: John Herschel descubre el hiposulfito de sodio, que servirá para fijar la imagen.

1827: Joseph Nicéphore Niépce toma la primera fotografía del mundo (Figura1.2).



Figura 1.2: Vista desde la ventana en Le Gras. Primera fotografía (Wikipedia)

1832: Sir Charles Wheatstone descubre la forma de recrear la visión estereoscópica mediante dos dibujos con puntos de vista ligeramente diferentes, y un visor para su observación, al que llamó “estereoscopio” (Figura 1.3).



Figura 1.3: Primer estereoscopio (Wikipedia)



1837: Louis Daguerre, asociado con Niépce, inventa un proceso de yoduro de plata sobre una placa de cuero. El tiempo de exposición, de ocho horas mediante el proceso de Niépce, se reduce a una veintena de minutos.

1839: El 19 de agosto, François Arago, un geodesta de la Academia Francesa de Ciencia, anuncia en sesión pública de la Academia de Ciencias de París el proceso fotográfico directo creado por Luis Daguerre, dándole el nombre de “Daguerrotipo”. Para la obtención de la imagen se parte de una capa sensible de nitrato de plata extendida sobre una base de cobre. A partir de una exposición en la cámara, el positivo se plasma en el mercurio. Finalmente, la imagen se fija tras sumergir la placa en una solución de cloruro sódico o tiosulfato sódico diluido.

1839: John Herschel adopta el término “fotografía”.

1840: François Arago, demostró la posibilidad de usar fotografías en los levantamientos topográficos.

1849: El oficial Aimé Laussedat, del cuerpo de ingenieros del ejército francés inicia los primeros experimentos con la perspectiva mediante cámara lúcida, para realizar levantamientos topográficos. Experimentó con fotografías tomadas desde globos, exhibió el primer fototeodolito y un mapa de París hecho mediante levantamiento aéreo.

1852: El oficial Aimé Laussedat adopta la fotografía para reemplazar la cámara lúcida en los levantamientos topográficos. A este procedimiento le puso el nombre de “metrofotografía”.

1855: El fotógrafo Gaspard-Félix Tournachon, más conocido como Nadar, toma la primera fotografía aérea del mundo (Figura 1.4), sobre el poblado de Petit-Bicêtre, desde un globo. El 23 de octubre de ese mismo año, patenta la idea de utilizar la fotografía aérea para realizar los levantamientos topográficos y la realización de mapas.



Figura 1.4: Primera fotografía aérea, poblado de Petit-Bicêtre (google)

1859: El coronel Aimé Laussedat presenta una recopilación de sus experimentos.

1873: Creación de las emulsiones fotográficas modernas por John Burgess.

1885: Primer registro fotogramétrico de sitios arqueológicos, en las ruinas de Persepolis (Irán).

1888: El capitán Edouard Gaston Daniel Deville inicia la fotogrametría terrestre en Canadá, como alternativa a los levantamientos topográficos extensos, convirtiéndola en un procedimiento rutinario. Poco más tarde la fotogrametría terrestre llegaría al resto del mundo. En el caso concreto de España una de las primeras aplicaciones fue en 1928 con el trabajo llevado a cabo por el ingeniero geógrafo José Soriano Viguera en el Pirineo Central.

1892: F. Stolze inventa la marca flotante (índice móvil). La propuesta de Stolze era la de desplazar micrométricamente cuadrículas sobre fotografías estereoscópicas, logrando de esta manera que la imagen fusionada estereoscópicamente de las dos cuadrículas se percibiese como moviéndose en profundidad.

1893: El arquitecto Albrecht Meydenbauer introduce el término “fotogrametría”.



1896: Edouard Gaston Daniel Deville presenta el primer instrumento que usa pares estereoscópicos para realizar planos de línea.

1909: Carl Pulfrich inicia experimentos con fotos estereoscópicas.

1910: Fundación de la Sociedad Internacional para la Fotogrametría, ISP en sus siglas en inglés, actualmente ISPRS, en Austria por E. Dolezal.

1913: Primer congreso de la ISP, llevado a cabo en Viena.

1913: El capitán Cesare Tardivo produce el primer fotoplano basado en fotografías aéreas tomadas desde un avión sobre Bengasi, Italia. Este primer fotoplano consistía en un mosaico en escala 1:4000 de la ciudad.

1955: Rosenberg publica un artículo acerca de la Teoría de la Información y la Fotogrametría Electrónica, sentando las bases de la fotogrametría digital. Se sistema de fotogrametría comprendería el registro electrónico o digitalización de las imágenes y su almacenamiento en una cinta magnética o bien en forma de onda modulada de radio.

1958: Helava, inventor del restituidor analítico, describe las ventajas que tienen este tipo de restituidores frente a los clásicos de tipo analógico. Helava considera que las dos partes principales de un restituidor analítico son el sistema de visión-medición y el ordenador. La aparición de los sistemas analíticos plateó unas importantes expectativas, muchas de las cuales se han convertido en realidad, acerca de sus posibilidades de mejorar el rendimiento del procedimiento fotogramétrico y su mayor nivel de precisión. Los restituidores analíticos permiten un alto nivel de precisión, ofrecen gran versatilidad y un cierto grado de automatización, en especial en lo relativo a los procedimientos de orientación. Es importante establecer que el grado de automatización se alcanza mediante el cálculo numérico de los procedimientos de orientación y no mediante la automatización del proceso de medida que se sigue realizando mediante un índice flotante, al igual que en los restituidores clásicos de tipo analógico.

1982: Case presenta el diseño de un prototipo de sistema fotogramétrico digital “Digital Stereo Comparator Compiler (DSCQ)”. Este fue concebido como un restituidor analítico que



aceptaba, como información de entrada, imágenes en formato digital registradas en una cinta magnética.

1988: Konecny indica las ventajas del remuestreo epipolar de las imágenes para la visualización y la medición, un principio fundamental muy común en la actualidad, haciendo especial hincapié en los aspectos referentes a la integración de los resultados y a la conexión con SIG, procesamiento de diferentes tipos de datos (información de fotografías aéreas, datos geológicos, datos estadísticos, etc.) y la posibilidad de utilización de los sistemas por usuarios no expertos.

1992: Leberl indica las diferencias entre "softcopy" y "hardcopy", los datos en informática se denominan "softcopy format" mientras que las reproducciones impresas de dichos datos se denominan "hardcopy format", así trasladando ese concepto a la Fotogrametría, las imágenes digitales serían "softcopy" mientras que las imágenes analógicas son "hardcopy".

1.3 Fundamentos de la fotogrametría.

El principio en el que se basa la fotogrametría consiste en proyectar en forma ortogonal sobre un plano de referencia, la imagen registrada en una fotografía, la cual ha sido proyectada sobre el negativo (o sensor en cámaras digitales) mediante la proyección central, que es la usada por las lentes.

En fotogrametría se asume que la proyección central es perfecta, lo cual implica que:

- No existe desviación de los rayos de luz que atraviesan los lentes de la cámara.
- La imagen se proyecta sobre una superficie perfectamente plana.
- La relación matemática que relaciona el objeto y su imagen se conoce con el nombre de principio de colinealidad. Este principio obliga a que se encuentren en la misma recta el centro de proyección, el punto imagen y el punto objeto proyectado. De tal forma que si conseguimos que esta condición se cumpla en las dos perspectivas de ese



mismo punto objeto, queda asegurada la intersección de dos rayos homólogos en el punto del objeto prefijado. Es decir, se cumple cuando el punto de vista, el punto imagen y el punto objeto se encuentran en la misma recta.

A continuación se detalla con mayor detenimiento los diferentes conceptos sobre los que se asienta la fotogrametría que nos ocupa en el presente proyecto, la digital:

1.3.1 La imagen digital

Una imagen digital es una función $f(x, y)$, donde x e y representan unas coordenadas y el valor $f(x, y)$, es proporcional a la transmitancia o reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado (x, y) .

Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz discreta de puntos de un determinado tamaño, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de color. Por tanto puede decirse que una imagen digital se puede asimilar a una matriz de n filas y m columnas. A cada celda de la matriz se le denomina pixel (picture x element) y esta representa una superficie que es función de su tamaño $(\Delta x, \Delta y)$. A cada pixel le corresponde uno o más valores digitales (número digital o valor digital “Nd”). (Figura 1.5 y Figura 1.6)

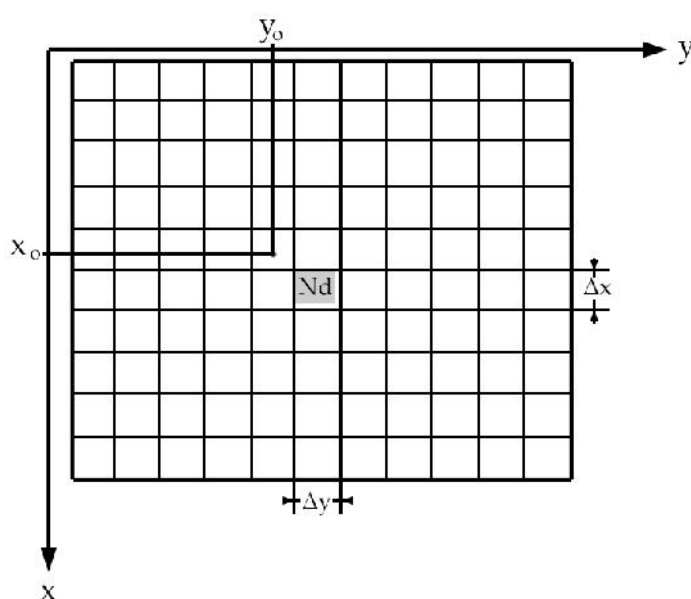


Figura 1.5: Esquema simplificado de una imagen digital.



El número digital puede representar información de diversa naturaleza, así puede ser proporcional a las características físicas del área (radiancia, reflectividad, transmisividad, emisividad) o bien representar los valores resultantes de la manipulación de la información original mediante técnicas de análisis de imágenes.

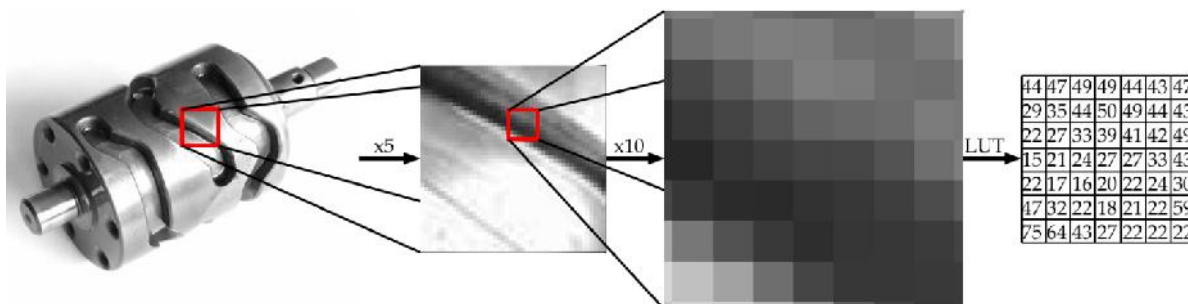


Figura 1.6: Detalle y zoom de una imagen

La matriz definida por los números digitales tiene carácter multidimensional en función de las capas de información almacenadas (bandas o canales). Entre las imágenes más frecuentemente empleadas se encuentran las imágenes monocanal: imágenes binarias (blanco/negro) y las imágenes pancromáticas o monocromáticas; las imágenes de tres canales como las imágenes en color (un canal para cada color básico -rojo, verde, azul-) y las imágenes en falso color; y, por último, las imágenes multicanal como las imágenes multiespectrales representadas por más de tres pseudocolores. Las imágenes más frecuentemente empleadas en Fotogrametría son las imágenes monocanal (pancromáticas) y las imágenes en color.

En las imágenes pancromáticas el tono de la señal está representado, habitualmente, por 8 bits (1 byte). Con esta dimensión se tiene la posibilidad de codificar 2^8 tonos de gris = 256 tonos (0 a 255).

Esta cifra que en principio puede parecer escasa, es suficiente para todas las aplicaciones teniendo en cuenta que el ojo humano sólo puede distinguir aproximadamente 200 tonos. Generalmente la correspondencia que se aplica entre el valor digital y el tono (tabla de consulta o look up table –LUT-) es negro (0) y blanco (255). En las imágenes en color el esquema de almacenamiento es similar utilizando cada píxel tres números enteros de 8 bits



para su codificación (uno para cada canal), por lo que se requiere tres veces más espacio para su almacenamiento.

La calidad de una imagen digital depende de la finura del retículo es decir del tamaño de pixel (resolución espacial) empleada para la codificación: elementos de gran tamaño producen pérdida de información y elementos demasiado pequeños requieren disponer de un gran espacio de almacenamiento. Es importante tener en cuenta que la calidad de la imagen va a depender del sistema disponible, tanto en lo referente a posibilidades gráficas (número de colores que es capaz de presentar), como del almacenamiento disponible por lo que se puede considerar un problema de tipo económico.

Si una imagen equivale a una matriz de n filas por m columnas, el tamaño de ésta tendrá una relación casi directa entre el formato de la imagen y la superficie de cada una de esas celdas. El primer dato a tener en cuenta es la equivalencia entre puntos por pulgadas (ppp o dpi), y micras, ya que son las micras la unidad que nos interesa para evaluar el tamaño de pixel. Conocida la resolución o tamaño de pixel de una imagen, se pueden asignar coordenadas (x , y) al centro de cada celda. Por tanto, la precisión de las coordenadas obtenidas de un objeto imagen dependen del tamaño del pixel, en cuanto que el objeto sufre una generalización importante que influye en su correcta definición geométrica.

➤ **Ventajas de la imagen digital**

La utilización en fotogrametría de las imágenes digitales lleva consigo una serie de ventajas e inconvenientes que están ligados a las ventajas e inconvenientes de la fotogrametría digital frente a las técnicas clásicas de tipo analógico.

Entre las ventajas más importantes se puede destacar:

- Las imágenes digitales, por su soporte de almacenamiento, carecen de los problemas derivados de la estabilidad dimensional que afecta a las imágenes analógicas cuando se modifican las condiciones medioambientales de su almacenamiento.
- Las imágenes digitales no requieren de manipulación directa a la hora de ser utilizadas por lo que se eliminan los problemas ligados al



deterioro que dicha manipulación conlleva. Las imágenes digitales pueden ser modificadas para mejorar su visualización con programas como el Adobe Photoshop (ajustes de niveles de brillo, contraste,...) mediante la aplicación de técnicas de análisis de imágenes.

- Pueden ser transmitidas de forma sencilla, rápida y segura a través de de diferentes dispositivos (tarjetas de memoria, dispositivos USB,...).
- Los productos derivados del tratamiento de las imágenes son obtenidos directamente en formato digital, por lo que son rápidamente integrables en sistemas de tipo CAD (Diseño Asistido por Computador)

1.3.2 Proyección cónica

La proyección de un objeto cualquiera sobre una superficie es la intersección con la misma de una radiación de rectas que pasan por los diferentes puntos. Normalmente, dicha superficie es un plano y entonces la proyección del objeto puede definirse también como la sección por dicho plano del haz de rectas que constituyen la radiación considerada. Para que el haz de rectas resulte determinado, además de pasar las mismas por los distintos puntos del objeto, tienen que cumplir otra condición, y ésta es la que caracteriza a las distintas proyecciones.

En la proyección cónica, la condición que se impone a las rectas del haz es que han de pasar por un punto determinado O, llamado centro o polo de la proyección, por lo que el haz constituye una radiación cónica, y de ahí el nombre que recibe la proyección.

Cuando en el centro O de la proyección se supone situado el ojo del observador, al punto O se le denomina punto de vista, y al plano I de proyección, plano del cuadrado, o simplemente cuadro. Al plano vertical V, que pasa por O, y es perpendicular al plano del cuadro I, se le llama plano principal, y línea principal a la recta v_1v_2 , según la cual se cortan los planos V e I, o sea, la traza del plano principal sobre el cuadro.

La recta indefinida OP perpendicular al cuadro y bajada desde el punto de vista, es el eje de proyección. Al punto P situado al pie de la perpendicular se le denomina punto principal de la



perspectiva y distancia principal a la del punto de vista al cuadro, representada en la figura por la recta OP y contenida en el plano principal.

La recta $h_1 h_2$ intersección del plano del cuadro con el horizontal que pasa por O es la línea del horizonte u horizontal principal. Se llaman planos de frente a los que son paralelos al plano del cuadro, y perspectiva imagen de un objeto a su proyección sobre el plano del cuadro.

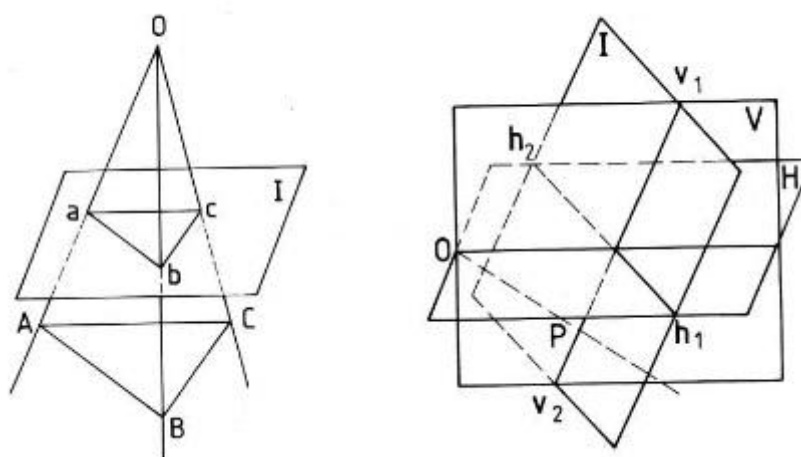


Figura 1.7: Proyección cónica y elementos de proyección

La perspectiva de una recta es otra recta, efectivamente, las proyectantes de los diversos puntos de una recta AB (Figura 1.8) se encuentran en el plano que determinan la recta AB y el punto de vista, es decir, que el cono de proyección se ha quedado reducido a un plano proyectante que corta al plano del cuadro según la recta ab ; únicamente en el caso de que la recta AB pase por el punto de vista, al confundirse todos los rayos proyectantes en uno solo, la imagen de la recta queda reducida a un punto.

Para obtener la imagen de un punto M del infinito de la recta AB , bastará unir dicho punto con el de vista; para ello, se traza desde O una paralela a la recta AB , y el punto m en que esta paralela corta al cuadro es el punto deseado, que se encontrará también en la prolongación del segmento ba . Las perspectivas de otras rectas paralelas a la AB , como la DE , pasarán todas por el punto m , imagen del punto del infinito de todas ellas; y por lo tanto, la imagen de un



haz de rectas paralelas, es un haz de rectas concurrentes. Al punto m se le llama punto de fuga o de desvanecimiento de la dirección AB .

Todas las rectas paralelas al plano del cuadro, como las AB , CD ,... (Figura 1.8), tienen el punto de fuga en el infinito, y en consecuencia, las imágenes de un haz de rectas paralelas al plano del cuadro son también paralelas. El punto de fuga de una recta horizontal se encuentra sobre la línea del horizonte, y el de una recta paralela al plano principal, sobre la línea principal.

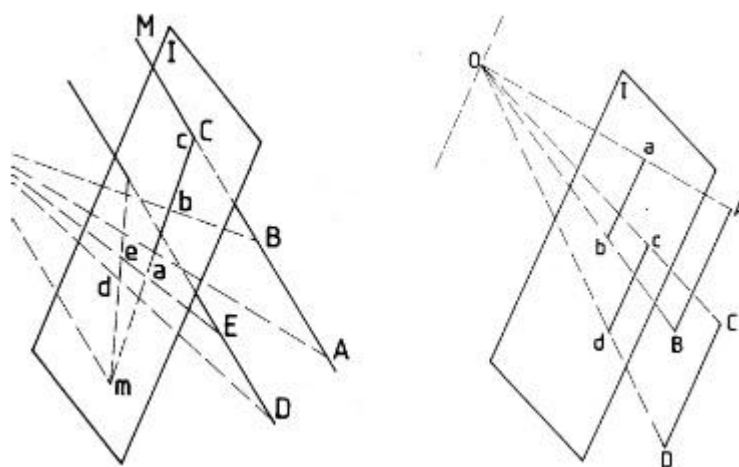


Figura 1.8: Perspectiva de rectas paralelas

1.3.3 Proyección central

El elemento fundamental del trabajo fotogramétrico es la fotografía, su imagen es la expresión real y sincera del objeto en el momento de la toma fotográfica. Antes de tratar sobre las propiedades geométricas de una fotografía, nos referiremos a los principios geométricos sobre los cuales se basa.

La fotografía es una proyección central, se forma la imagen fotográfica de un objeto espacial, sobre un plano al atravesar por un “objetivo”, los rayos son reflejados por dicho objeto e inciden sobre el plano antes mencionado.

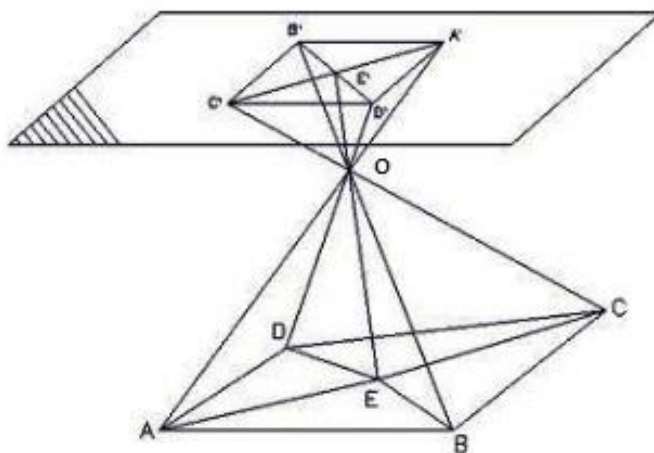


Figura 1.9: Esquema proyección central

Todos los rayos que provienen del objeto ABCDE atraviesan el objetivo representado por el centro de proyección O e inciden en el otro lado (A'B'C'D'E') sobre el plano de proyección α . La proyección central muestra las siguientes propiedades:

- Por cada punto del objeto corresponde un solo punto imagen.
- A cada punto de la imagen corresponde una infinidad de puntos del objeto, al encontrarse en el mismo rayo.
- Las líneas rectas quedan como tal, sin embargo cambian su orientación. Los ángulos no se conservan en general. Esto trae como consecuencia que las paralelas no pueden figurar como tales.
- Solamente las líneas rectas que se encuentran en un plano paralelo con el plano de la imagen, se muestran paralelas entre sí.
- Otros haces de paralelas se cortan en un punto del plano de imagen, en el punto de fuga F.



La imagen fotográfica por tanto es deformada. De estas propiedades se ve que no es posible, en principio, tomar ninguna medida sobre la fotografía. Sin embargo se pueden medir distancias y ángulos en un plano o en un mapa. Es por tanto tarea de la fotogrametría transformar una proyección central en una ortogonal.

Hemos visto la representación de la proyección central, por medio del haz de rayos que atraviesa el centro de proyección, existe una relación de interdependencia terminante entre los puntos del objeto y los puntos de la imagen. Inversamente, los puntos de la imagen pueden reducirse a una infinidad de puntos a lo largo de los rayos de proyección. De este conjunto hay que sacar los puntos que restituyen por su composición, las formas del objeto original.

Esto se consigue al llegar a cortarse, dos rayos que provienen de dos puntos idénticos, es decir, los rayos homólogos. Se trata de buscar la misma configuración que en el momento de tomar la fotografía. Los dos haces de rayos homólogos se llegan a cortar y el modelo del terreno así conseguido es el lugar geométrico de todos los puntos de intersección de los rayos homólogos de un par de fotogramas o estéreo fotograma. Una proyección ortogonal de los puntos del modelo obtenido origina ahora un plano.



2 OBJETIVOS

El presente Proyecto Fin de Carrera tiene como fin evaluar la capacidad y precisión de las técnicas fotogramétricas actuales para la obtención o restitución de objetos empleando herramientas domésticas o semiprofesionales. Para ello, procederemos de la siguiente manera:

1. Diseño de una pieza con diferentes geometrías mediante el CATIA V5.
2. Fabricación del anterior modelo en Polietileno de Alta Densidad (HDPE) por medio de un centro de mecanizado de 3 movimientos operado por medio del Cut3D.
3. Toma de fotografías de la pieza construida con diferentes modelos de cámaras fotográficas digitales, todas ellas del fabricante Nikon.
4. Procesamiento de las fotografías con los programas de restitución Autodesk 123Catch D y el PhotoModeler en su versión Scanner.
5. Comparación entre los resultados obtenidos con los anteriores programas y las medidas reales de la pieza.
6. Estudio de la idoneidad de la técnica para este caso concreto.

En los siguientes capítulos detallaremos con mucha más profundidad todas las etapas del mismo, indicando tanto la metodología como las herramientas empleadas. También describiremos las dificultades y trucos que nos hemos ido encontrando durante todo el proceso para estudiar al final, la aplicación de la fotogrametría digital para trabajos de ingeniería inversa de cierta precisión en objetos pequeños con texturas y geometrías complicadas. Así mismo, al término del presente proyecto y a modo de Anexo, se dispondrá de un glosario de términos fotográficos y fotogramétricos que ayudarán a la comprensión del trabajo fin de carrera.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**





3 DESARROLLO

3.1 Diseño del modelo

La primera parte de este proyecto consiste en diseñar y fabricar la pieza que posteriormente restituiremos y compararemos los planos obtenidos con los iniciales. Para lo referente al diseño empleamos uno de los más potentes programas de diseño asistido (CAD), como es el CATIA en su versión 5. A continuación detallamos en profundidad todo el proceso.

3.1.1 Material y herramientas empleadas

Los materiales y herramientas utilizadas en esta fase del proyecto son:

- Ordenador portátil Compaq Presario CQ50 (Procesador Intel Celeron 2.0Ghz).
- Ratón Trusth óptico.
- Software CATIA V5 Release19.

3.1.2 Diseño de la pieza con CATIA V5 R19

CATIA es un sofisticado y eficaz programa de diseño asistido por ordenador (CAD) desarrollado por Dassault Systèmes, que permite la elaboración de formas y piezas complejas en tres dimensiones (3D). CATIA está orientado a la producción, siendo un programa de tipo CAM que permite la creación y el diseño de objetos, y su preparación para la cadena de producción, como por ejemplo el torneado de piezas o el mecanizado. Además CATIA también entra dentro de las aplicaciones CAE ya que está preparado para el análisis de productos.

CATIA originalmente era una aplicación desarrollada para sistemas operativos Unix, como Irix, Aix, Solaris etc, especialmente optimizada para estaciones de trabajo graficas; pero en la actualidad se ha popularizado gracias a su versión para Windows.



La aplicación de diseño 3D CATIA, gracias a su especialización en el diseño de formas complejas y su integración en los procesos de producción industrial es muy utilizada en la industria aeronáutica, en la automovilística y actualmente en la construcción de edificios complejos, de los que caben destacar conocidas empresas de diseño y fabricación de automóviles que lo emplean para sus desarrollos: BMW, Porsche, Seat, Audi, Volkswagen, Renault, o en arquitectura, como el diseño del museo Guggenheim Bilbao.

La información en el CATIA V5 está distribuida en módulos de trabajo en función de su finalidad. Algunos de los módulos más utilizados en diseño serán el Part Design, Assembly Design y Wireframe and Surface Design, siendo cada módulo compatible con unos determinados tipos de archivo con extensiones y características diferentes. La descripción de los mismos es la siguiente:

- **Part Design:** entorno paramétrico basado en características en el que se crearán modelos sólidos. Todos los archivos tendrán asociada la extensión “CATPart”. Es el módulo usado para ésta parte del Trabajo Fin de Carrera.
- **Assembly Design:** usado para ensamblar componentes usando restricciones. Todos los archivos creados tendrán asociada la extensión “CATProduct”.
- **Wireframe and Surface Design:** en él se crean modelos alámbricos y de superficie. Todos los archivos creados también tienen asociada la extensión “CATPart”.

La representación de la información en todos los módulos de diseño se realizará a través de un espacio tridimensional y una estructura de árbol. La estructura de árbol, cuando se aplica a un CATPart, mantiene una traza de todas las operaciones realizada durante el diseño, un sistema de ejes coordenados, y una representación de todos los tipos soportados por el módulo Part Design activos. La estructura de árbol, aplicada a un CATProduct, se compone de un registro jerárquico con las localizaciones de todos los CATParts y/o CATProducts del diseño, manteniendo propiedades de herencia para algunas características de los elementos, de forma que si se cambia el valor de alguna de ellas se modificará en cascada la de los pertinentes.

La raíz del árbol en estos módulos siempre debe ser un CATProduct, pudiendo tener n_0 , $n_1 \dots n_k$ hijos, tanto las hojas del árbol como los hijos de un CATProduct podrán ser del tipo



CATPart o CATProduct con la única restricción de que un CATPart nunca podrá tener hijos. Durante el proceso de diseño, en todo momento podrá cambiarse las opciones de navegación entre los distintos CATParts o CATProducts siendo la actualización de los elementos asíncrona y manual.

Una vez descritas algunas características del CATIA V5, procedo a explicar de forma muy breve y esquemática el proceso de diseño para nuestra pieza en cuestión.

Mi tutor me proporciona una pieza (Figura 3.1) que presenta diferentes geometrías, en las que se pueden señalar un importante número de tolerancias geométricas. Una vez analizada la misma y viendo las herramientas (fresas de 3,5 y 5mm) y materiales que disponíamos para su fabricación, es necesaria una serie de modificaciones tanto dimensionales como geométricas.

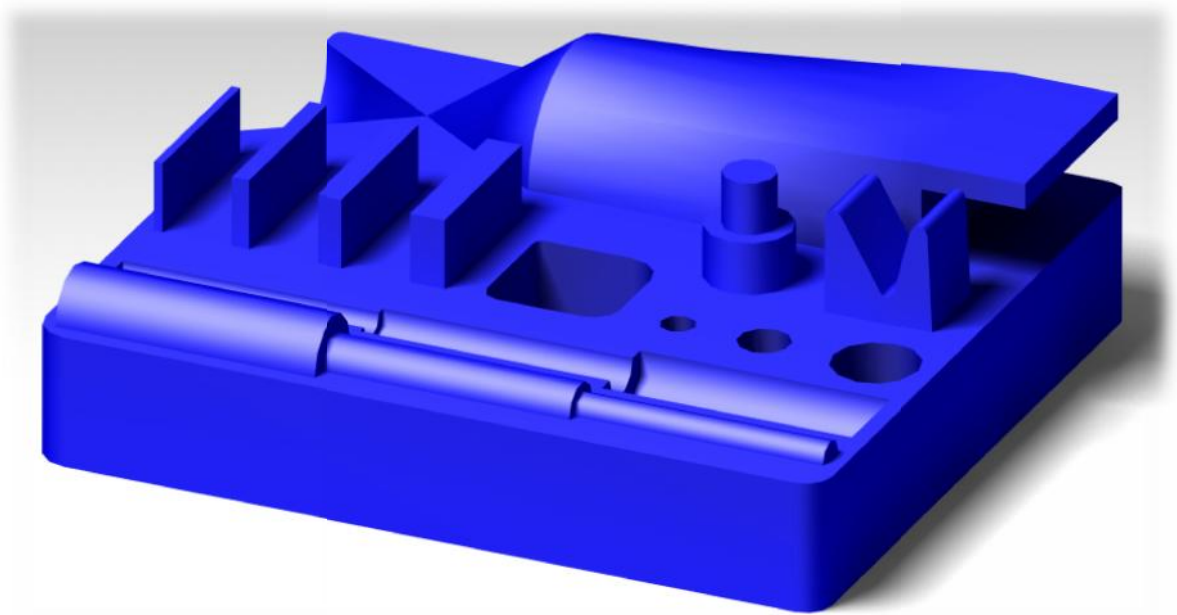


Figura 3.1: Pieza original



Los principales cambios necesarios son:

- Modificación en el espesor, el número y la distancia de separación entre los paralelepípedos señalados en la figura 3.2. El motivo se debe a la fragilidad que presentarían con las cotas originales (1, 2, 3 y 4 mm), a parte de la imposibilidad técnica de conseguirlos con las herramientas y materiales que disponíamos.

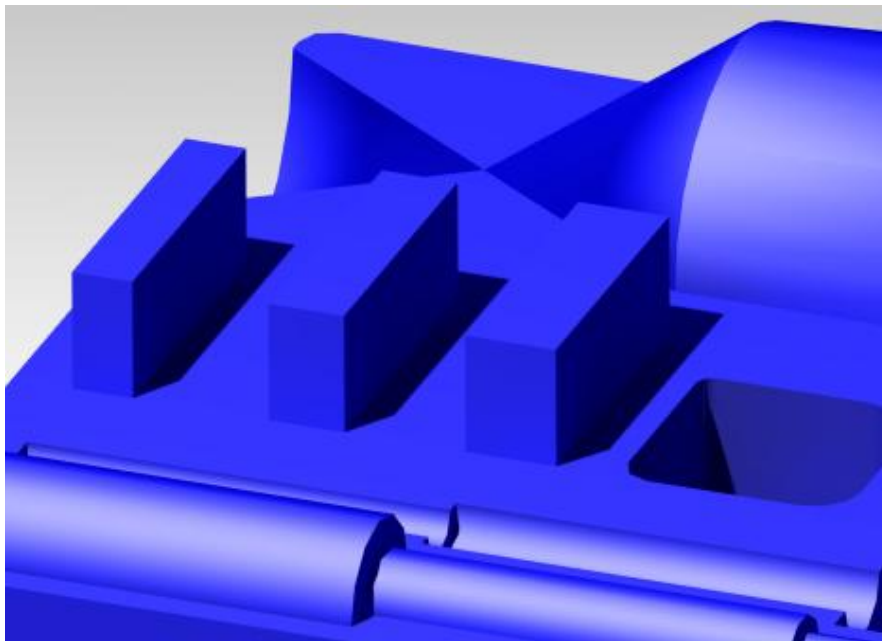


Figura 3.2: Captura de modificación de los paralelepípedos

- Otra modificación necesaria se localiza en la parte señalada de la figura 3.3. El voladizo marcado tampoco sería viable a la hora de mecanizar la pieza, debido a que la máquina-herramienta no disponía de ese movimiento para realizarlo, por tanto se procedió a su eliminación.
- También se redimensionó los diámetros de los taladros no pasantes (figura 3.4) ya que la broca más pequeña disponible era de 3,2mm, y la pieza, en la configuración original, el taladro menor era de 1mm de radio. Por tanto se ajustaron todos los diámetros de manera proporcional el taladro más pequeño.

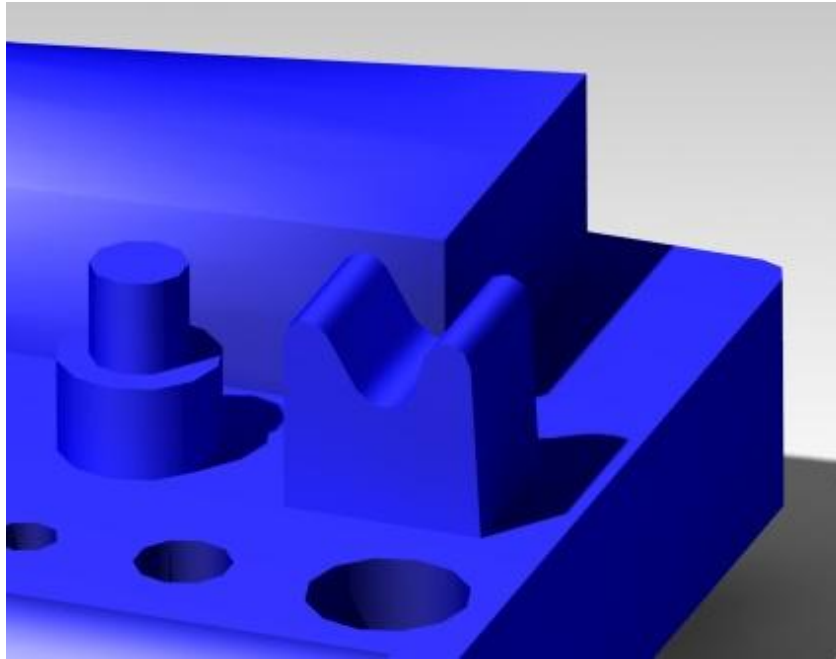


Figura 3.3: Captura de modificación del voladizo

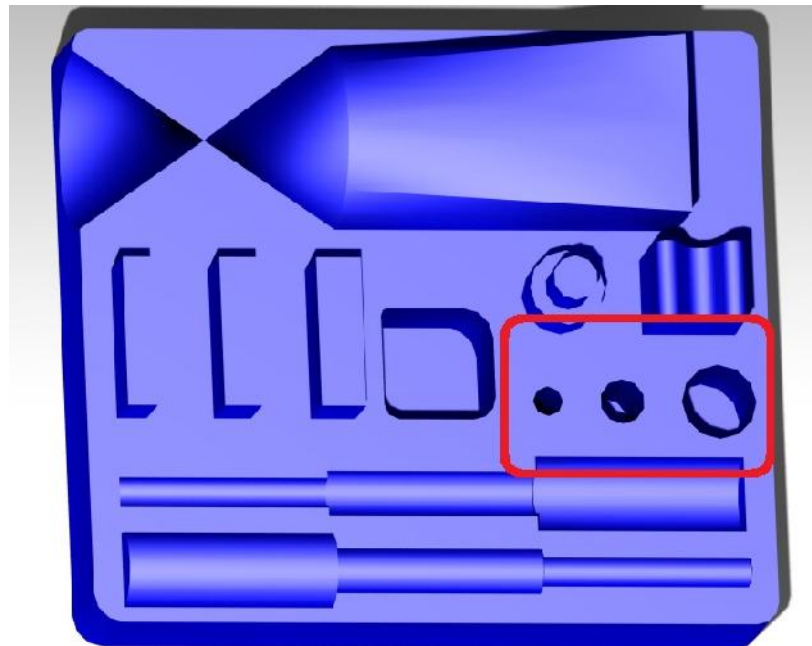


Figura 3.4: Captura de modificación de los taladros no pasantes.

Después de realizar todos estos cambios, la pieza válida para nuestros condicionantes es la mostrada en la figura 3.5, detallada de manera más concienzuda en los planos mostrados en la sección PLANOS, al final del presente documento.

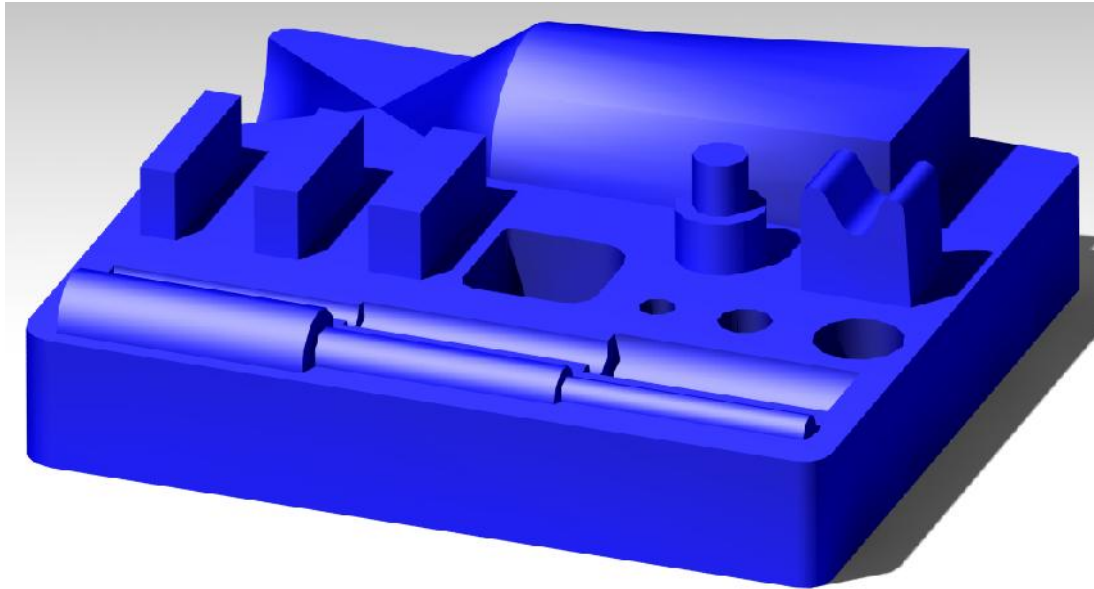


Figura 3.5: Captura de la pieza modificada totalmente.

3.2 Generación de trayectorias para el mecanizado

Una vez diseñada correctamente la pieza, el siguiente paso consiste en la generación de las trayectorias para que el centro de mecanizado de control numérico las emplee para la fabricación de la misma. Con los datos obtenidos, se introducirán posteriormente en el procesador del centro de mecanizado para que siga las órdenes indicadas según el diseño presente en la pieza.

3.2.1 Material y herramientas empleadas

- Ordenador portátil Compaq Presario CQ50 (Procesador Intel Celeron 2.0Ghz).
- Autodesk Inventor 2012.
- Cut 3D.



3.2.2 Creación del archivo *.stl

El programa que nos generará las trayectorias del centro de mecanizado en nuestro caso es el 3D Cut, sin embargo, para que el programa conozca las geometrías de la pieza a fabricar, es preciso introducirlas en uno de los siguientes formatos: *.stl, *.obj, *.sbp, *.v3m,...

En nuestro caso escogemos el tipo de archivo *.stl. Este tipo de archivo utiliza una malla de pequeños triángulos sobre las superficies para definir la forma del objeto. Para que un objeto definido en un archivo *.stl se construya correctamente los triángulos deben encajar perfectamente entre ellos sin huecos ni superposiciones. El *.stl es un formato de salida estándar para la mayor parte de los programas CAD (Diseño Asistido por Ordenador) y el número de triángulos a utilizar puede ser definido por el usuario. Normalmente, se establece una pugna entre detalle y tamaño del archivo. Por ejemplo, para representar cualquier superficie curvada se necesita gran cantidad de triángulos planos (facetas), especialmente si se quiere conseguir una curva suave. Sin embargo, esto genera archivos muy grandes, que pueden resultar difíciles de manejar.

Para la realización de este fichero, empleamos el Autodesk Inventor, un programa de diseño CAD, similar al CATIA V5, pero del fabricante Autodesk. Está enfocado principalmente a la creación y ensamblado de objetos 3D. Usamos el Inventor porque genera este archivo de mayor calidad y precisión al que produciría el CATIA V5.

El procedimiento es sencillo. En primer lugar ejecutamos el Autodesk Inventor. Una vez que el programa haya cargado, abrimos el archivo que contiene nuestra pieza, en este caso, *"pieza_modificada_1.part"*. Con la pieza en nuestra ventana de trabajo y confirmando que ha cargado correctamente, procedemos a guardar una copia con el comando *"Guardar como..."*. Entre la lista de opciones disponibles de la nueva ventana emergente, seleccionamos *"Archivos STL"* como se indica en la captura ofrecida en la figura 3.6. También modificaremos los parámetros de calidad y ajustes de dicho formato, seleccionando *"Opciones..."*. Una vez hecho esto, guardamos la nueva copia y ya tendremos disponible el archivo *"pieza_modificada_1.stl"* para el siguiente paso en la fabricación de nuestro modelo.

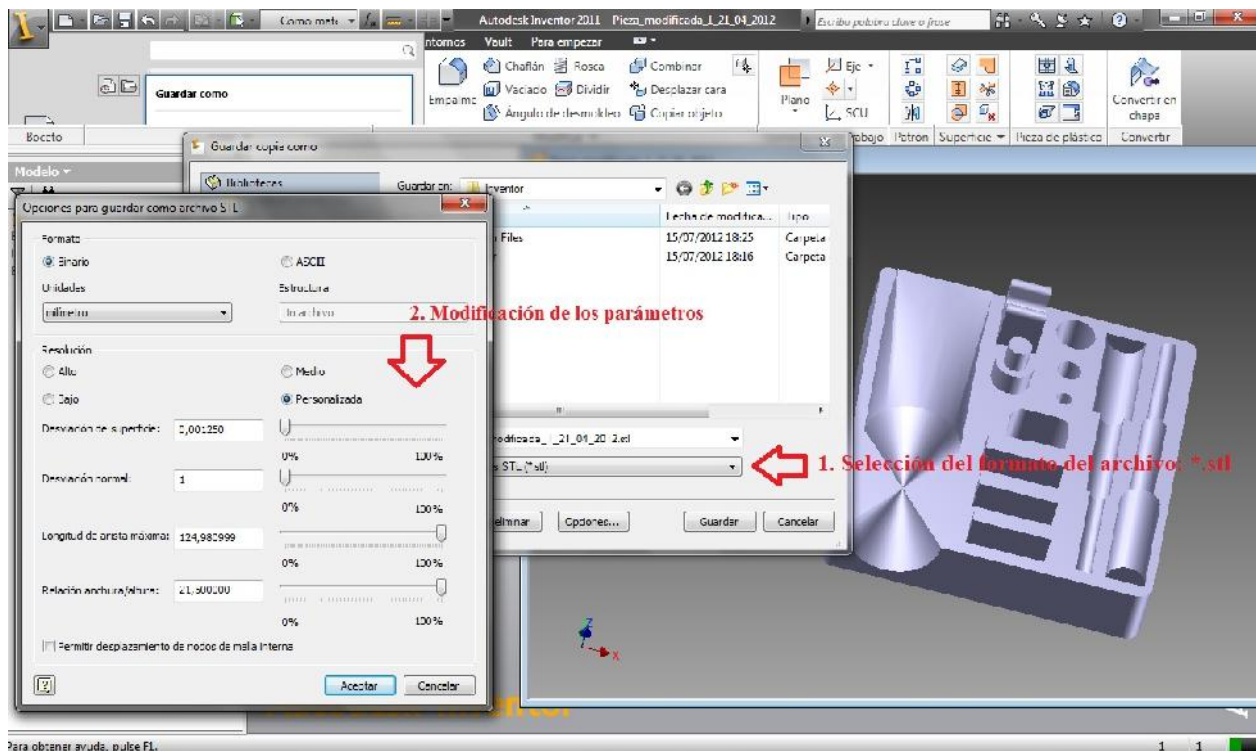


Figura 3.6: Generación del archivo *.stl

3.2.3 Generación de las trayectorias con Cut 3D

Cut3D es un software para la programación de trayectorias de mecanizado CNC (Control Numérico Computerizado) de modelos 3D que han sido diseñados usando CAD 3D o un software de diseño gráfico, tales como AutoCAD, CATIA, Rhino3D, 3D Studio,... o escaneadas utilizando un láser o un dispositivo de palpación.

Permite el cálculo de trayectorias de desbaste y acabado a una, dos o cuatro caras, la vista previa de los resultados y, finalmente, el postprocesado del código CNC para ejecutar en la máquina fresadora o centro de mecanizado. Además, los modelos en 3D que son demasiado grandes para la máquina debido a la altura de pórtico, la longitud de corte o el espesor del material, pueden ser “troceados” en estratos definibles por el usuario, creando piezas separadas. Cada estrato puede ser mecanizado de forma separada, para montarlos y obtener así el trabajo final. No es nuestro caso, ya que, por el tamaño de la pieza, es fácilmente realizable en una sola parte.



Los pasos seguidos con este programa son:

1. **Inicialización del programa:** Abrimos el Cut 3D y cargamos el fichero *.stl generado anteriormente con el Autodesk Inventor 2012, en nuestro caso, “pieza_modificada_1_15_05_2012.stl”. (Figura 3.7)

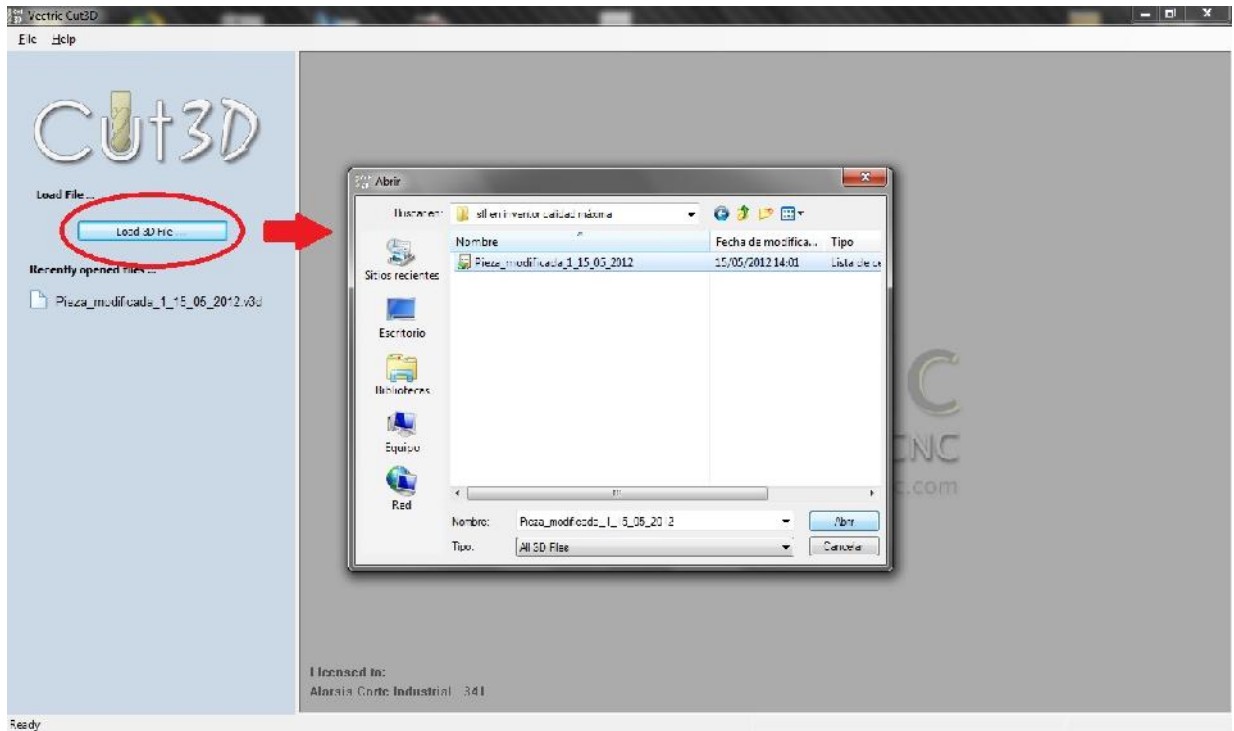


Figura 3.7: Paso 1 en Cut 3D

2. **Medidas y orientación:** Se trata de definir los ejes en la pieza y dimensionar las formas del material en cuestión, sobre el que se mecanizará nuestro objeto. En esta pantalla, se configuran los siguiente parámetros:
 - **Top surface:** en ella se especifica cuál es la superficie superior según los ejes coordinados asignados. Elegimos la opción conveniente, la superior.
 - **Model Size:** son las proporciones de nuestro objeto, como se puede ver en la figura 3.7; 92,80 y 27,5 mm según los ejes y, x, z respectivamente.



- **Sides to Machine:** Marcamos las caras que se van a mecanizar, nosotros sólo la superior (Top).

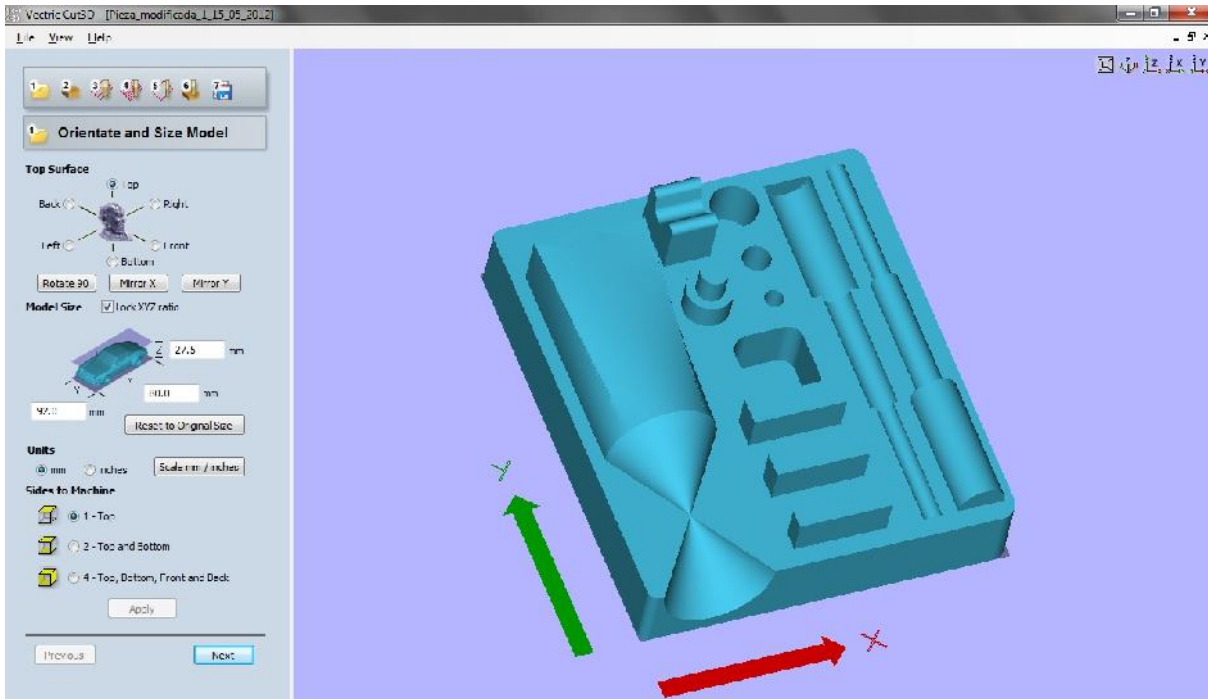


Figura 3.8: Paso 2. Orientación y medidas.

3. **Materiales a mecanizar:** se trata de especificar la información del material, así como seleccionar el área que va a ser trabajada y su posición en el plano del eje Z (Figura3.9). Como se aprecia en las capturas, indica un tiempo estimado, generalmente suele ser mucho mayor.

- **Material Size:** corresponde a las medidas del material que posteriormente mecanizaremos. En nuestro material base son 100x100x40 milímetros.
- **XY Origin Position:** para establecer el origen de nuestro sistema y que luego tomará la herramienta. Optamos por establecerlo en el centro de la pieza y la cara superior.



- **Machining Margins around Model:** en caso de que quisiéramos dejar alrededor de la pieza unos márgenes sin mecanizar, indicaríamos en esta opción el porcentaje con respecto a la misma o las dimensiones.
- **Depth of Model below Surface:** debemos indicar la distancia que existe entre el la parte superior del material que disponemos y el punto de mayor altura de la pieza. Es decir, el material sobrante hasta que comience a dar forma al objeto.

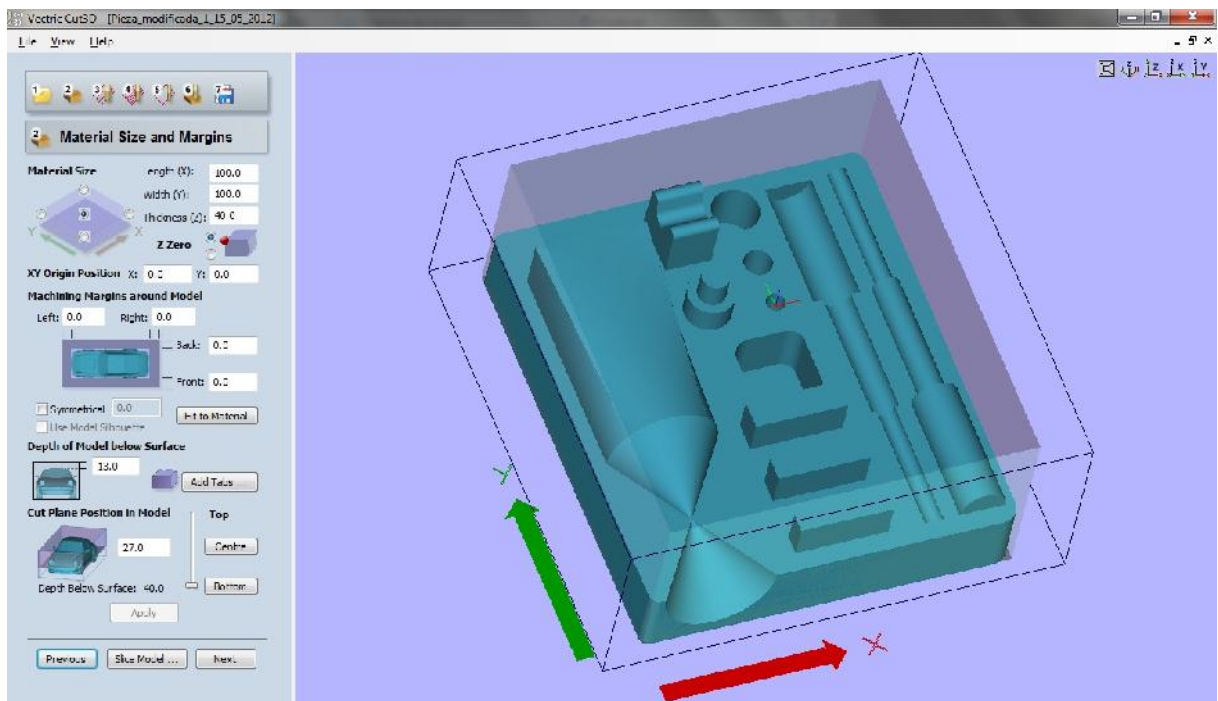


Figura 3.9: Paso 3. Materiales a mecanizar.

- **Cut Plane Position in Model:** se refiere a la posición hasta donde la máquina operará, en este caso, elegimos hasta la base de la pieza (bottom). En realidad, como nuestro diseño no posee ningún taladro pasante, no bajará hasta tal posición.
4. **Estrategia de desbaste:** definiremos tanto las herramientas como las velocidades de las mismas. La trayectoria de la máquina de desbaste es opcional, ya que a veces se puede realizar el modelo con la herramienta de acabado directamente. En el caso de este proyecto si es precisa tal etapa. Se muestra en la figura 3.10.



- **Selección de la herramienta:** es necesario conocer las herramientas disponibles para obtener un trabajo de cierta calidad. En esta etapa de desbaste, se disponía de una fresa de 6 mm de cabeza redonda, por tanto, buscamos en la base de datos del programa si disponía de las características que necesita de la misma, en caso contrario, debemos crear una ficha nueva con la fresa en cuestión.

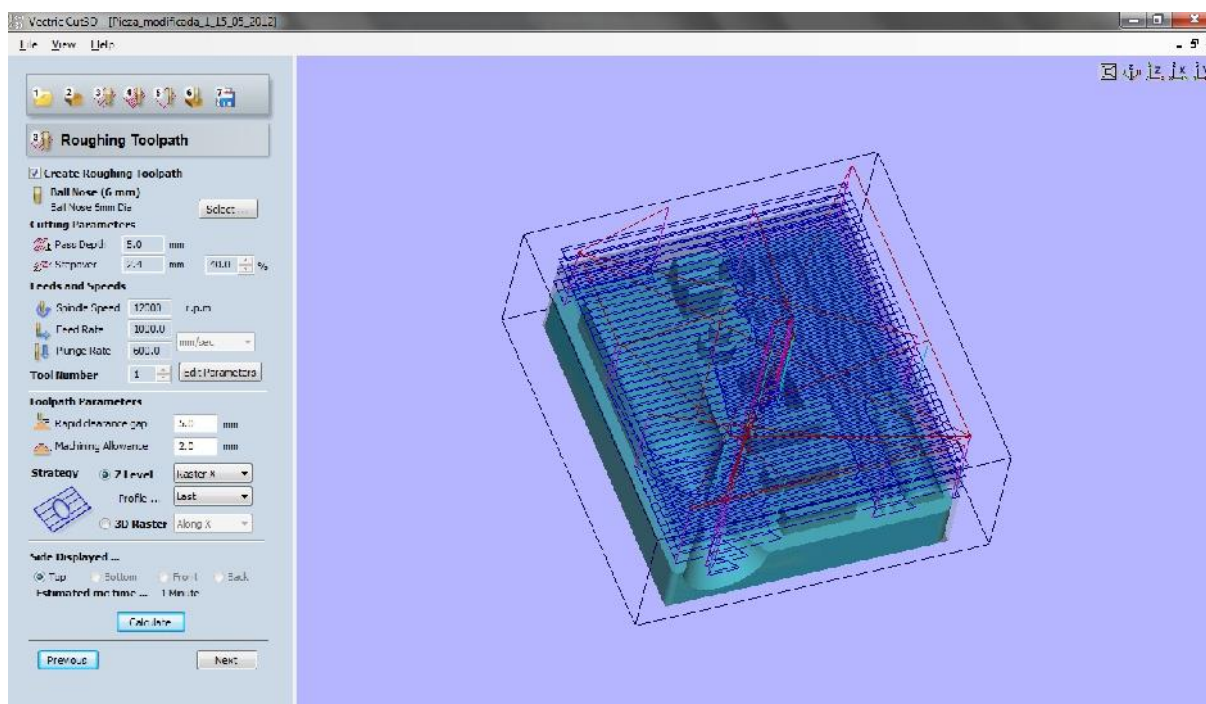


Figura 3.10: Paso 4. Estrategia de desbaste.

- **Cutting Parameters:** atiende a los parámetros de corte, que se asignarán en función de la fresa elegida y el material. Según la información que no proporcionaron en el Departemanto de Producción Aeroespacial de la Universidad de León, establecimos:

Tabla 3.1: Parámetros de corte.

OPERACIÓN	
Profundidad de corte (Pass depth)	5 mm
Paso (Stepover)	2,4 mm



- **Feeds and Speeds:** Ajusta tanto el avance como sus velocidades, que serán:

Tabla 3.2: Ajuste de velocidades de desbaste.

OPERACIÓN	
Velocidad de giro (Spindle Speed)	12 000 rpm
Velocidad de avance (Feed Rate)	1 000 mm/s
Velocidad de mecanizado (Plunge Rate)	600 mm/s

- **Toolpath Parameters:** se refiere a las operaciones auxiliares del desbaste, los parámetros de la trayectoria.

Tabla 3.3: Parámetros de trayectoria.

OPERACIÓN	
Margen de salida (Rapid Clearance Gap)	5 mm
Margen de mecanizado (Machining Allowance)	2 mm

- **Strategy:** la estrategia del desbastado consistirá en el movimiento sobre el eje Z de la pieza, a la vez que hará barridos en el eje X.
5. **Acabado superficial:** esta es la parte en la que se le otorga a la pieza el acabado final, el desbaste de material es mucho menor que en la anterior fase y las velocidades más bajas para no arrancar grandes virutas del material. Los diferentes parámetros que se muestran en la figura 3.11 son:
- **Selección de la herramienta:** la fresa empleada fue la otra disponible en el laboratorio, una de cabeza redonda de 3,2 milímetros.



- **Cutting Parameters:** establecemos un paso mucho menor que en el proceso de desbaste, en este caso 0,24 mm.

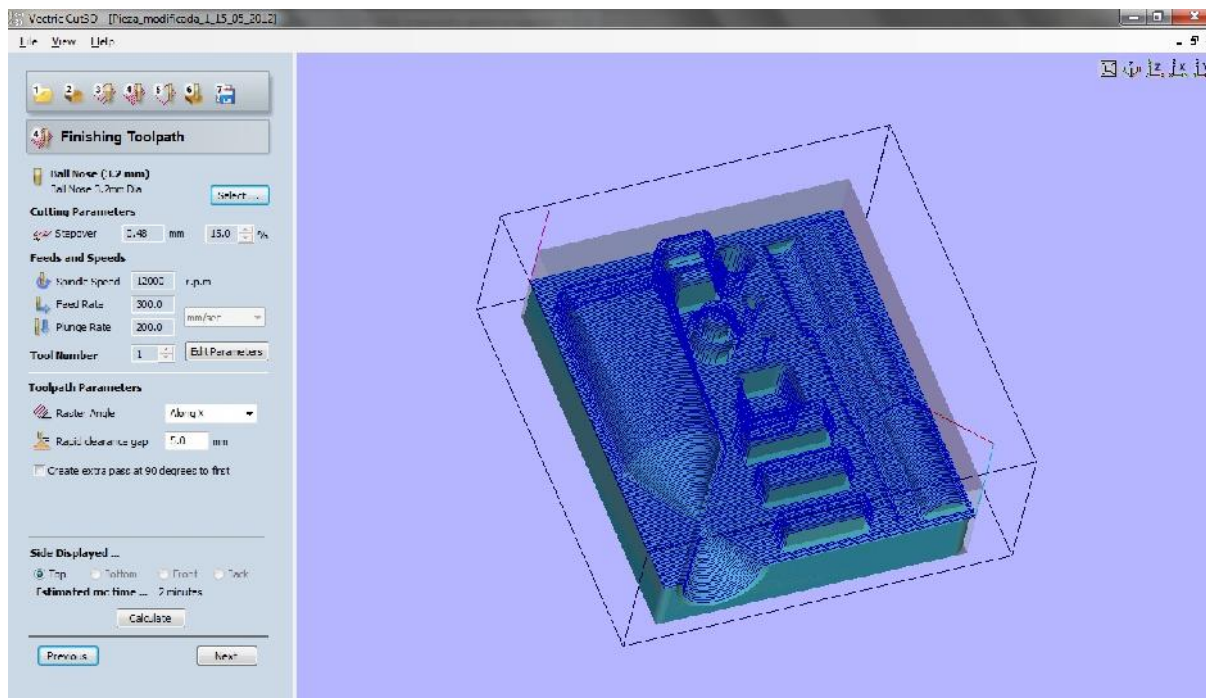


Figura 3.11: Paso 5. Acabado superficial.

- **Feeds and Speeds:** disminuimos considerablemente las diferentes velocidades.

Tabla 3.4: Ajuste de velocidades de acabado.

OPERACIÓN	
Velocidad de giro (Spindle Speed)	12 000 rpm
Velocidad de avance (Feed Rate)	300 mm/s
Velocidad de mecanizado (Plunge Rate)	200 mm/s

- **Toolpath parameters:** en este caso, las cifras son las mismas que seleccionamos en la etapa de desbaste.



6. **Estrategia de recorte:** el software calcula automáticamente la trayectoria de herramienta y compensa el radio de corte, y permite las opciones de cortar los puentes (enlaces entre la pieza y el bloque de material en bruto), pasadas en diferentes niveles de Z o sobrecorte a lo largo del eje Z. (Figura 3.12)

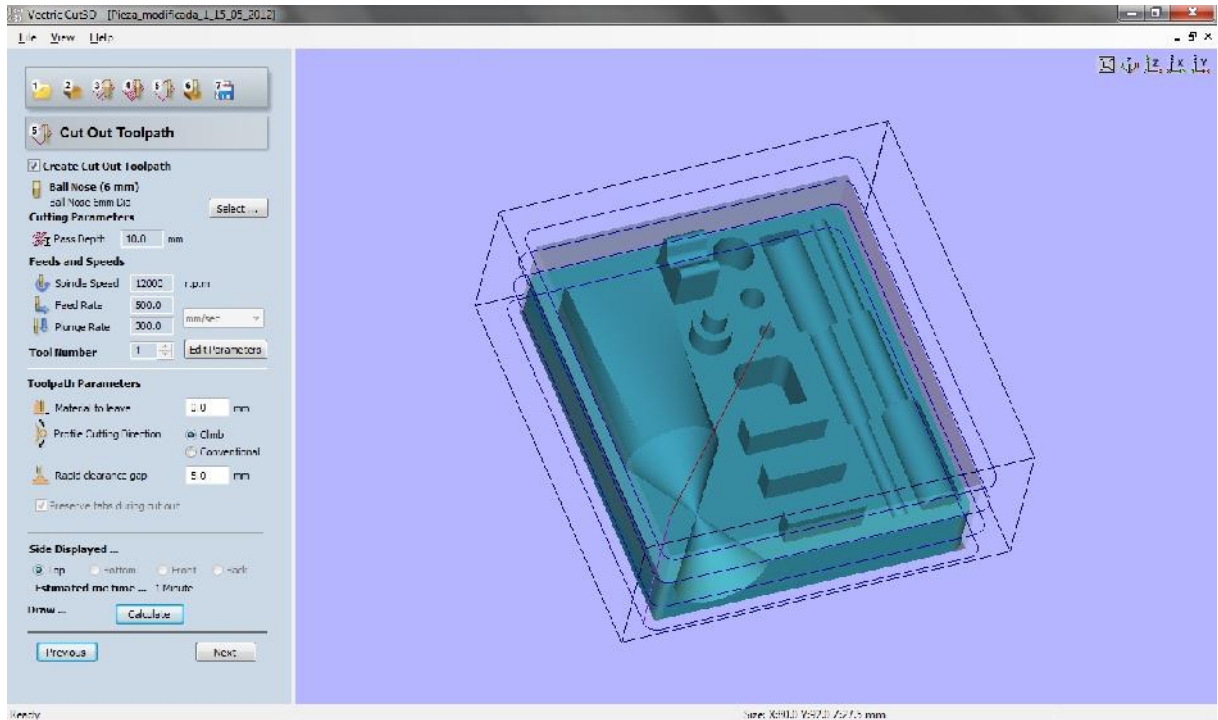


Figura 3.12: Paso 6. Recorte.

- **Selección de la herramienta:** para separar la pieza del resto de material sobrante, emplearemos la fresa de mayor diámetro, la de 6 mm que usamos en el proceso de desbaste. Buscamos con eso desprender gran cantidad de material en poco tiempo.
- **Cutting Parameters:** como queremos ahora recortar todo el borde de la pieza, que tiene una altura de 27 mm, la pasada de profundidad (pass depth) será de 10 mm.
- **Feeds and speeds:** los parámetros mostrados en la tabla 3.5.



Tabla 3.5: Ajuste de velocidades de recorte.

OPERACIÓN	
Velocidad de giro (Spindle Speed)	12 000 rpm
Velocidad de avance (Feed Rate)	500 mm/s
Velocidad de mecanizado (Plunge Rate)	300 mm/s

- **Toolpath parameters:** es importante indicarle al programa en esta parte, que no deje ningún material en esta etapa de recorte, es decir, que abraque la totalidad del material, ya que, en caso contrario, deberíamos luego nosotros hacerlo manualmente, con la pérdida de precisión que ello conlleva. El resto de parámetros, quedarían igual que en las otras etapas.

7. **Simulación de trayectorias:** sirve para que nos hagamos una idea del proceso que seguirá el centro de mecanizado. Disponemos de una simulación para cada etapa definida anteriormente, y nos mostrará en el esquema de la pieza las trayectorias y fases por las que irá pasando la pieza. También podemos seleccionar el material para tener una representación más fidedigna.

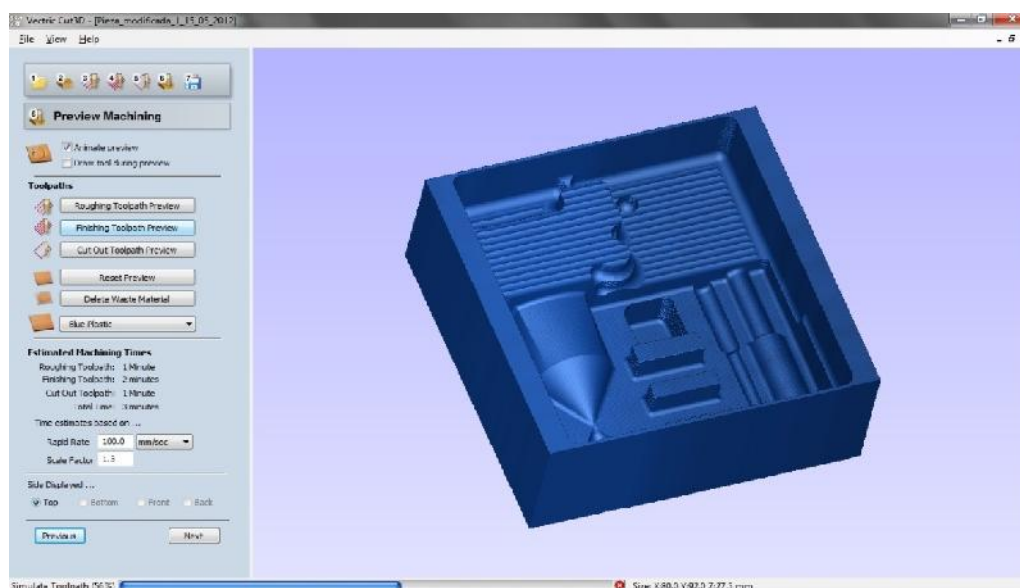


Figura 3.13: Paso 7. Simulación de trayectorias.



- 8. Guardado de las trayectorias y exportación:** las trayectorias pueden ser guardadas para la mayoría de los sistemas CNC. Si la máquina tiene un sistema de cambio automático de herramienta se pueden guardar todas las trayectorias en un sólo archivo. Estos archivos son editables, por lo que es fácil configurar la salida desde el software para satisfacer las necesidades de la máquina en cuestión.

El centro de mecanizado del que disponíamos no permitía el cambio automático de herramienta, por lo que fue necesario generar un archivo por cada etapa:

- Desbaste: *1desbaste.m*
- Acabado: *2acabado.m*
- Corte: *3corte.m*

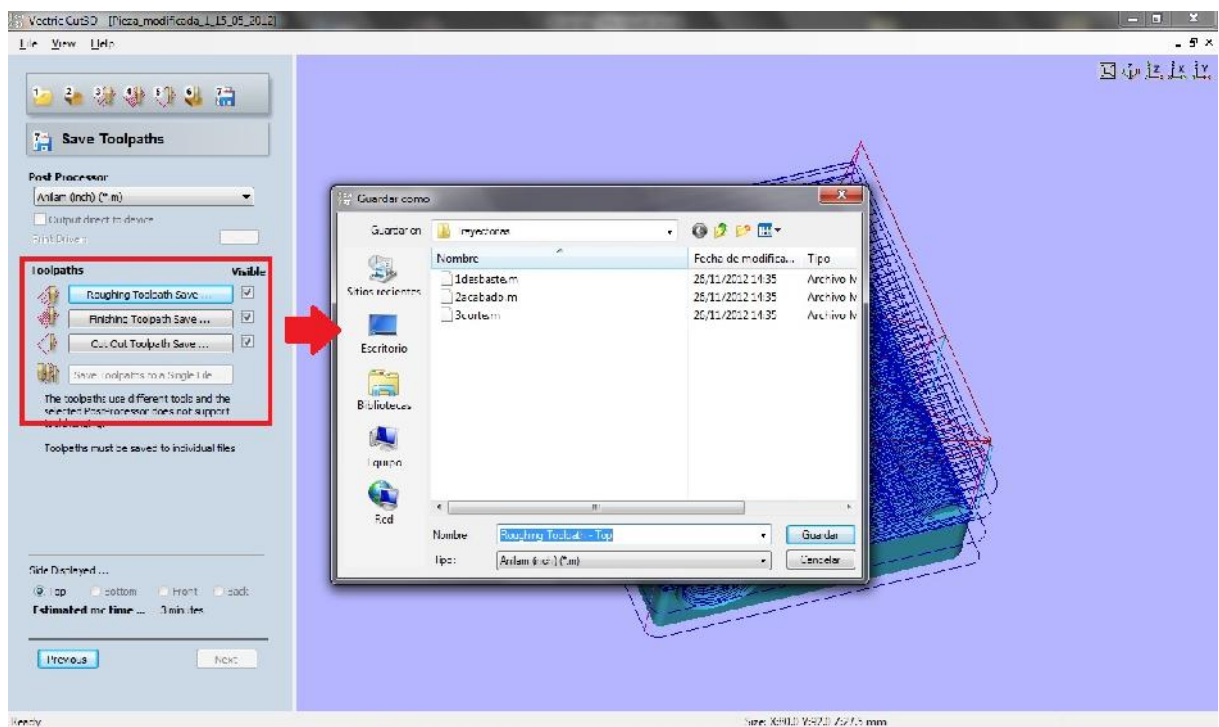


Figura 3.14: Paso 8. Exportación de archivos de trayectoria.

Los archivos se guardaron en un dispositivo de almacenamiento USB, para su posterior volcado al ordenador que controlaba el centro de mecanizado del laboratorio.

3.3 Fabricación de la pieza

Esta es la parte verdaderamente “física” hasta el momento, del proceso realizado. Todo el trabajo anterior consistía en la recreación de un modelo virtual y posteriormente las trayectorias y órdenes necesarias para que la máquina en cuestión nos generase el objeto tangible. A continuación detallo con profundidad el proceso.

3.3.1 Material y herramientas empleadas

- Fresadora de control numérico, **Alarsis FR-180** (Figura 3.15), de la que se detallan sus características técnicas en el ANEXO C.



Figura 3.15: Fresadora Alarsis FR-180 (Alarsis)

- Software de control, **Artsoft Mach2**.
- Poliestireno extruido (XPS) de alta densidad.



3.3.2 Proceso

La fabricación de la pieza fue en el Laboratorio de producción Aeroespacial que la Universidad de León posee en el Campus de Vegazana, concretamente en el edificio destinado al aulario. En el disponen de una fresadora Alarsis FR-180, controlada por un ordenador de sobremesa. Ésta fresadora la emplean los alumnos de ingeniería aeronáutica para la elaboración de maquetas y perfiles aerodinámicos que posteriormente evalúan en el túnel del viento que posee también la escuela.

Se decidió fabricar la pieza necesaria del presente proyecto en poliestireno extruido por dos razones: la primera, por lo económico que resulta todo el proceso y la segunda, por la completa disponibilidad que tuvimos tanto del departamento como del laboratorio a la hora de realizarla.

Una vez que se dispone del diseño del modelo y de las trayectorias generadas con el 3D Cut, el siguiente paso consiste en la elección del trozo de poliestireno que vamos a emplear. La única medida que nos podía condicionar el proceso era el grosor de los paneles, ya que tienen 4 cm, pero en nuestro caso, la pieza no alcanza siquiera los 3 cm, por tanto, dimensionalmente no tendremos problema alguno.



Figura 3.16: Planchas de Poliestireno Extruido, XPS (Modispren)

El poliestireno extruido (XPS) se comercializa en planchas de diferentes medidas, como se aprecia en la figura 3.16. Se trata de una espuma rígida resultante de la extrusión del poliestireno en presencia de un gas espumante. Su uso, principalmente, es el de aislante



térmico. Comparte muchas similitudes con el poliestireno expandido, ya que su composición química es la misma (95% de poliestireno y un 5% de gas). La principal diferencia entre ambos es el proceso de conformación. El extrusionado produce una estructura de burbuja cerrada, permitiendo al XPS ser de los pocos aislantes térmicos que no pierden sus propiedades a pesar de mojarse. Debido a su importante resistencia mecánica, es empleado también para este tipo de trabajos.

Recortamos por tanto una parte de las planchas de las que disponíamos, aproximadamente de 100x100 cm, sobrando de 1 a 2 cm a lo largo de todo el perímetro de la pieza. Marcamos también el centro geométrico de la misma, para luego situar la fresa en él y que se oriente a partir de ahí en todo el proceso. El material se fija al área de trabajo de la fresadora por medio de unas bridas de sujeción de acero para que no se mueva durante el mecanizado (figura 3.17).

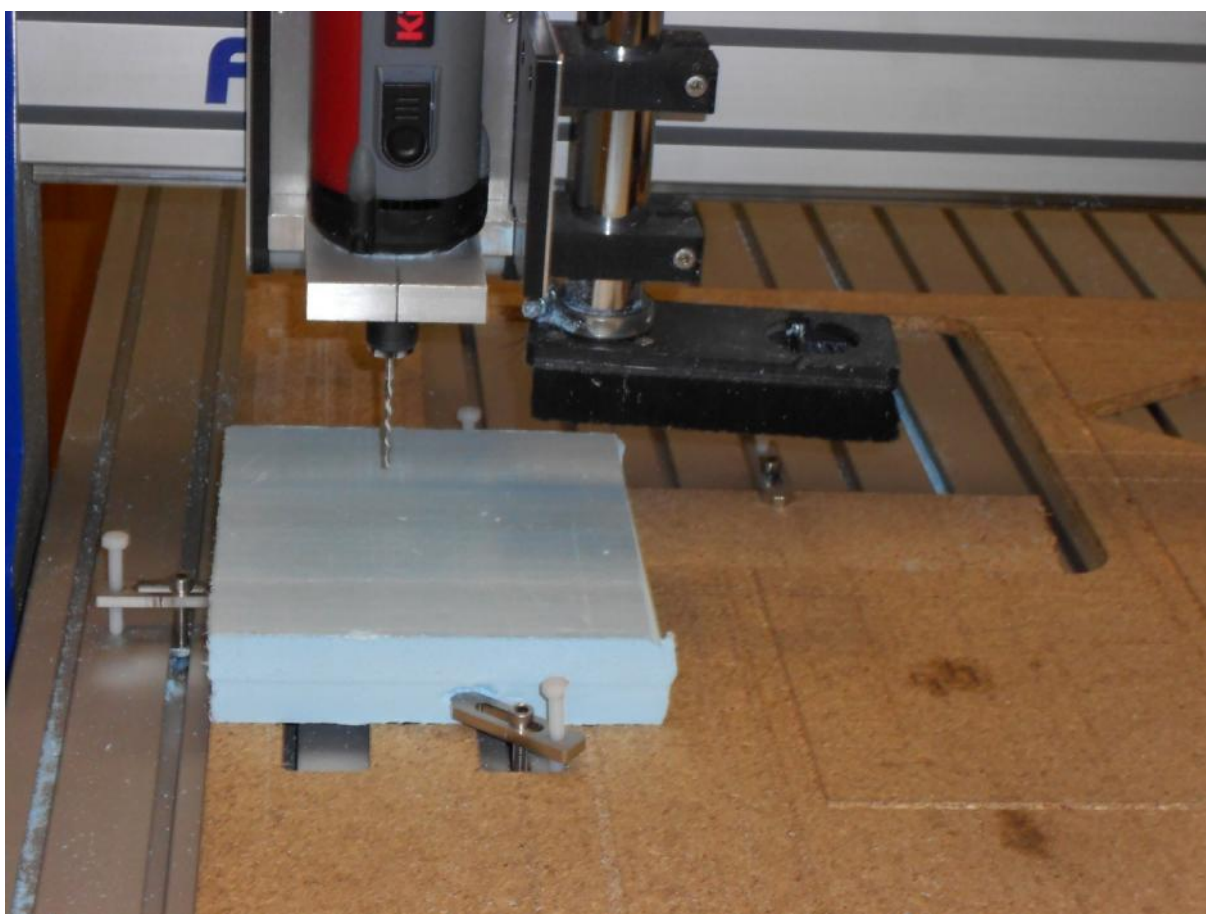


Figura 3.17: Fijación del bloque de material en la bancada de la fresadora.



De seguido, se utiliza un palpador para la puesta a cero del eje Z. La fresa descende hasta que contacta con el palpador, que frena el descenso y establece esa referencia como origen del eje Z y permite la detección automática de altura del material (Figura 3.18).

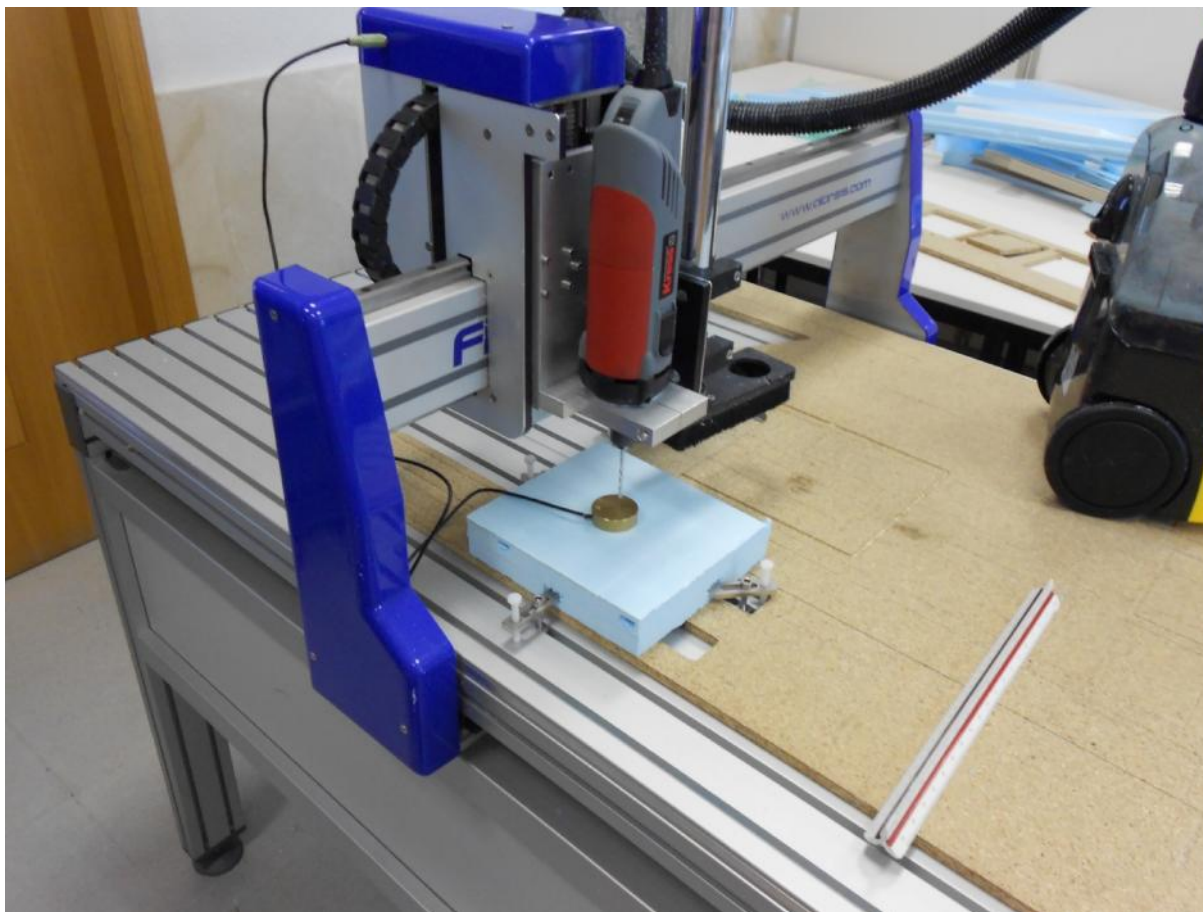


Figura 3.18: Referenciado del eje Z.

Debido a que las brocas disponibles (3.2 y 6 mm) poseen diferentes longitudes, cuando cambiamos de una a otra, es necesario repetir esta operación.

Una vez referenciados los ejes en la máquina, retiramos el palpador e iniciamos el proceso de desbaste de material, con la fresa de 6 mm. Para ello es necesario que carguemos en el ordenador que controla la fresadora la trayectoria generada anteriormente con el 3D Cut, en este caso, “1desbaste.m”. Iniciamos la orden y podemos ver su estado y otros parámetros en la pantalla del ordenador, mediante software de control Artsoft Mach 2 (figura 3.19). En caso de algún problema, podemos interrumpir la orden con el Mach 2 o la seta de emergencia situada en la fresadora.

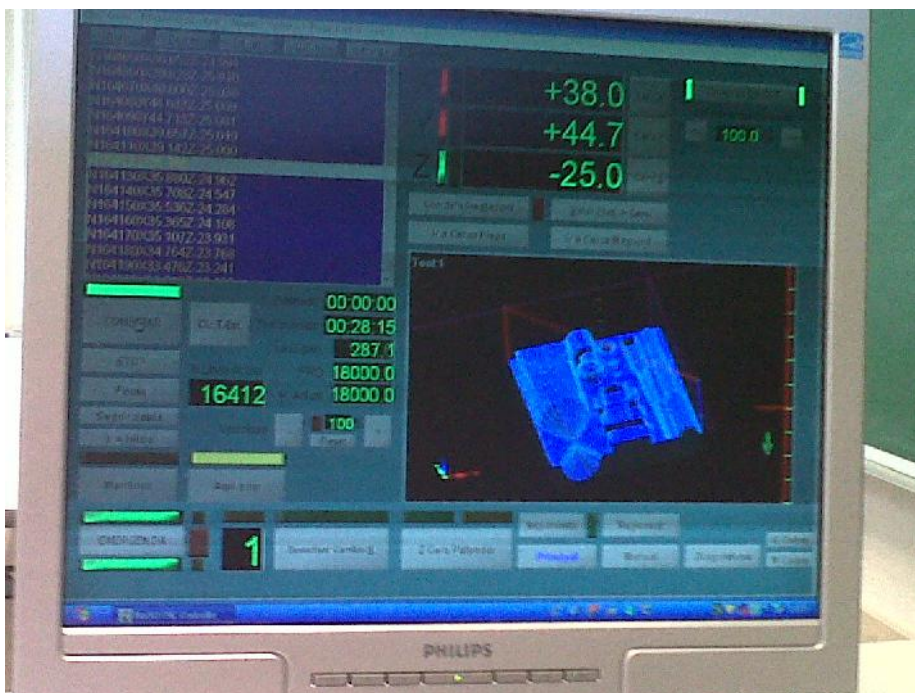


Figura 3.19: Captura del software de control Artsoft Mach 2.

Pasado un tiempo netamente superior a la simulación que anteriormente nos había indicado el 3D Cut y finalizada la etapa de desbaste, el aspecto a esta altura del proceso es el que muestra la figura 3.20.

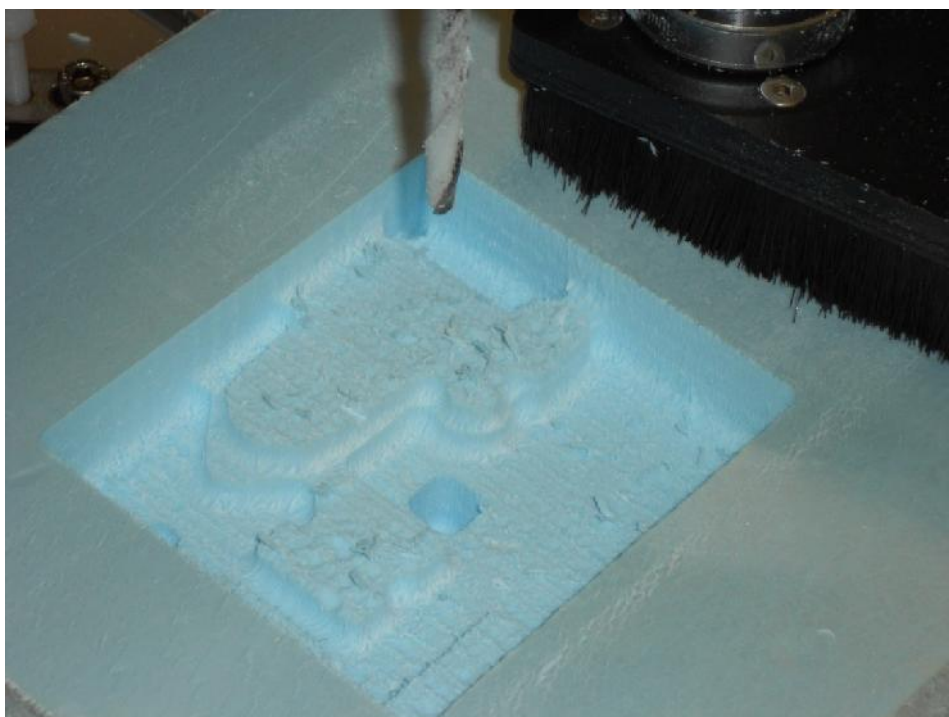


Figura 3.20: Etapa de desbaste.



Como mencionamos anteriormente, esta fresadora no dispone de cambio automático de herramienta, por lo tanto, para pasar a la siguiente etapa, la de acabado, fue necesario sustituir la fresa de 6 mm y cabeza redonda por la de 3.2 mm. Es preciso también, establecer de nuevo la referencia del eje Z. Una vez hecho esto, cargamos el fichero “*2acabado.m*”, que se corresponde a la etapa de acabado superficial. Iniciamos el proceso con el Mach 2 y transcurrido un tiempo otra vez muy superior al indicado en la simulación, el resultado es el de la figura 3.21.



Figura 3.21: Etapa de acabado superficial.

Conviene mencionar, que debido a las características del poliestireno, es necesario conectar un aspirador que recoja todas las diminutas virutas que se forman al cortarlo. Sin él, obstruiría alguno de los componentes de la fresadora.

Como se aprecia en la figura 3.21, la parte a mecanizar se encuentra completamente terminada, sólo falta la tercera y última etapa. El corte y separación del modelo mecanizado



del bloque de material. Para ello, tenemos el archivo de trayectoria “3corte.m”, que será el encargado de esta operación.

El resultado de todo el proceso es la pieza de la figura 3.22.



Figura 3.22: Pieza finalizada.

En la figura 3.22 se puede comprobar que la pieza tiene un acabado bastante pobre y deficiente. Sin embargo fue necesario su maquinado para subsanar los errores en una segunda pieza. Los fallos cometidos atendieron a un defecto en las velocidades de mecanizado, que arrancaba grandes cantidades de material y unido a las pequeñas dimensiones de la pieza, hacen imposible una precisión aceptable en la misma.

En un segundo intento, se corrigieron los valores de las velocidades, de profundidades de pasada y cambiamos el poliestireno por uno de un índice mayor de densidad. Las figuras 3.23 y 3.24 corresponden al maquinado de la nueva pieza. Tanto las trayectorias como las etapas del mismo son idénticas a la del anterior modelo, con la salvedad de la corrección de las velocidades. Sin embargo, debido a las modificaciones, el mecanizado se alargó hasta tres veces el tiempo empleado en la primera.



Figura 3.23: Mecanizado de la nueva pieza 1.



Figura 3.24: Mecanizado de la nueva pieza 2.



Subsanados los errores y con las características del nuevo poliestireno empleado, la segunda pieza posee una precisión y acabado muy superior a la anterior. En la figura 3.25 se puede observar tal afirmación. Será la que empleemos finalmente en el presente Proyecto Fin de Carrera e intentaremos restituir con las diferentes técnicas fotogramétricas que desarrollaremos en capítulos sucesivos.

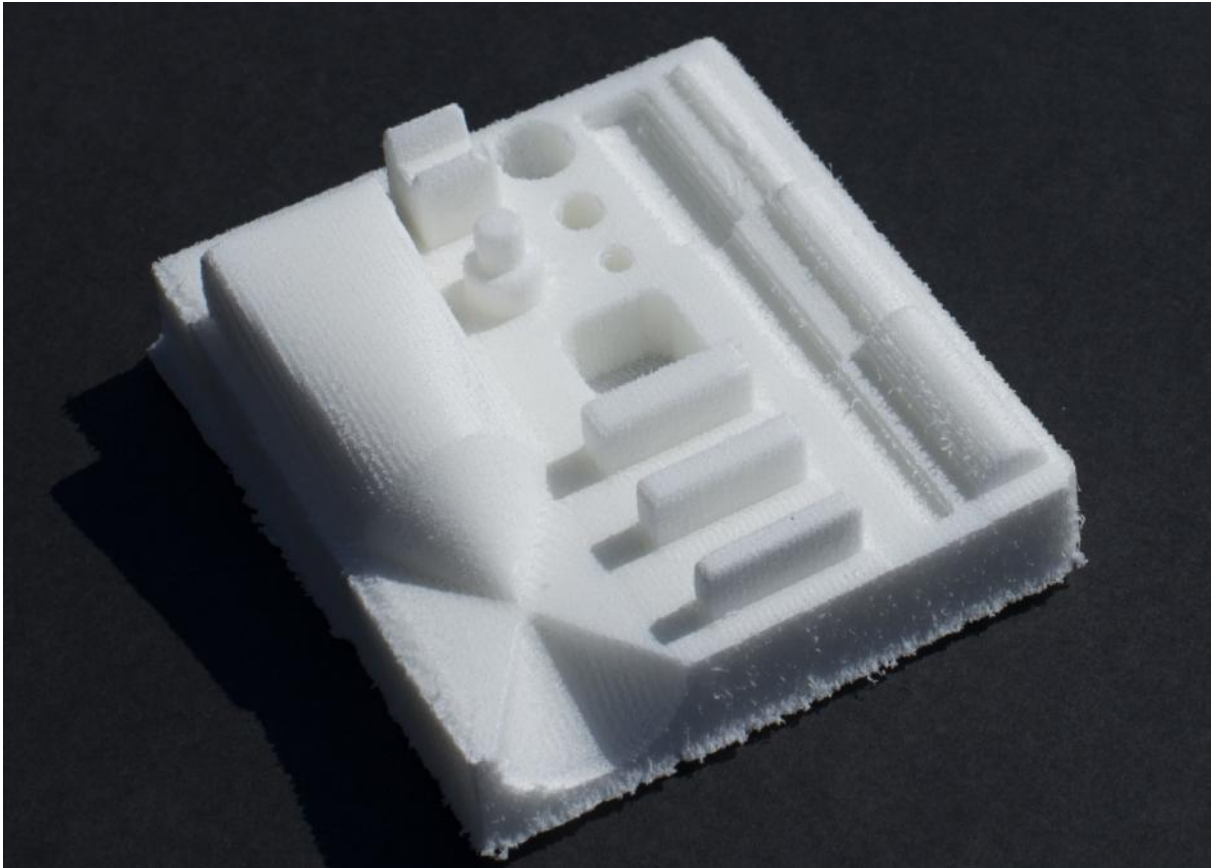


Figura 3.25: Segunda pieza mecanizada.

3.4 Restitución del modelo por medio de Autodesk 123D Catch

Uno de los programas que nos procuran restituciones de modelos en 3D por medio de técnicas fotogramétricas es el 123D Catch, del conocido fabricante de programas Autodesk (AutoCAD, Inventor...). Esta versión es gratuita pero es necesario registrarse en su página web (<http://www.123dapp.com/catch>) y desde allí descargaremos el ejecutable que contiene el programa. En relación con otros programas similares, en el 123D Catch, subiremos las fotografías a su servidor, que una vez procesadas en la “nube”, nos devolverán el archivo con el modelo restituido. Por tanto, nuestro ordenador no deberá realizar ningún cálculo, se llevan a cabo en el citado servidor, sólo necesitaremos una conexión a internet durante todo el proceso.

3.4.1 Materiales y herramientas empleadas

- Software de restitución Autodesk 123D Catch.
- Ordenador portátil Compaq Presario CQ50 (Procesador Intel Celeron 2.0Ghz).
- Ratón Trusth óptico.
- Pieza fabricada anteriormente.
- Cámara réflex digital de objetivo único, Nikon D800E (Especificaciones ANEXO B).



Figura 3.26: Nikon D800E (Nikon)

- Objetivo Nikon 35mm (Especificaciones ANEXO B).
- Trípode Gitzo GT 3540 Carbon 6X (Especificaciones ANEXO B).

3.4.2 Toma de fotografías

De diferente manera a lo que ocurre con otros programas, en el 123D Catch no es necesario calibrar previamente la cámara fotográfica y así solventar el problema de la distorsión de la lente debido a su propia construcción (esférica). Cuando analice el proceso con Photomodeler, ahondaré con mayor profundidad este tema. En este caso, como indico, no es precisa tal calibración, por lo tanto el proceso es mucho más sencillo.

Si debemos considerar un par de apuntes que Autodesk recomienda y que, llevándolos a cabo, mejorará la calidad de nuestro trabajo. Por un lado conviene que la iluminación cree un contraste lo suficientemente alto como para distinguir el objeto a restituir del entorno que posteriormente desechamos. No hay límite de fotografías a realizar, cuantas más tengamos, más preciso será nuestro modelo (conlleva mayor tiempo de subida de las mismas).

La mejor opción consiste en situar el objeto en un pedestal o mesa pequeña y con nuestra cámara acoplada a un trípode, nos moveremos en círculo alrededor de la pieza, haciendo fotos en tantas posiciones de esa circunferencia como estimemos oportuno, manteniendo la altura de la cámara siempre constante. Una vez hechas estas fotografías, realizamos el mismo proceso subiendo o bajando el trípode y repetiremos la serie. Podremos hacer esto tantas veces como creamos oportuno y la paciencia nos permita, ya que si la cámara posee una gran resolución (como es este caso) y la conexión a internet no es muy rápida, el volcado de las imágenes a la nube puede hacerse eterno.



Figura 3.27: Inicio de la toma de fotografías.



En este Proyecto seguimos tales indicaciones. Una vez ajustados los parámetros de la cámara y la elección de un objetivo Nikon de 35mm de distancia focal, situamos la pieza sobre un pedestal con fondo negro para que el contraste fuera máximo (figura 3.27). Ajustamos la cámara y el trípode para una altura en la que podamos enfocar de manera nítida la pieza. Posteriormente, marcamos en el suelo el inicio de nuestra circunferencia guía ficticia y comenzamos a tirar fotografías. Una vez hayamos llegado al punto de partida, repetimos el proceso con una altura diferente, aleatoria. Para finalizar, realizamos otras fotografías en diferentes puntos y alturas. En la figura 3.28 se observan las diferentes tomas realizadas:

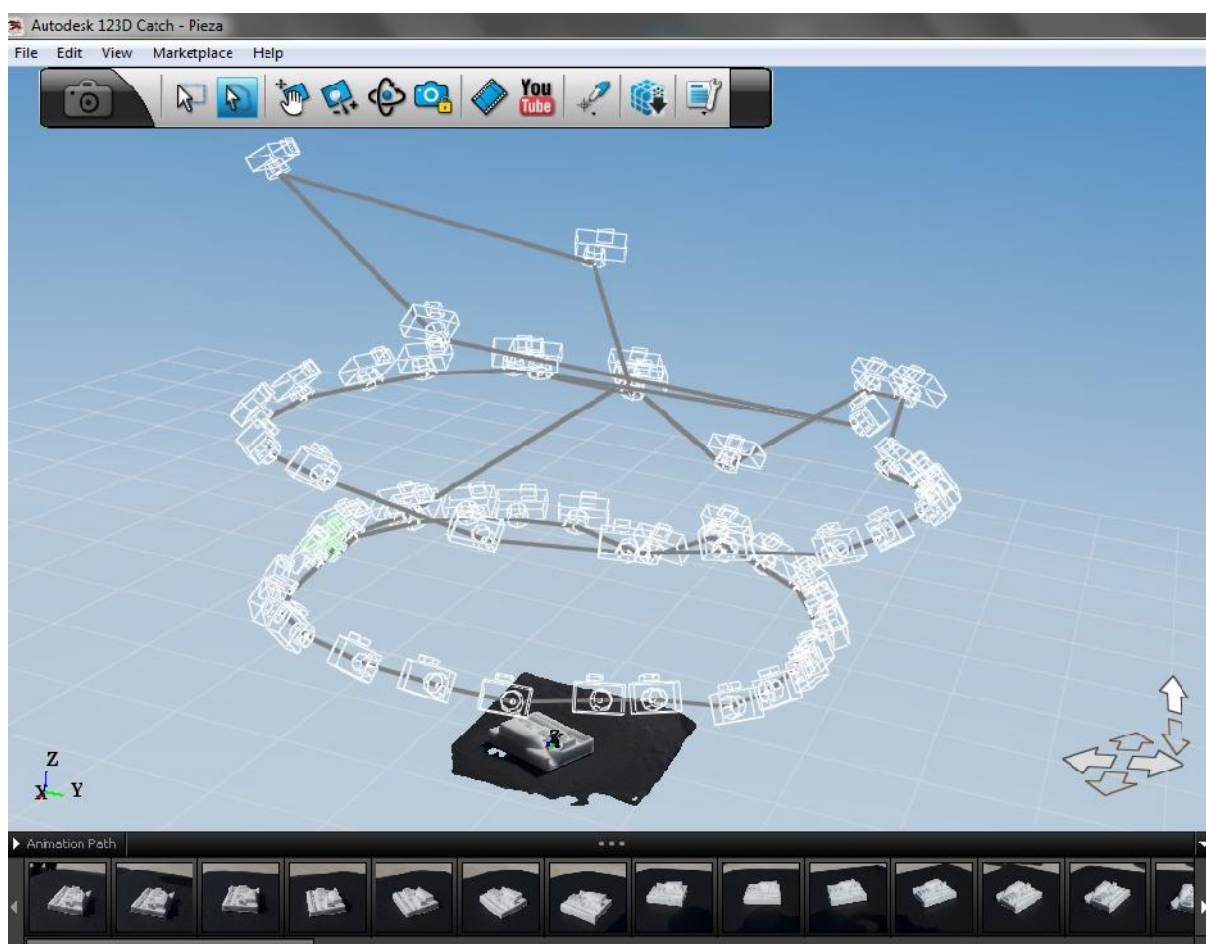


Figura 3.28: Esquema representación posiciones de la cámara

Una vez hecho esto, pasaremos a la siguiente etapa, que consistirá en el procesado y tratamiento de las imágenes.



3.4.3 Procesado

Previamente al tratamiento de las fotografías en el Autodesk 123D Catch y debido a la naturaleza de la cámara digital empleada, es preciso en nuestro caso, convertir las fotos del formato RAW a JPG o TIFF.

El RAW es un formato de archivo digital de imágenes que contiene la totalidad de los datos de la imagen tal y como ha sido captada por el sensor digital de la cámara fotográfica. Debido a este dato, sus ficheros tienen un tamaño de archivo generalmente muy grande, a pesar de que suelen usar compresión. Se podría comparar a los “negativos” de las antiguas cámaras fotográficas. Por tanto, es preciso procesarlas previamente con un software de modificación de imágenes, cómo puede ser el Adobe Photoshop en cualquiera de sus versiones.

Con el Photoshop, podemos modificar los parámetros que consideremos oportunos para mejorar la nitidez de las imágenes, siempre y cuando apliquemos los mismos cambios a todas las imágenes por igual. En caso contrario, 123D Catch las interpretará erróneamente. Una vez hecho esto, cambiamos la compresión de las imágenes a un formato que nos permita trabajar con mayor fluidez, es decir, las convertiremos de RAW a JPG de alta calidad. A modo de apunte y en nuestro caso concreto, una imagen proporcionada por la Nikon D800E en formato RAW pesa sobre 70 y 100Mb. Esa misma imagen en formato JPG de alta calidad, no supera los 14Mb, por tanto, este sistema nos agilizará el proceso de volcado de nuestras fotografías en el servidor de Autodesk.

Una vez realizado este fácil pero importante paso, procedemos a la ejecución del Autodesk 123D Catch. Una vez iniciado el programa, seleccionamos la opción *Create a New Capture* (como se aprecia en la figura 3.29), seguidamente saltará una ventana emergente en la que introduciremos los datos con los cuales nos hemos registrado anteriormente. Aceptados nuestros datos, otra ventana emergente nos guiará para que seleccionemos las fotografías de nuestra carpeta correspondiente. Será beneficioso para el resultado final, escoger las mejor capturadas aunque una gran cantidad de ellas también ayuda.



Figura 3.29: Creación de un trabajo nuevo.

El siguiente paso es crear el proyecto como tal, es decir, comenzar a subir las fotos al servidor que luego nos devolverá el archivo con el modelado en 3D según las capturas que hemos hecho. Para ello nos muestra otra ventana (figura 3.30) para que le indiquemos el nombre de la captura, la dirección de correo electrónico, las etiquetas y la categoría de la creación así como una pequeña descripción.

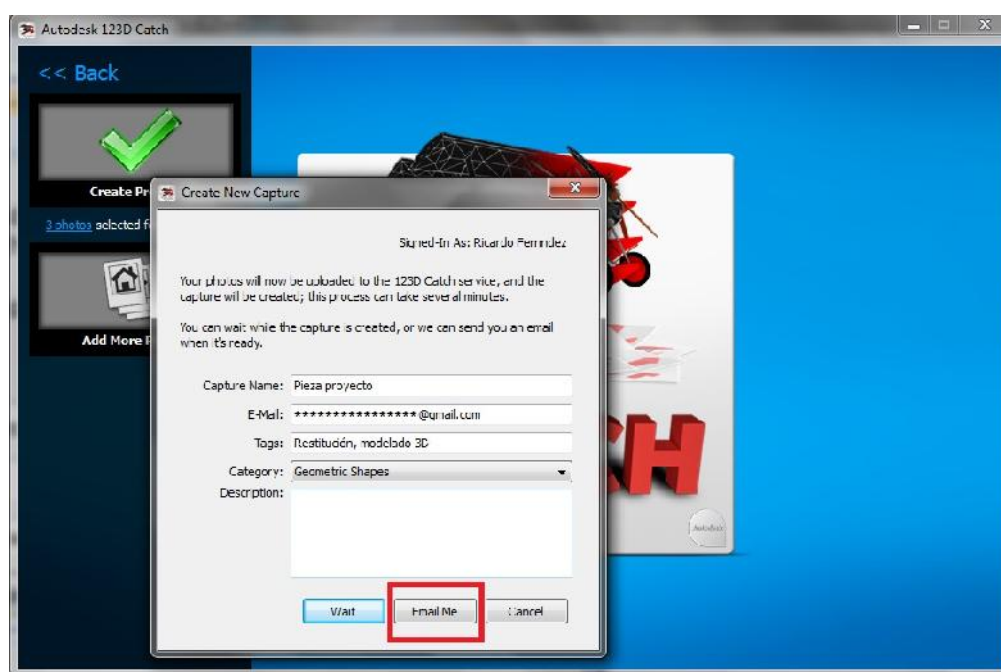


Figura 3.30: Descripción del proyecto



Hecho esto, el programa nos propone para cerrar la ventana tres opciones con respecto a qué hacer mientras procesa las imágenes. O bien esperamos con el programa abierto, *Wait*; seleccionamos que nos envíen un correo con la captura preparada, *Email me*; o cancelamos el proceso para agregar más imágenes, *Cancel*. Marcamos la opción de *Email me* y en menos de una hora recibimos el archivo (en este caso, *pieza_proyecto.3dp*) después de haber procesado un total de 54 fotografías. Ejecutamos el archivo con el 123D Catch y nos genera el modelo restituido en 3D como muestra la figura 3.31:

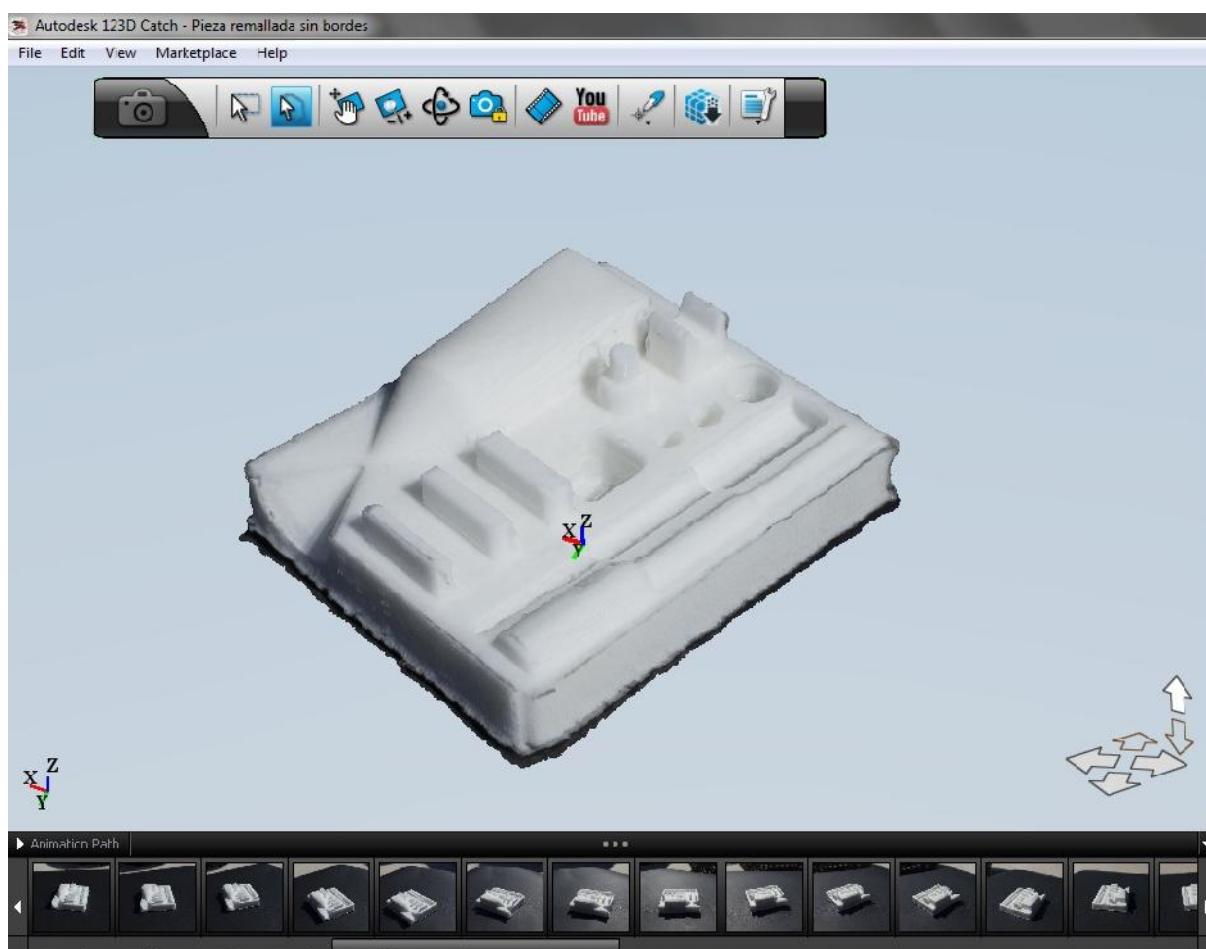


Figura 3.31: Modelo restituido

Como en el presente Trabajo Fin de Carrera estudiamos la validez de éstas técnicas para poder elaborar modelos de cierta precisión y posteriormente obtener unos planos de manera casi directa, se hace necesario que aumentemos la calidad del mallado que realiza de manera predeterminada el programa.



El programa en su algoritmo, busca puntos comunes entre las diferentes fotografías del proyecto y una vez que ha realizado este proceso, computa la información y crea una malla de triángulos de diferentes tamaños, cuyos nodos o vértices provienen de los datos anteriormente procesados, que origina la completa forma y geometría del objeto fotografiado.

En una primera instancia y para que el proceso sea mucho más ágil, el programa de manera determinada genera una malla de baja calidad o grosera, para así disminuir el tiempo de procesado. Sin embargo, por las razones que citamos, en nuestro caso es necesario afinar el mallado, haciéndolo mucho más denso, para que las aristas de las partes que presenta nuestra pieza no presenten importantes rebabas que nos deterioren la precisión dimensional.

Para ello, seleccionamos en la barra de herramientas la opción *Generate Mesh*, como se puede apreciar en la figura 3.32 y escogemos la de mayor calidad, *Maximum*. El programa volverá a realizar todos los cálculos para satisfacer este cambio, con un tiempo de ejecución sensiblemente mayor al mallado por defecto. Una vez terminado, recibiremos un mail con el nuevo archivo que abrimos de la misma manera que el caso anterior.

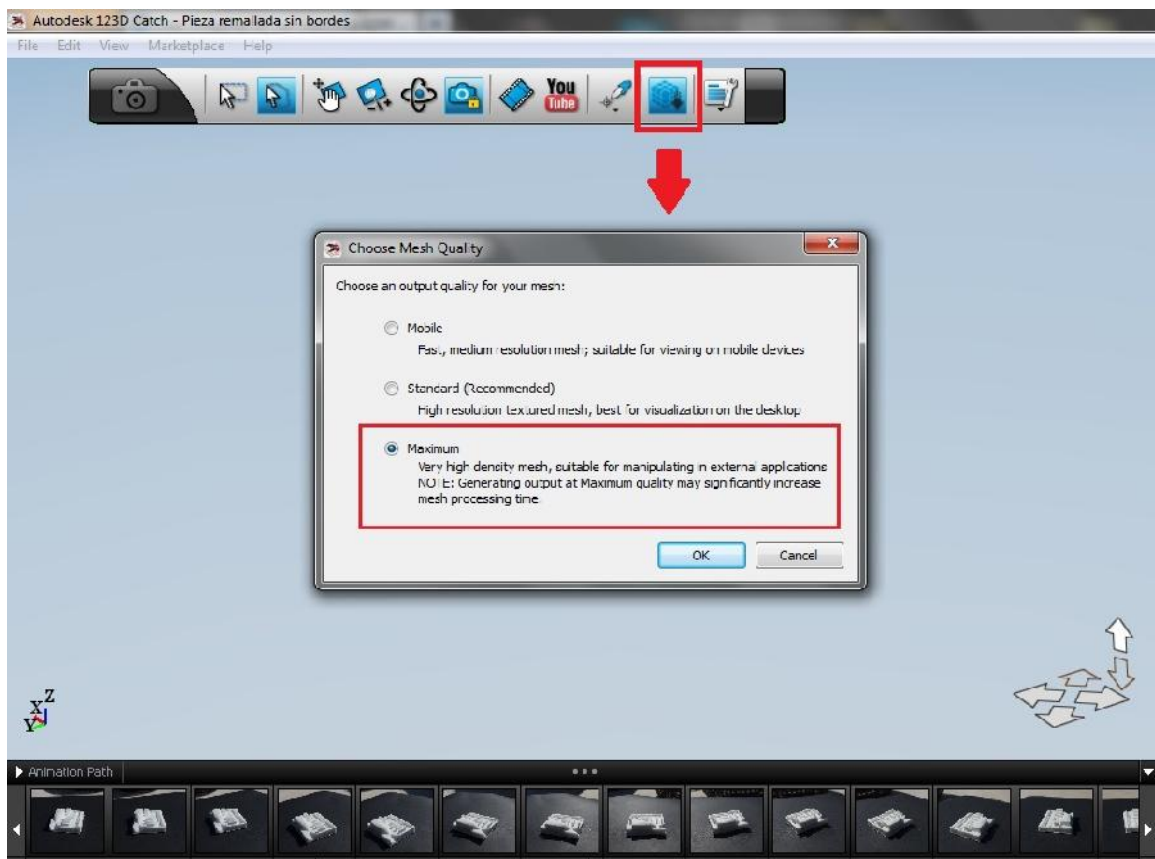


Figura 3.32: Selección de mallado.



Eliminamos manualmente cualquier parte de la malla que consideramos que no nos será útil. En este caso concreto fue preciso suprimir parte del pedestal sobre el que apoyamos la pieza y que el programa había restituido, ya que para nuestro estudio era innecesario.

Para que luego podamos usar la pieza y medir sobre ella, es preciso escalar el modelo. Para ello debemos conocer al menos una medida del objeto que hemos fotografiado. Como nota y para que sirva de ayuda para próximos trabajos, conviene colocar sobre un papel, dos puntos que generen buen contraste, como puede ser el negro, a una distancia determinada y conocida. Nos será muy útil a la hora de escalar el modelo, ya que es mucho más fácil y preciso marcar esos puntos para la referencia que cualquier otra medida en la pieza restituida.

Seleccionamos una fotografía en la que la recta que une los puntos que vamos a referenciar esté lo más perpendicular posible a la cámara. Una vez escogida, marcamos con la herramienta *Create Reference Point* los dos puntos citados anteriormente, en nuestro caso, dos vértices de uno de los paralelepípedos que posee la pieza (figura 3.33).

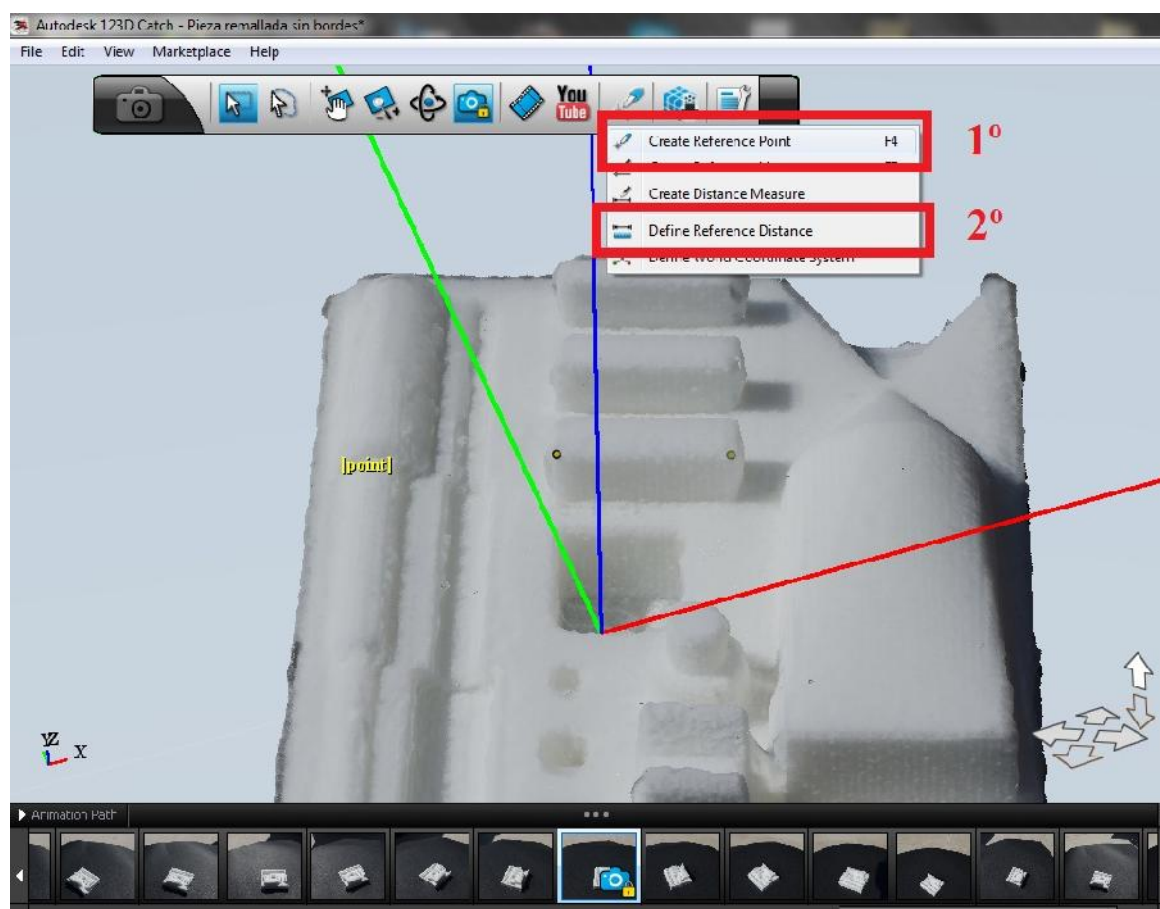


Figura 3.33: Referenciado de puntos.



Posteriormente definimos la distancia que separa esos puntos con la opción *Define Reference Distance*. Ahora nuestro modelo se rescaldará conforme a esta medida y su exactitud estará condicionada tanto por los cálculos del programa como por nuestra capacidad de marcar correctamente tal distancia (figura 3.34).

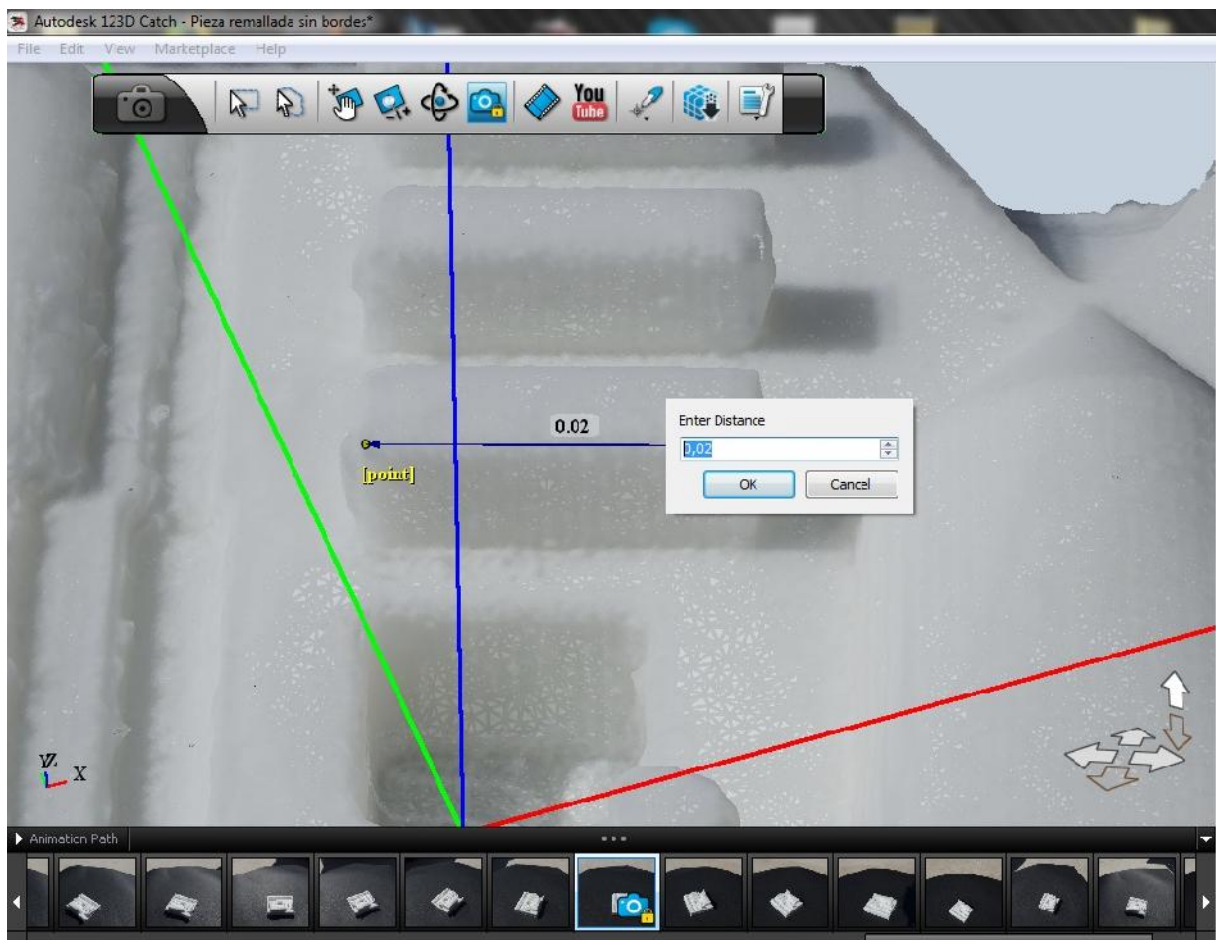


Figura 3.34: Designación de distancia de referencia.

El siguiente y último paso consiste en exportar la pieza a otro formato para que podamos usarlo en un programa de CAD y poder medir sobre él. Para ello, escogemos la opción DWG, que podremos editar con programas como el AutoCAD y así poder analizar la precisión obtenida contrastada con las dimensiones de la pieza original.



3.4.4 Resultados

El Autodesk 123D Catch nos ha generado una malla que posee 208 828 vértices y 416 098 facetas o polígonos (triángulos) de diferentes tamaños que generan por completo la pieza de estudio. En el capítulo 4, de Resultados, se muestran las mediciones obtenidas y se comparan con las generadas por el Photomodeler Scanner.



3.5 Restitución del modelo por medio de Photomodeler Scanner

Photomodeler Scanner es el otro programa de estudio y evaluación en el presente Proyecto Fin de Carrera. El PhotoModeler es un software de medición y modelado 3D basado en técnicas fotogramétricas, con aplicaciones en múltiples sectores industriales como la arqueología, antropología, arquitectura, cine, medicina forense o ingeniería mecánica. A partir de fotografías, PhotoModeler convierte imágenes planas 2D en geometrías de alta precisión en 3D.

La precisión, entre otros factores, viene determinada por la cámara fotográfica utilizada. A mayor resolución, mayor precisión. Una precisión habitual puede ser de 1:5000, es decir, para una fachada de 8 m, el error estimado de medición es de 1.6 mm (8000/5000).

La principal diferencia con el resto de la competencia, como programas con ImageModeler, ImageMaster o Autodesk 123D Catch es la alta precisión obtenida con una cámara fotográfica no profesional.

3.5.1 Materiales y herramientas utilizados

- Software de restitución PhotoModeler Scanner (Eos Systems Inc).
- Cámara fotográfica Nikon D800E (Especificaciones en ANEXO B).
- Cámara fotográfica Nikon P7100 (Especificaciones en ANEXO B).
- Objetivo Nikon 35mm (Especificaciones ANEXO B).
- Trípode Gitzo GT 3540 Carbon 6X.
- Ordenador portátil Compaq Presario CQ50 (Procesador Intel Celeron 2.0Ghz).
- Ratón Trusth óptico.
- Flash Nikon SB-910.
- Flash Nikon SB-800.
- Ventanas para Flash (2).
- Controlador de Flash Nikon SU-800.
- Fotómetro Sekonic L-308S.
- Pedestal reglado con ángulos de giro.



- Imedio Patafix (masilla adhesiva).
- Pieza test fabricada anteriormente.

3.5.2 Calibración de la cámara fotográfica

Aunque no se trata de un paso imprescindible a la hora de trabajar con el Photomodeler Scanner, si es muy aconsejable, al menos en su primera toma de contacto, realizar la calibración de la cámara por el método que el mismo programa nos propone.

La calibración es el proceso previo para la restitución de un objeto por técnicas fotogramétricas de un objeto en el espacio. El dispositivo captador de ésta técnica, como ya sabemos, consiste en una cámara fotográfica de una calidad determinada. Las cámaras que podemos emplear atienden principalmente a dos categorías:

- Cámara analógica: implica unos pasos adicionales en la técnica fotogramétrica que suponen la introducción de errores adicionales en toda la cadena de medición. En primer lugar es necesario el escaneado de los negativos (primera fuente de error), la introducción de marcas fiduciales que marquen el negativo (segunda fuente de error), necesitando además, un mayor dominio de la toma de fotografías, ante la imposibilidad de ver los resultados de nuestras tomas en el momento de realizarlas.
- Cámara digital: nos permite eliminar de principio esos errores iniciales que la analógica nos condiciona por el propio procedimiento. Los captadores, el equivalente al rollo de negativo de una imagen analógica, pueden ser de varios tipos, variando en su diseño y el tratamiento de la señal luminosa, siendo los más comunes o de más amplia difusión los CCD y los CMOS. La calidad de una cámara digital depende principalmente de dos factores, el captador o sensor y la óptica.

Por tanto, debido a sus considerables ventajas y a lo extendidas que se encuentran, a día de hoy el empleo de cámaras digitales se considera casi imprescindible. En necesario recordar que una mayor resolución del sensor (mayor número de píxeles) nos podrá mostrar un mayor



grado de detalle en las fotografías aunque la construcción específica de la cámara y sus dispositivos internos pueden hacer que esa resolución del sensor no sea efectiva.

El modelo de calibración que Photomodeler utiliza trata de corregir los dos tipos de distorsión que la cámara introduce en el proceso de restitución:

1. La distorsión radial producida por la propia lente.
2. La distorsión por descentrado del centro de curvatura de la lente o composición de lentes y el eje del objetivo.

De los dos errores que el método de calibración de Photomodeler trata de corregir, el segundo suele de ser de un orden menor y que en muchos casos su consideración no nos aporta una mejora sustancial en la precisión de los objetos restituidos.

La restitución de un punto de la fotografía de coordenadas (x,y) considerando el punto principal o centro de la imagen como el (0,0), para no introducir traslaciones en las ecuaciones, viene dado por :

$$x_c = x + x \cdot d_r + x \cdot d_p \quad (1)$$

$$y_c = y + y \cdot d_r + y \cdot d_p \quad (2)$$

Donde “ x_c ” e “ y_c ” serían las coordenadas donde debe estar correctamente situado el punto (figura 3.35). El término “ d_r ” corresponde a la distorsión radial de la lente que consideraremos simétrica respecto al punto principal en nuestro modelo. Siendo “ r ” la distancia radial al punto principal de la lente. Los términos “ d_p ” corrigen el efecto de descentrado de la lente. Para los algoritmos con los que trabaja el Photomodeler, el término d_r es:

$$d_r = K1 \cdot r^2 + K2 \cdot r^4 + K3 \cdot r^6 \quad (3)$$

Este término d_r es un polinomio de grado seis que es un diferencial que proviene de la variación de la distancia radial, expresada por Sanjib K. Gosh:

$$\Delta r = k0 \cdot r + k1 \cdot r^3 + k2 \cdot r^5 + k3 \cdot r^7 + \dots \quad (4)$$

Diferenciando (4), renombrando los coeficientes y trasladando a nuestro sistema de referencia, se obtiene (3) eliminando los términos a partir del sexto grado.

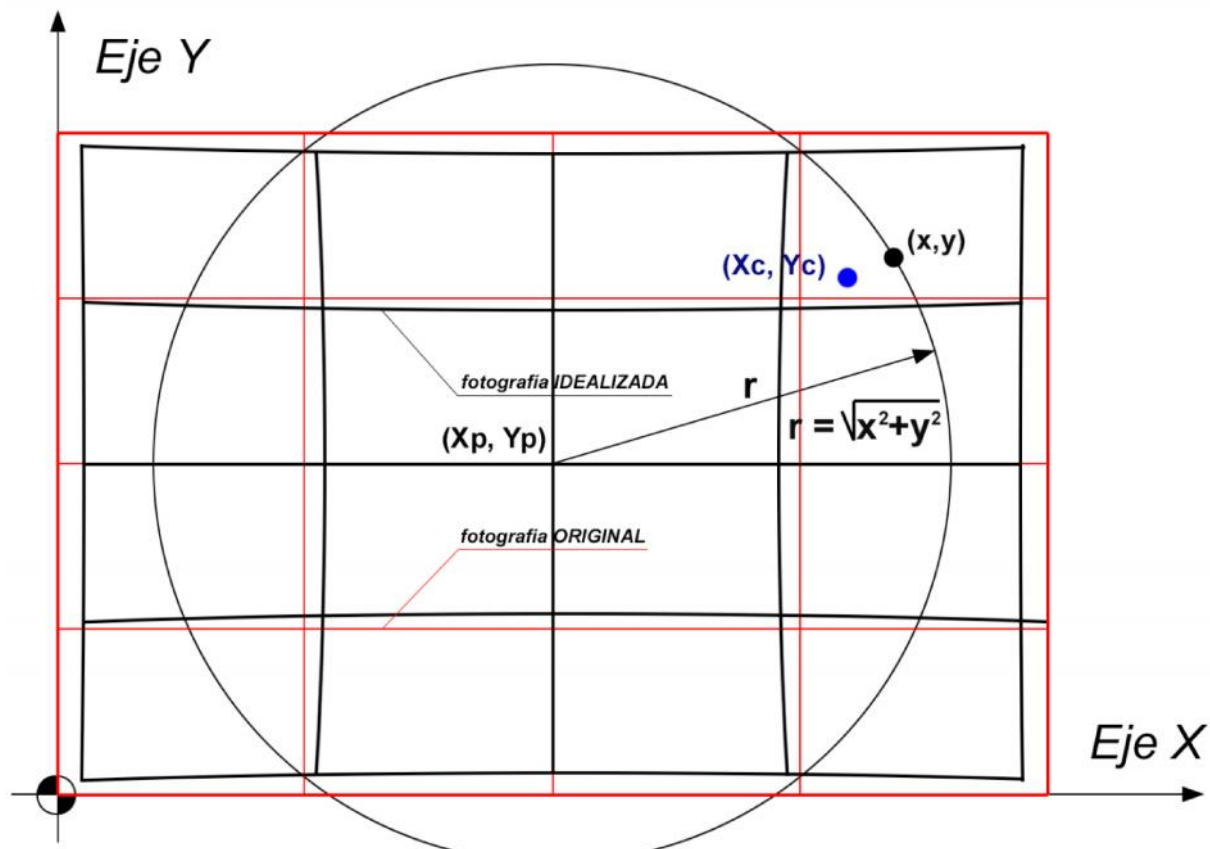


Figura 3.35: Esquema calibración.

Las ecuaciones que corrigen el descentrado de la lente se expresan de la siguiente forma, correspondiendo P_1 y P_2 a la imagen original:

$$x \cdot dp = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \quad (5)$$

$$y \cdot dp = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \quad (6)$$

Por tanto, el punto (x, y) es el pixel obtenido por la cámara y el (x_c, y_c) donde debería situarse si el modelo fuese ideal, por tanto la calibración de la cámara consistirá en darle a las siguientes ecuaciones resultantes los parámetros K_1, K_2, K_3, P_1 y P_2 :

$$x_c = x + x \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) + [P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y] \quad (7)$$



$$y_c = y + y \cdot (K1 \cdot r^2 + K2 \cdot r^4 + K3 \cdot r^6) + [P1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot P2 \cdot x \cdot y] \quad (8)$$

A parte de los parámetros antes indicados de las ecuaciones (7) y (8), el programa también calcula la distancia focal, el tamaño del formato de nuestro CCD en mm y el punto principal o centro imaginario de nuestra fotografía, que si el modelo fuese perfecto debería estar en el centro del formato anterior.

Para ello, detallamos a continuación todo el “trabajo de campo” que hay que realizar para conseguir tal calibración.

En primer lugar, debemos imprimir una plantilla que nos ofrece el programa dentro del directorio de instalación, denominada “*PhotoModelerCalibrationGrid*” en formato PDF y que deberemos imprimir (figura 3.36). Se aconseja que el tamaño de la misma sea en orden a las dimensiones del objeto a restituir. En nuestro caso con hacerlo en una hoja formato A4 será mas que suficiente. En objetos de mayor tamaño o edificios, debemos recurrir a un A2 o A0. El papel de impresión deberá tener un gramaje lo suficientemente alto como para que quede lo mas liso posible después de su impresión, ya que cualquier arruga o doblez introduce un error considerable que acarreamos en el resto del proceso.

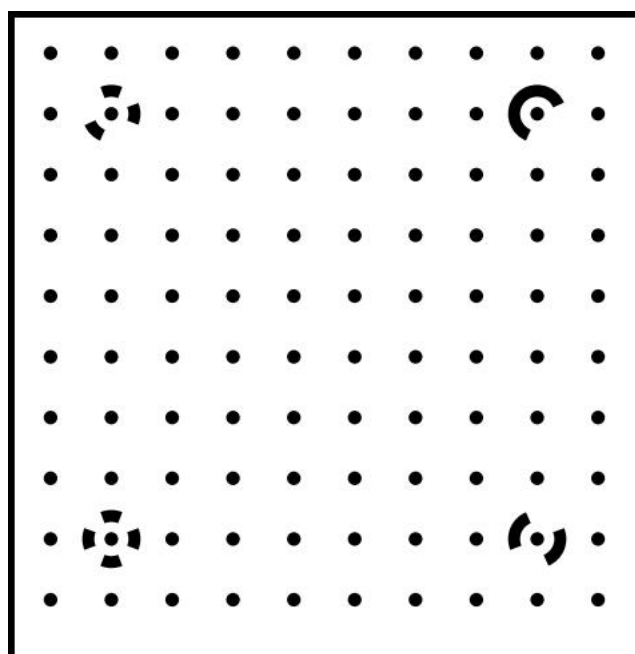


Figura 3.36: Plantilla de calibración.



Esta plantilla (figura 3.36) constituye un patrón de puntos uniformemente repartido, con un tamaño suficiente para que los algoritmos del programa puedan perfilar el contorno de cada uno de ellos y a partir de éste, calcular matemáticamente donde se encuentra su centro (que puede coincidir o no con un pixel de la imagen). Dentro de la plantilla, tenemos cuatro de esos puntos rodeados por un sector circular segmentado. Este se encuentra dispuesto de manera distinta en cada uno de ellos y su fin es identificar de manera inequívoca a cada uno de estos puntos en las distintas fotografías que deberemos tomar. Se podría decir que es algo similar a un código de barras.

Según cita el manual del PhotoModeler, es preciso realizar 12 fotografías a esta plantilla para calibrar un objeto a una distancia focal. En la práctica no son necesarias las 12 pero si aconsejables, ya que tendremos la certeza de que la calibración sea de mayor precisión.

Una vez impresa la plantilla, debemos situarla sobre una superficie plana, lo suficiente iluminada para que se produzca un correcto contraste entre el fondo y los puntos de la misma. Durante la toma de fotografías, la plantilla debe permanecer fija en todo momento, lo que moveremos será la cámara alrededor de ella, haciendo tres tomas por cada lado de la plantilla (una por cada posición de cámara, es decir, horizontal, giro de 90° a la derecha y giro de 90° a la izquierda), intentando generar visuales de intersección que se aproximen a 90°. Estas indicaciones hacen que el uso del trípode sea imprescindible.

Lo comentado en el párrafo anterior son recomendaciones al proceso de fotografiado de la plantilla, sin embargo, otra parte importante es configurar correctamente la cámara fotográfica. Para ello detallo a continuación los cambios en los parámetros necesarios y que se llevaron a cabo en la cámara de este proyecto, la Nikon D800E y el objetivo de 35 mm:

- Desactivamos el enfoque automático de la cámara.
- En caso de que empleemos un objetivo multifocal, por ejemplo de 18-55 mm, lo situaremos en sus posiciones extremas y el enfoque en posición extrema. En nuestro caso, al ser un objetivo fijo, no es necesaria tal actuación.



- Con la cámara situada en el trípode y puesta en modo manual, fijamos en un principio un valor ISO bajo, del orden de 100. Un valor de apertura alto, como puede ser f11 ó f16 y a partir de ahí ajustamos la velocidad de disparo para que la fotografía tenga luz suficiente. Todo esto se puede evaluar en el visor o en el histograma que algunas cámaras pueden mostrar.
- En cámara en las que es posible bloquear el espejo un tiempo antes del disparo, lo haremos siempre en fotogrametría. El estabilizador de imagen también es preciso desactivarlo. El hecho de que siempre emplearemos un trípode hace innecesario su uso.
- Estableceremos a cero todos los ajustes de contraste o colores que nos permita variar la cámara. La misión es obtener una fotografía con los datos más puros que sea posible. El giro automático también habrá que desactivarlo, ya que luego nos creará problemas el PhotoModeler en el momento de orientar las imágenes.
- Utilizaremos la mayor resolución de la cámara y si dispone de formato *RAW*, mucho mejor.

Todas estas recomendaciones sólo se podrán llevar a cabo en las cámaras fotográficas semiprofesionales o profesionales. Las compactas o de uso doméstico nos limitan en mayor medida la manipulación de estos ajustes. Una buena aproximación consistiría en marcar el modo paisaje en el seleccionador de escenas.

Siguiendo estas indicaciones, procedemos por tanto a la toma de fotografías de la plantilla, siendo el resultado el indicado por la figura 3.37.

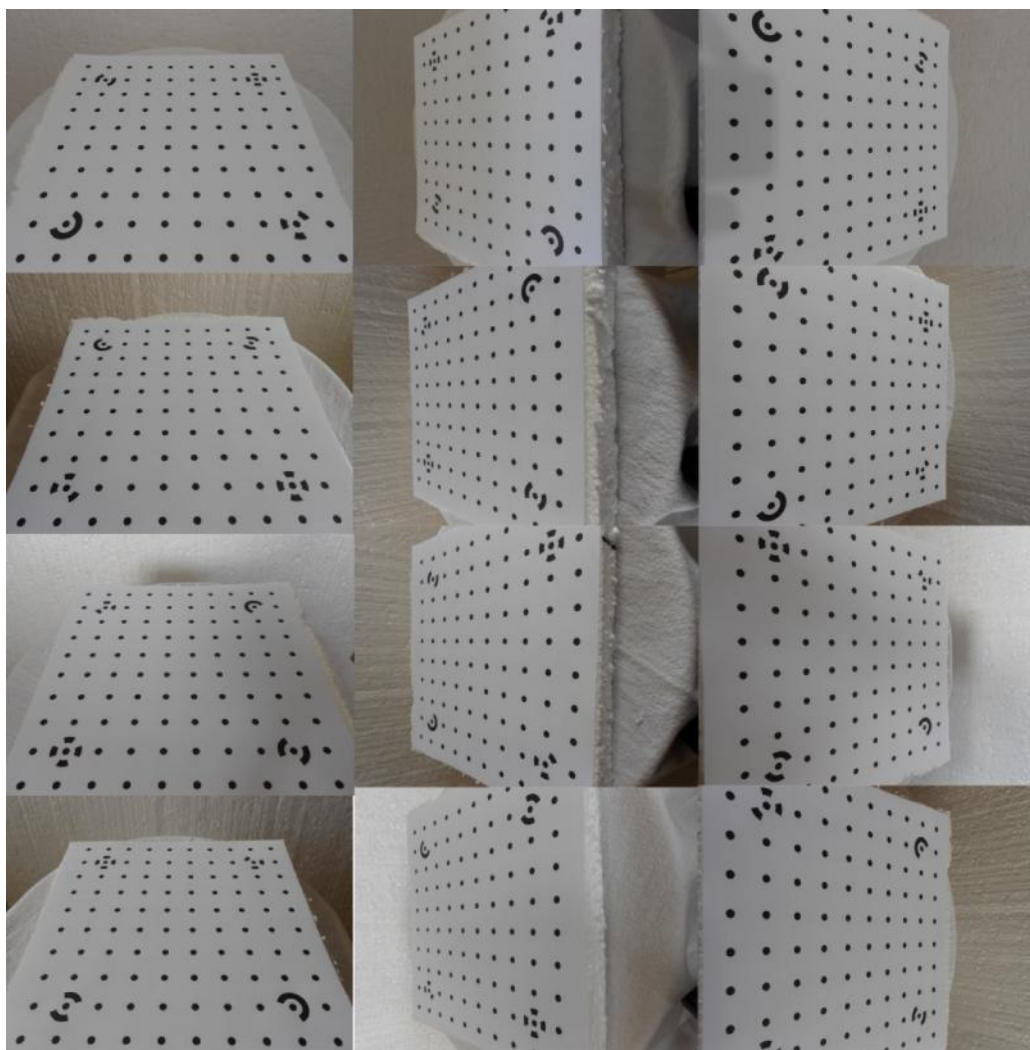


Figura 3.37: Conjunto de las 12 fotografías de calibración.

Esta secuencia de fotografías necesitan que el PhotoModeler las procese para obtener los datos necesarios para la correcta calibración. Para ello ejecutamos el programa y seleccionamos en su pantalla de arranque la opción “*Camera calibration Project*” (figura3.38). De seguido una ventana emergente nos indicará que busquemos el directorio donde se encuentran las imágenes de la plantilla que hemos fotografiado. Cargamos todas las imágenes e iniciamos la calibración.

Como se muestra en la figura 3.39, los algoritmos del PhotoModeler localizan los puntos de la plantilla (96) y los cuatro de control. Estos últimos requieren especial importancia ya que son los que el programa otorga mayor peso en la orientación al ser dianas codificadas. No es preciso que salgan todos los puntos normales de la plantilla, ni que los reconozca todos el



INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS. ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS



programa, sin embargo, los cuatro codificados deben de aparecer correctamente en todas las imágenes para que el PhotoModeler pueda orientarse y calcular de manera precisa los parámetros de la cámara que estamos calibrando.

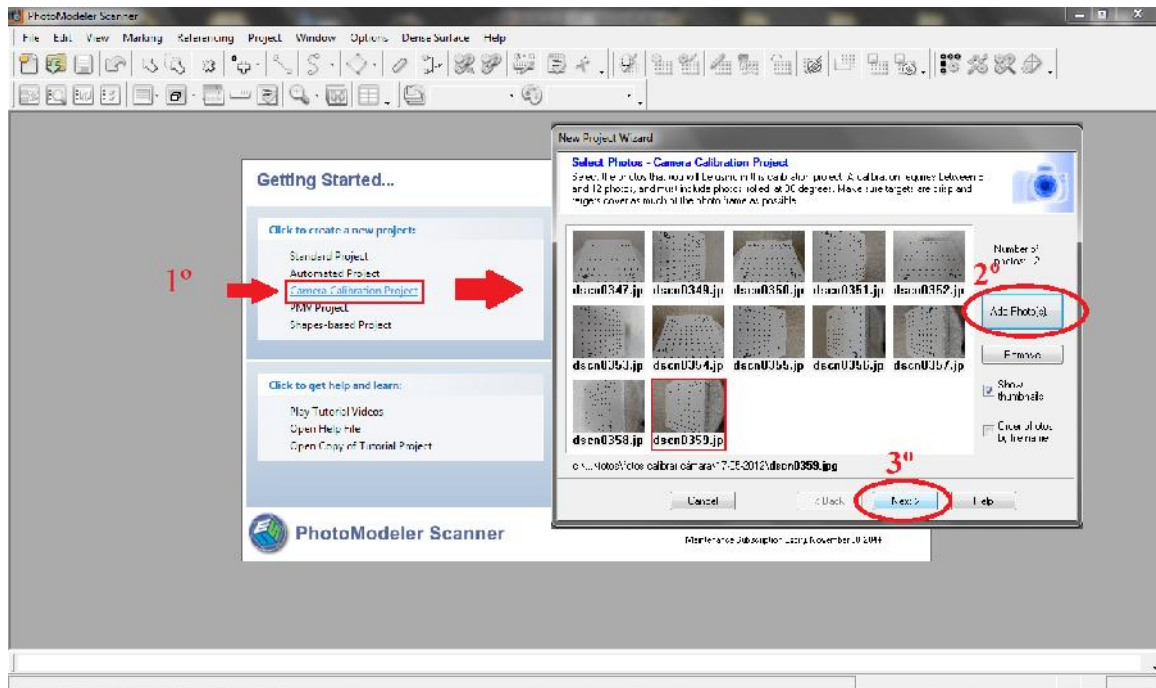


Figura 3.38: Calibración. Selección de fotografías.

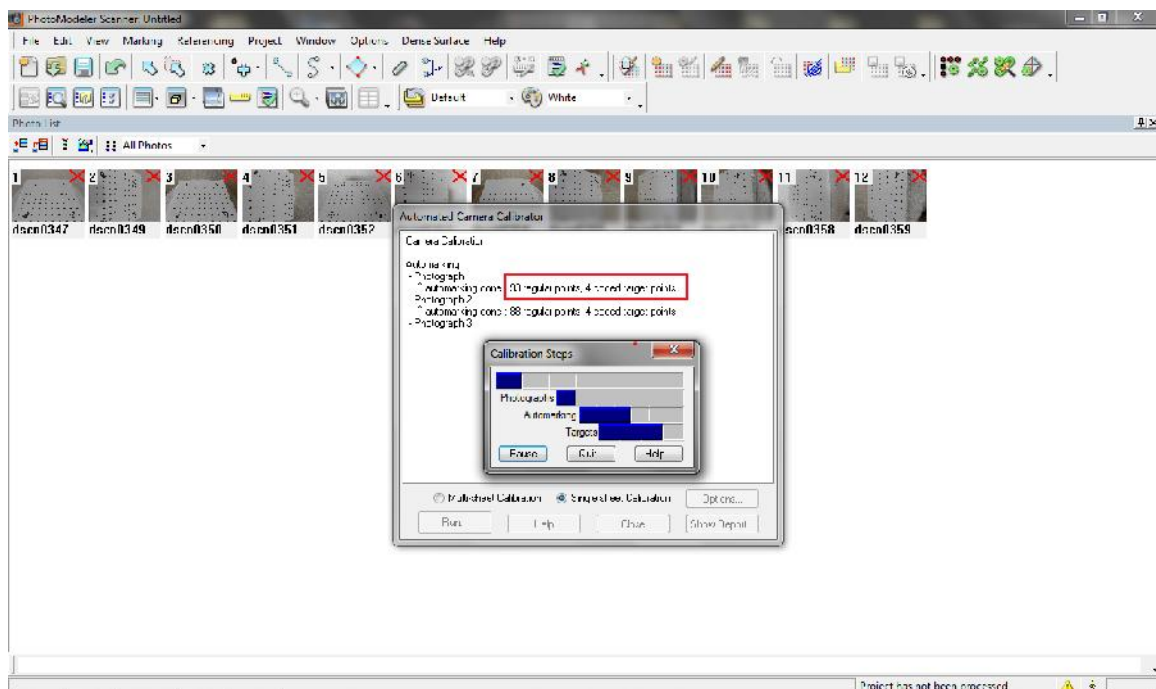


Figura 3.39: Calibración. Búsqueda automática y referenciado de puntos de plantilla.

Cuando el proceso de cálculo finaliza, nos muestra todos los puntos de las fotos referenciados entre sí, así como los puntos de control (figura 3.40). Si no ha localizado alguno de ellos podremos referenciarlo manualmente con la opción “*Sub-pixel Target Mode*” o pulsando directamente la tecla “S”. Nos dará la opción de recuadrar el punto en cuestión y automáticamente encuentra su centro para referenciarlo con el resto.

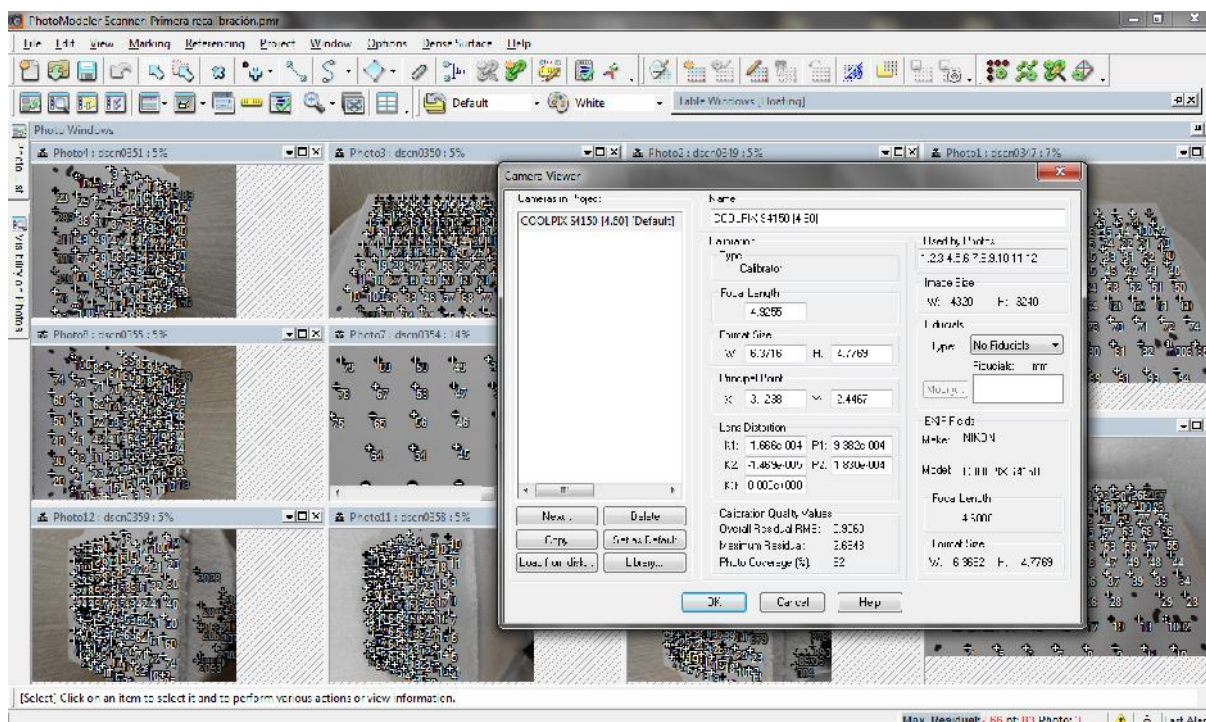


Figura 3.40: Calibración. Referenciado y parámetros.

En la ventana “*Camera Viewer*” nos detalla las características reales de la cámara que hemos calibrado así como los parámetros necesarios para tal calibración, como es el K1, K2, P1 y P2. En caso de que se dispusiera de más cámaras calibradas, en esta ventana podríamos escoger la que quisiéramos para ejecutar el proyecto de restitución. En la figura 3.41 se detalla cómo se han hecho las fotografías en las diferentes posiciones y la excelente capacidad que posee el PhotoModeler para orientarlas de manera muy sencilla.

Por tanto, con este procedimiento disponemos ya de una cámara calibrada para poderla emplear en nuestros trabajos de restitución para una distancia focal concreta. Lo aconsejable es disponer de una cámara calibrada para cada distancia focal empleada, en el presente Proyecto Fin de Carrera sólo fue necesaria para una focal de 35 mm, que era la del objetivo



fijo que se disponía. En caso de objetivos multifocales (por ejemplo, los muy comunes 18-55mm), convendría hacerlo, como comentamos, para cada distancia focal que disponga.

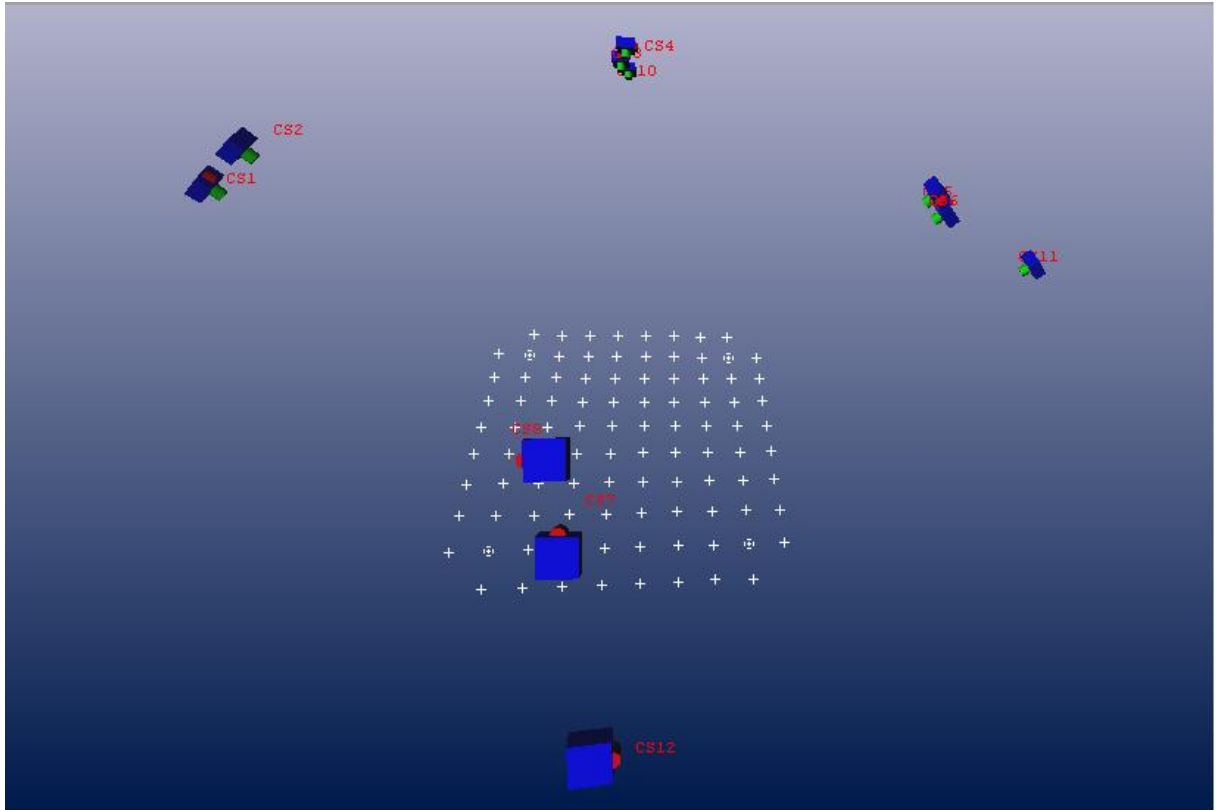


Figura 3.41: Calibración. Orientación de las capturas.



3.5.3 Generación de dianas

El paso previo a la toma de fotografías del objeto que queremos restituir es la creación de unas dianas de control.

Las dianas o “*targets*” son elementos de ayuda en el proceso de restitución de los modelos reales. Son los elementos que nos permiten acceder a puntos reales en el espacio tridimensional, que nunca en términos matemáticos corresponderán con un pixel de nuestra imagen. Los algoritmos de cálculo del PhotoModeler permiten obtener, a partir de determinadas formas introducidas en las fotografías, puntos, cuya posición tridimensional está inferida de estas formas especiales, y que tendrán una precisión denominada subpixel, al no corresponder con los píxeles de la imagen.

Las dianas son básicamente de dos tipos, las “*Coded targets*”, dianas codificadas y las “*targets*” que son puntos circulares. Las codificadas se reconocen como únicas, como un código de barras asociado a ese punto, asignándole un identificador único y referenciándolo con las demás fotografías.

El Photomodeler dispone de unas herramientas para generar las dianas que necesitamos (figura 3.42) y para ello crea unas plantillas en archivos “*postscripts*”*.PS, para enviarlos a una impresora. Disponemos de diferentes tipos de dianas y dependiendo del tipo, el Photomodeler genera un número limitado de ellas.

Sin embargo, las dianas que el Photomodeler realiza, suelen ser por norma general, de un tamaño inferior al adecuado y no nos permite, debido a como realiza la maquetación del archivo que genera, manejarlas como nos interesa. Según las necesidades, podemos distinguir entre los siguientes tipos de dianas:

- **Punto o “*dot*”:** es la diana más simple tanto en aspecto como a la hora de generarla. Su uso es más habitual en levantamiento y restitución de edificios habituales o en una excavación arqueológica. Al no estar codificadas, no pueden ser automáticamente referenciadas.



- **“RAD Dot” (Ringed Automatically Detected):** es un punto rodeado de un anillo de detección automática. En este modelo, el Photomodeler tiene un elemento adicional, este anillo, para comparar los centros e inferir lo que va a considerar el centro de la diana más exactamente.

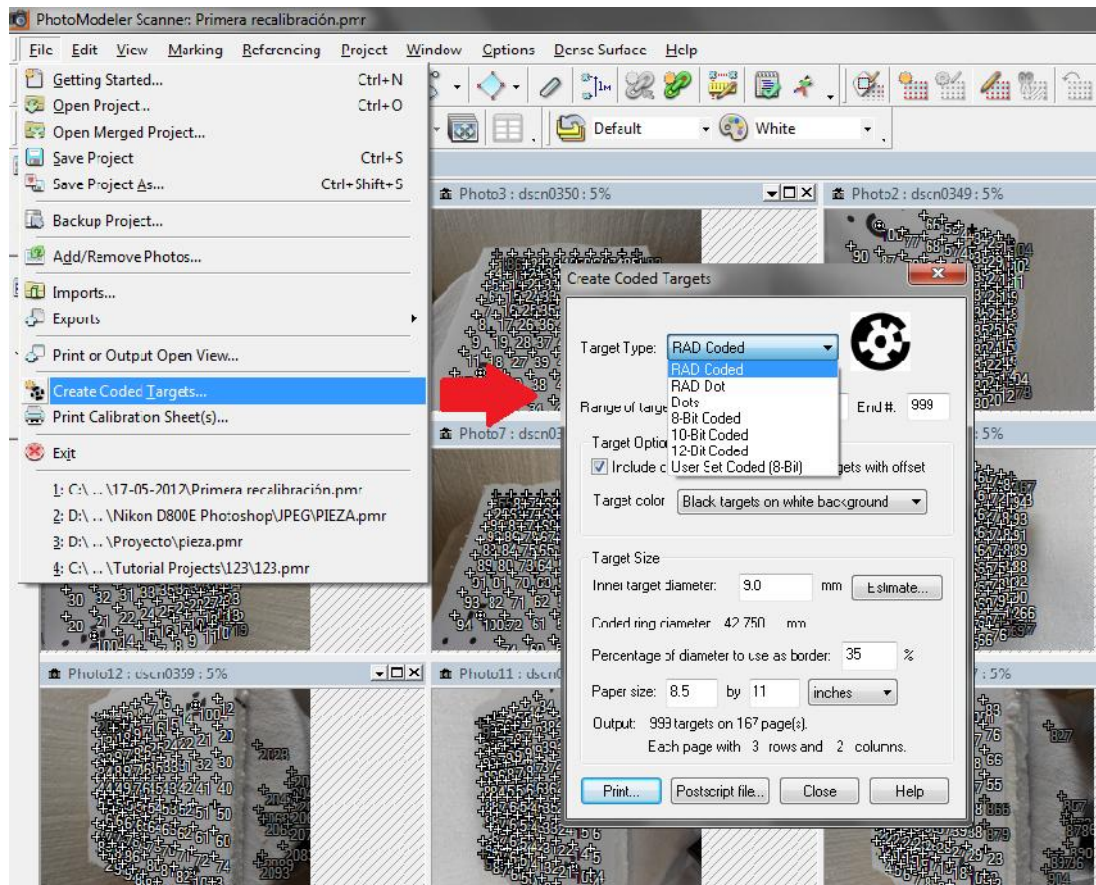


Figura 3.42: Generación de dianas.

- **Diana de “8 bit Coded”:** de este tipo, el programa sólo genera 25. Podríamos generar con un programa CAD un mayor número de ellas, pero los algoritmos de cálculo del programa no las reconocerían. En la figura 3.43 se puede ver que la circunferencia se divide en sectores de 45° .
- **Dianas de 10-bit:** igual que la anterior pero se dividen los 360° en 10 partes iguales. Pasamos de las 25 dianas anteriores a 45. Se suelen utilizar para trabajos forenses de reconstrucción de accidentes de tráfico, impresas en material reflectante.

- **Dianas de 12-bit:** la circunferencia se divide en sectores de 30° . De este tipo reconoce 161 y es que el usamos en el presente Proyecto. En proyectos de piezas pequeñas es muy común usar este tipo.
- **“RAD Coded”:** posee un anillo a mayores de las anteriores y de ellas podemos generar 999. Salvo en estrictas condiciones de laboratorio, se emplean menos que las anteriores ya que su tamaño a igual de objeto es superior. Muy útiles para excavaciones arqueológicas.

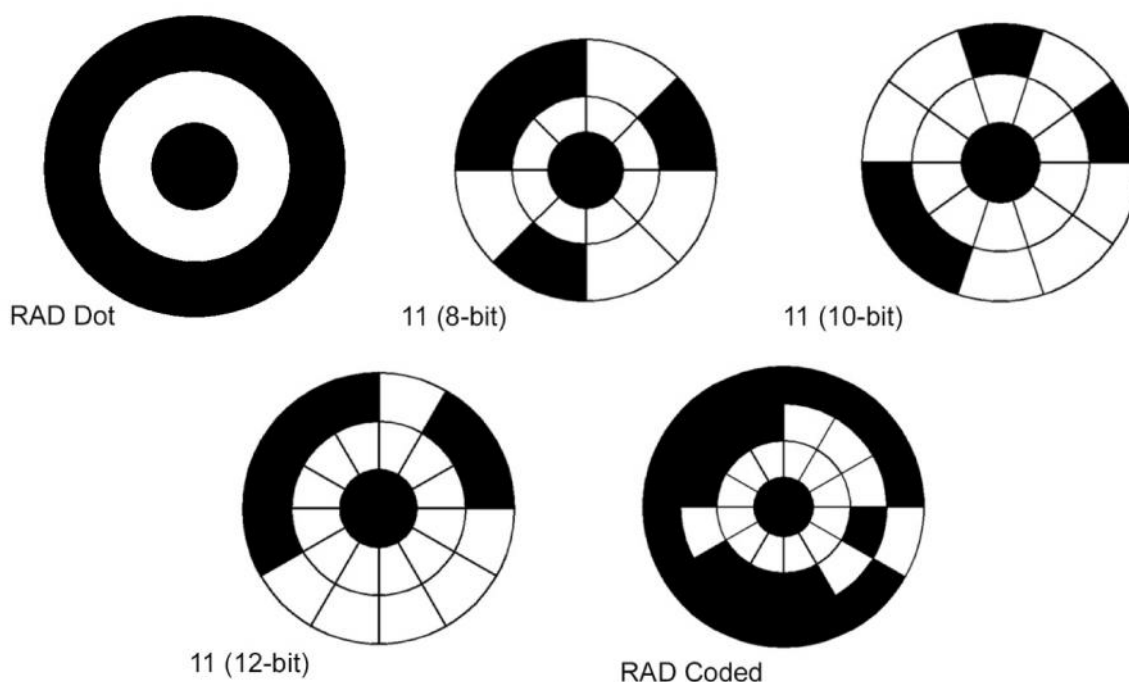


Figura 3.43: Diferentes tipos de dianas.

En la figura 3.43, salvo la RAD Dot y la RAD Coded, el resto muestran un mismo número, el 11, en diferentes tipos de codificación. Para la restitución de nuestra pieza test, finalmente escogemos la codificada de 12 bits. En vez de usar la herramienta que nos proporciona el Photomodeler, generamos las 161 dianas por medio del AutoCAD. Posteriormente fueron impresas en cartulina para que, aunque se manipulasen y recortasen, mantuviesen la consistencia.

3.5.4 Realización de las fotografías

Esta parte es la que puede considerarse como verdadero trabajo de campo y que, debido a la importancia que aporta para la posterior precisión del modelo, es necesario prestar especial atención a la hora de llevarla a cabo.

Previamente a la toma de fotografías como tal, hay que distribuir y colocar todo el material que vamos a utilizar. En primer lugar, sobre una mesa o pedestal situamos la pieza. Para que haga suficiente contraste, la mesa es cubierta de color negro para que posteriormente el Photomodeler no incluya ningún punto de la misma y que tampoco nos genere reflejos cuando fotografiemos el objeto.

El manual del Photomodeler indica que debemos realizar visuales sobre el objeto en torno a los 90° y cubriendo un semicírculo enfrente al lado del objeto que vamos a capturar. En la figura 3.44 se muestra de manera muy esquemática y en planta el itinerario a seguir.

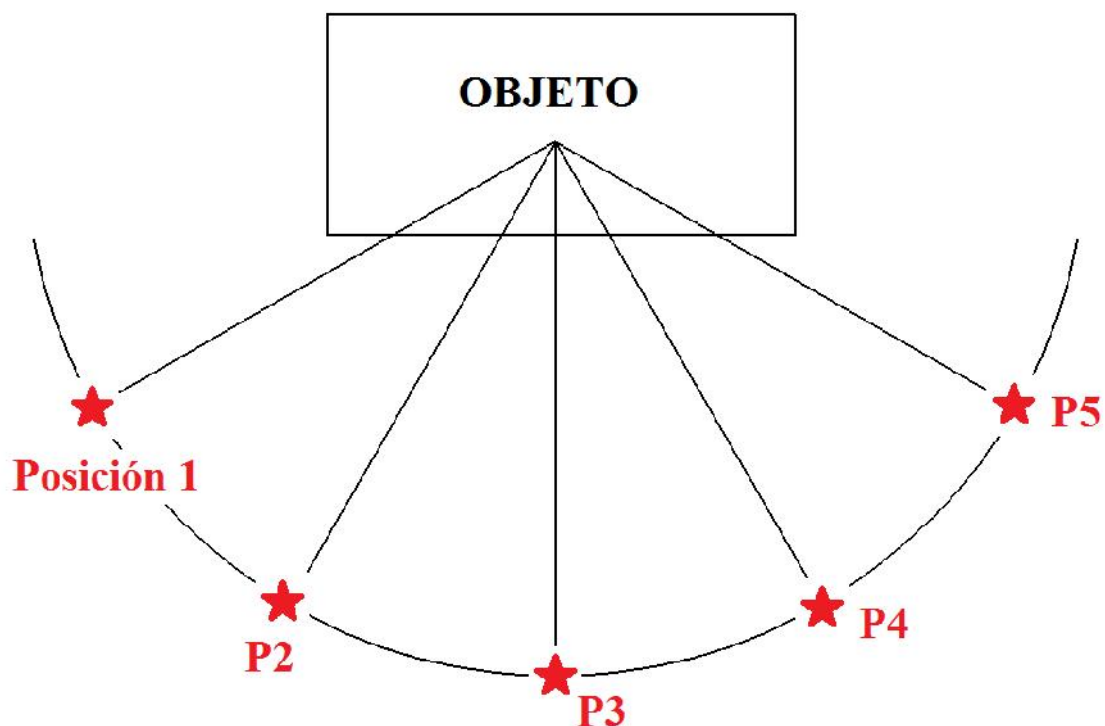


Figura 3.44: Esquema itinerario.



Sin embargo, en la búsqueda de la mayor precisión posible en todo el proceso, se descubrió un método alternativo que mejoraría las indicaciones del Photomodeler.

Como es lógico pensar, cuando lo que se trata es restituir un edificio, un puente o cualquier otra construcción de gran envergadura, es evidente que la única forma de tomar las fotografías es como nos recomienda el Photomodeler. Como nuestro caso corresponde a una pieza test de pequeñas dimensiones, es más complicado conseguir esa semicircunferencia de radio constante, es decir, dejar la pieza fija y movernos con la cámara alrededor de ella que hacer justo lo contrario, que es como finalmente se llevó a cabo. Es decir, moveríamos la pieza y la cámara montada en el trípode la mantendríamos siempre fija.

Para ello se fabricó un artilugio compuesto por un disco macizo de madera, al que se le acopló una base que disponía un eje. Sobre el disco de madera, una vez referenciado su centro, se procedió al marcado de los ángulos que serían las posiciones en que pivotaría la pieza, es decir, 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , y 90° .

El siguiente paso, fue situar esta “torno alfarero” sobre la mesa, situar el trípode con la cámara a una distancia de 60 cm del centro del disco macizo. Sobre el disco, la pieza y alrededor de ella, un pórtico metálico en el que colocaremos las dianas codificadas de 12 bit impresas anteriormente. La masilla adhesiva resultó ser muy útil para fijar todos estos elementos. En las figuras 3.45 y 3.46 se observa la colocación de los mismos.

Una vez hecho esto, se situó tras el objeto a fotografiar un filtro para absorber la luz proveniente de los dos flashes. A la cámara fotográfica en cuestión, la Nikon D800E se le acopló un controlador de flash Nikon SU-800, que se encargaría de accionar los dos flashes colocados dentro de dos ventanas para flash (para difuminar de manera uniforme la luz) cada vez que realizáramos un disparo o toma de fotografía (figura 3.47)

Con el fotómetro ajustamos la sensibilidad de la cámara, ya que éste se encarga de medir la luz existente, muy útil para calcular la exposición correcta de la escena. Marcando la sensibilidad, ISO 100 en este caso, procedemos a la medición, y el aparato nos recomienda una velocidad de obturación y de apertura que introducimos en la cámara fotográfica (figura 3.48).

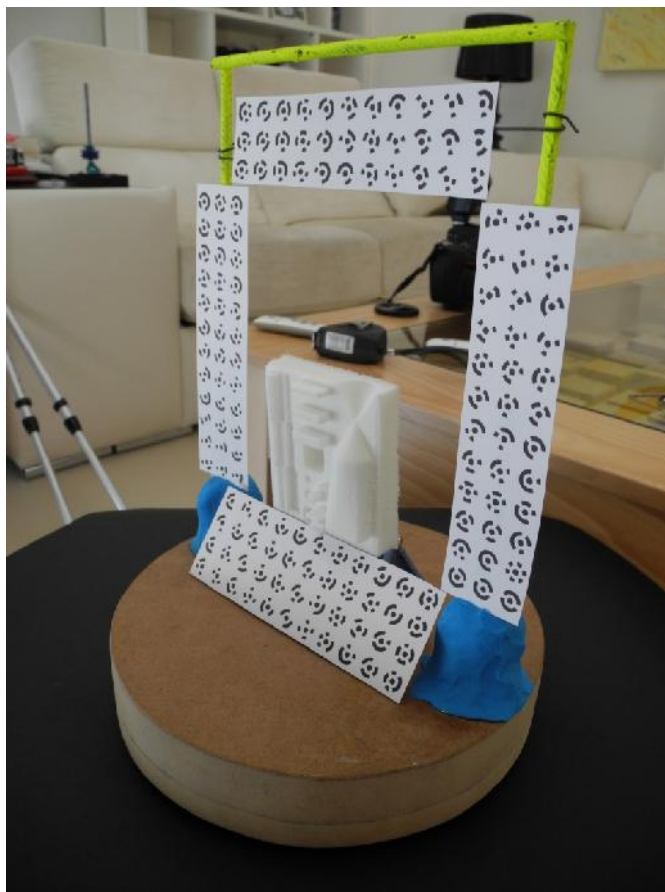


Figura 3.45: Situación de la pieza test sobre el “torno”.



Figura 3.46: Colocación de pieza, torno, cámara y trípode.



Figura 3.47: Situación de todos los elementos.



Figura 3.48: Mediciones fotómetro.



Con todo el material bien situado y correctamente calibrado comenzamos con el proceso de fotografiado. Como el objetivo empleado es fijo (Nikon 35 mm), sólo debemos preocuparnos por el encuadre, ya que la el enfoque se mantiene.

La secuencia de fotos comienza con el torno girado hacia uno de los lados 90° (imagen 3.49) y lo iremos moviendo en las graduaciones marcadas hasta barrer los 180° . Al final, repetiremos todo el proceso subiendo el trípode una altura de 6 cm, ya que el Photomodeler recomienda, para generar nubes de puntos de calidad, pares fotográficos con relaciones b/h entorno a 0,1-0,15. Donde “b” corresponde a la diferencia de altura entre dos fotografías tomadas con el mismo ángulo y “h” la distancia con respecto al objeto a restituir, o lo que es lo mismo, el radio de la semicircunferencia antes mostrada. Como comentamos anteriormente, la distancia entre el objeto y la cámara era de 60 cm, con lo que:

$$\frac{b}{h} = \frac{6}{60} = 0,10 \text{ (9)}$$

Por tanto, se cumple la condición impuesta por el programa.

Con todo esto, se realizaron las 26 fotografías programadas, en muy poco espacio de tiempo debido a la agilidad que procura este método. Como la cámara las genera en formato *RAW*, previamente a poderlas introducir en el Photomodeler, fue preciso convertirlas con el Adobe Photoshop a formato JPG, que si reconoce el Photomodeler.

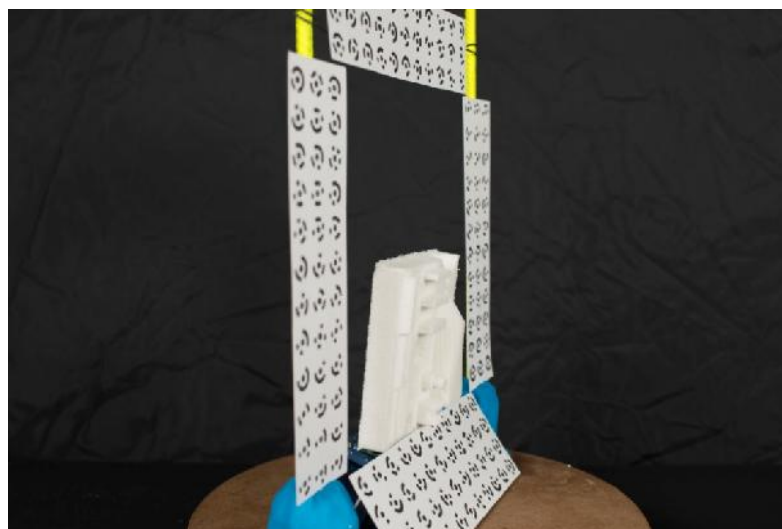


Figura 3.49: Fotografía en una visual extrema.



3.5.5 Procesado. Restitución por nube de puntos.

En esta parte, vamos a detallar todo el trabajo y las etapas del mismo que son necesarias realizar, para poder restituir un objeto en 3D con ayuda del Photomodeler en su versión Scanner.

Esta versión nos permite dos métodos de restitución de modelos:

- Por geometrías, es decir, referenciamos una cantidad de puntos, ya sean dianas codificadas y/o dianas naturales (marcas en los objetos), para posteriormente unir creando diferentes cuerpos geométricos sobre los que se les proyectará la textura que les corresponda. Es un método muy manual y en el que, a pesar de que en objetos de grandes dimensiones o edificios se puede conseguir buenas precisiones, para lo que ocupa el presente Trabajo Fin de Carrera se antoja cuanto menos insuficiente.
- Por nube de puntos, el programa genera nubes de puntos densas, con calidad métrica y que será el método escogido en este proyecto por la precisión que otorga.

A continuación detallamos los pasos necesarios y seguidos para la obtención de la nube de puntos generada a través de las fotografías de nuestra pieza test.

1. Referenciado básico

Iniciamos el programa y seleccionamos la opción “*Automated Project*” (proyecto automatizado). Acto seguido nos muestra una ventana (figura 3.50) en la que nos ofrece varias opciones: proyectos automatizados para dianas de punto, para dianas codificadas y finalmente “*SmartPoint Projects*”, que será la que escojamos. Esta opción nos permite que el programa de manera automática haga un referenciado rápido de unos cuantos puntos entre las fotografías introducidas y nos sea mucho más fácil el orientado de las mismas desde los primeros pasos de la restitución.

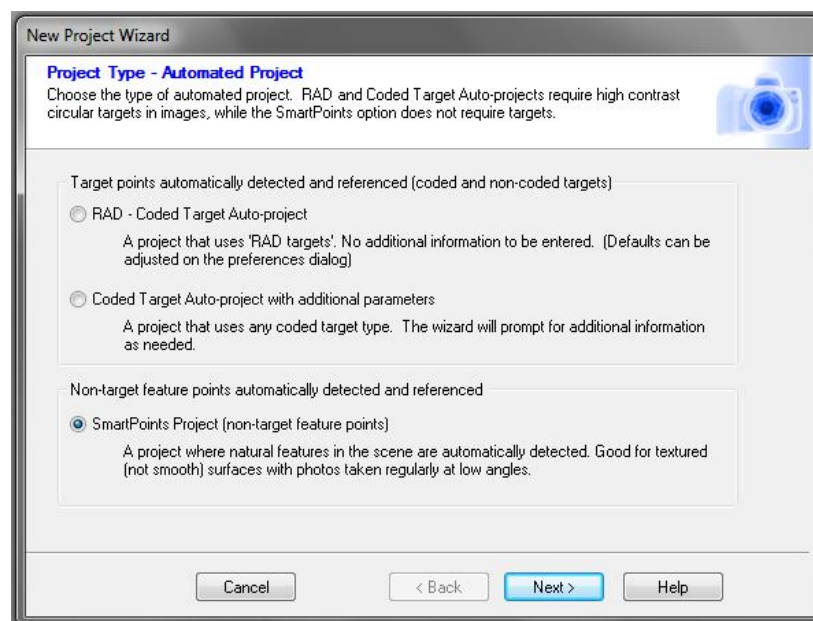


Figura 3.50: Referenciado básico. Puntos inteligentes.

Marcada la opción, la siguiente ventana nos guía para que seleccionemos y carguemos las fotografías que formarán el proyecto de restitución. Resultó que de las 26 fotografías tomadas inicialmente, sólo se pudieron utilizar 18, ya que una vez hecho a posteriori el revelado digital, se observó que 8 fotografías presentaban diferentes problemas (movidas, desenfocadas,...) que no producirían ninguna ventaja en nuestro trabajo. Desechadas éstas, seguimos adelante con el resto.

La siguiente ventana previa al referenciado inteligente del Photomodeler es la que nos permite elegir la cámara con la que hemos realizado las fotografías. Como la cámara empleada ha sido calibrada previamente, marcamos la opción indicada en la figura 3.51.

Ejecutamos la operación y mientras el Photomodeler procesa la orden, nos muestra en pantalla la captura de la figura 3.52. Estos puntos iniciales no nos procuran una gran precisión al modelo, sin embargo nos facilitan el referenciado rápido de una cantidad considerable de puntos que de otra manera y como ocurre con versiones anteriores debemos de hacer manualmente.

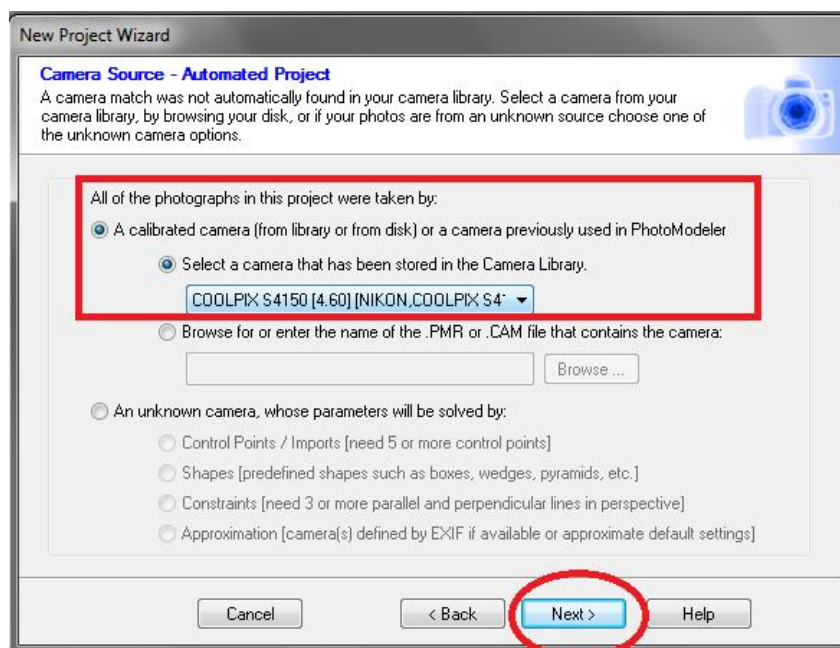


Figura 3.51: Referenciado básico. Selección de cámara calibrada.

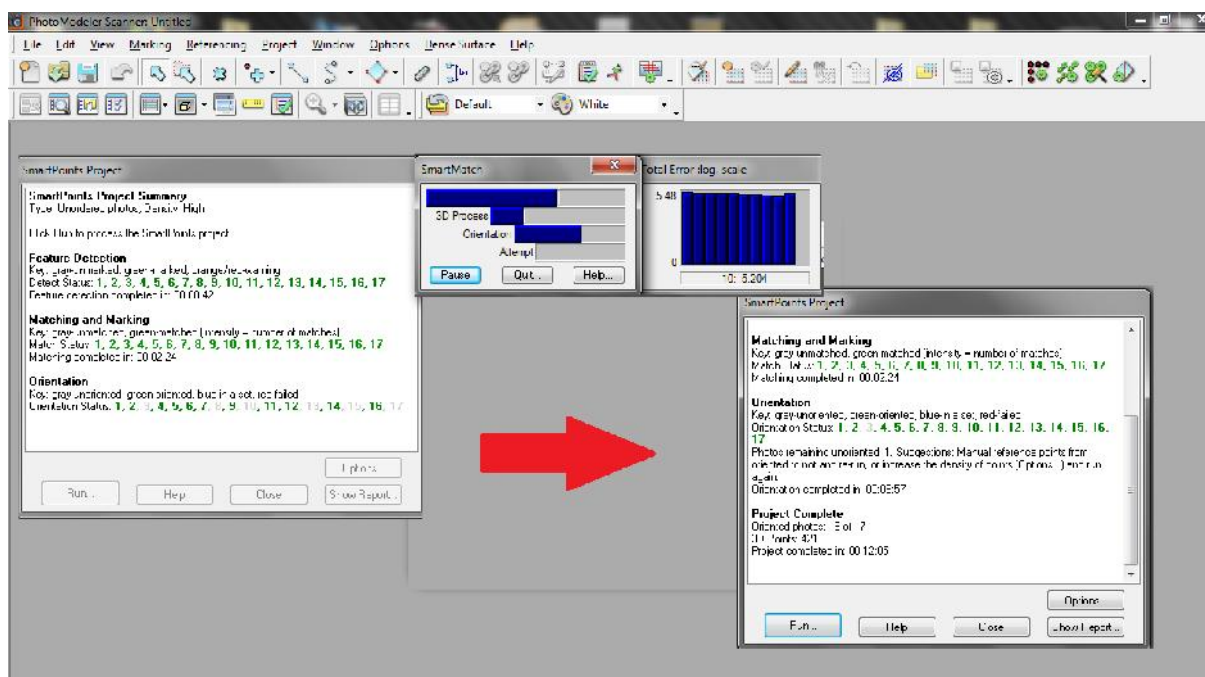


Figura 3.52: Referenciado básico. Búsqueda automática de puntos.

Como se puede apreciar en la figura 3.52, el programa ha referenciado de manera automática 421 puntos en 16 fotografías.



2. Referenciado de dianas codificadas

Este segundo paso también es automático y en él, el Photomodeler se encargará de localizar, referenciar y nombrar todas y cada una de las dianas codificadas de 12-bit que distribuimos alrededor de la pieza test. Esta etapa es de vital importancia ya que es la que otorga un mayor grado de precisión al proceso. Esto se debe a que cada diana codificada corresponde a uno y sólo un número del 1 al 161, ambos inclusive y no hay opción al error.

Para iniciar el referenciado automático de dianas seleccionamos la herramienta “*Automático Target Marking*”, marcando las opciones como se detalla en la figura 3.53. Entre los parámetros a configurar se encuentran el número de fotografías que queremos que referencie (todas), el tipo de diana codificada (de 12-bits) y los diámetros máximos y mínimos. Este dato lo obtendremos de la fotografía más escorada, es decir, la que forme 90° o próximo, ya que en ella tendremos ambas condiciones. También podemos asignar estos puntos a una capa concreta para manipularlos con mayor facilidad posteriormente.

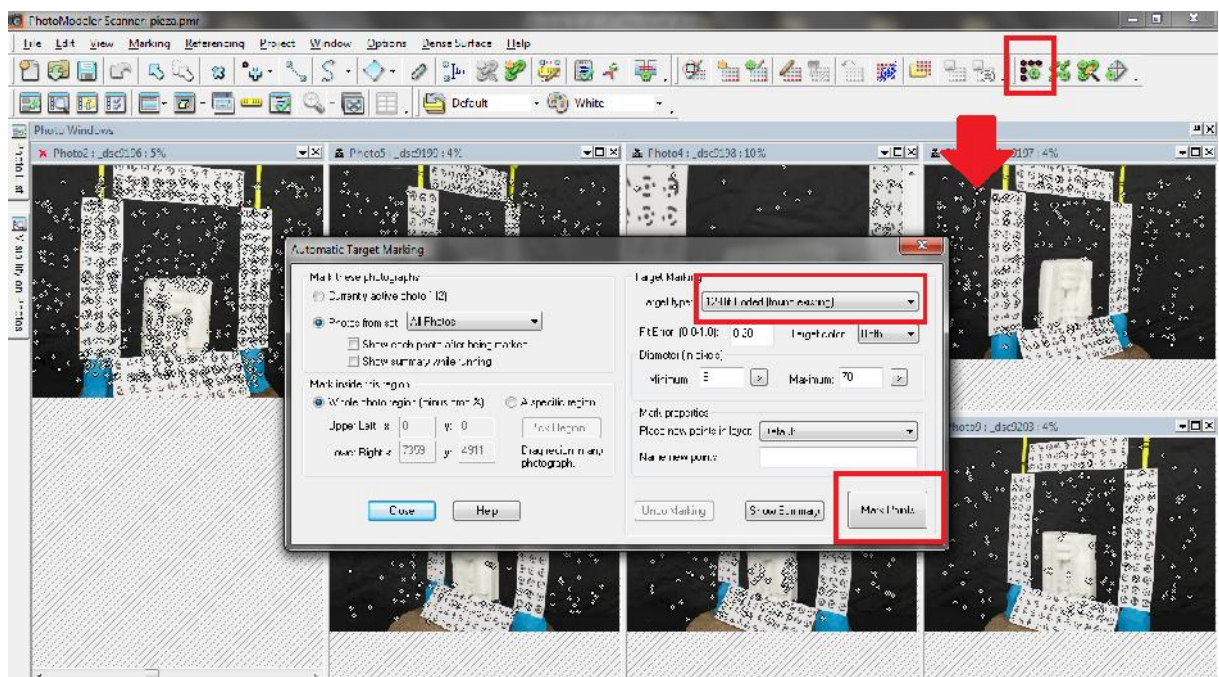


Figura 3.53: Referenciado de dianas codificadas

Ejecutamos la operación y rastrea y referencia todas las fotografías.

Ya que disponemos de un número considerable de puntos referenciados, es el momento de aplomar y escalar el modelo.

Para escalar el modelo debemos marcar en una fotografía una distancia conocida entre dos puntos determinados. En este caso, sabemos que la distancia entre los centros de las dianas 13 y 118 es de 15 cm, así que la asignamos en una fotografía que sea lo más frontal posible para facilitarnos la tarea.

Una vez hecho esto, aplomaremos el modelo, es decir, estableceremos unos ejes de referencia. El eje “x” corresponderá a la recta que une las dianas anteriormente citadas (13 a 18) y el eje “y” será el que forma la recta que une las dianas 1 a 141, como se aprecia en la figura 3.54:



Figura 3.54: Escalado y aplomado del modelo.

Repetiremos el proceso de referenciado automático pero cambiando dianas codificadas por puntos o “dots”, ajustando los diámetros máximos y mínimos para que el programa encuentre de nuevo otra buena cantidad de puntos referenciados que nos mejoren, en la medida de lo posible la precisión actual. En caso de que nos añaden más error, los desecharemos inmediatamente.



3. Obtención de la nube de puntos

La creación y manipulación de nubes de puntos dentro del Photomodeler Scanner tiene una categoría propia, a la que corresponde una barra de herramientas denominada “*Dense Surface Tools*”.

De entre todas las herramientas disponibles, la más importante es la “*Create Dense Surface*”. Con ella le damos al programa todos los parámetros adecuados para obtener una buena restitución. Si la ejecutamos, nos abre una ventana que se divide en tres partes.

La primera nos muestra información general del proyecto y algún comentario sobre los parámetros que estamos utilizando, si son aceptables o no, etc.

La segunda parte, nos muestra el ratio b/h de los pares fotográficos generados. Seleccionamos en primer lugar los mejores pares disponibles. Previamente, con la herramienta “*DSM Trim Mode*”, marcaremos el área de las fotografías que queremos que genere la nube de puntos. En este caso marcaremos sólo la pieza test.

La tercera parte corresponde a “*Settings*” y en ella podemos distinguir:

- “***Sampling rate***”: nos indica la distancia entre puntos que la restitución debe buscar.
- “***Depth range***”: o rango de profundidad. Indica la distancia tanto por delante como por detrás que existe respecto a un plano base de referencia.
- “***Sub-pixel***”: al marcar esta opción obligamos al algoritmo de cálculo que utilice éste método. Los datos serán más precisos pero el proceso más lento.
- “***Super-sampling factor***”: es un parámetro de cálculo utilizado con el método anterior y hace referencia a la cantidad de bucles a realizar por el algoritmo

para dar una solución. Cuanto mayor sea, más lento será el proceso pero las superficies será menos onduladas.

- **“Matching región radius”**: hace referencia al tamaño de la zona correlacionada entre dos fotografías de para restituir los puntos. Es un parámetro fundamental en el ajuste y precisión de la nube.
- **“Texture type”**: en una escala del 1 al 10 marcamos la calidad de la textura de la nube de puntos. A una textura ideal o casi perfecta otorgaríamos el valor 1 y a una mala o poco eficaz el valor 10.

Estos son los principales parámetros (figura 3.55) a modificar en la nube de puntos y que debido a la poca información disponible, su correcta manipulación se basa en el ensayo de prueba y error.

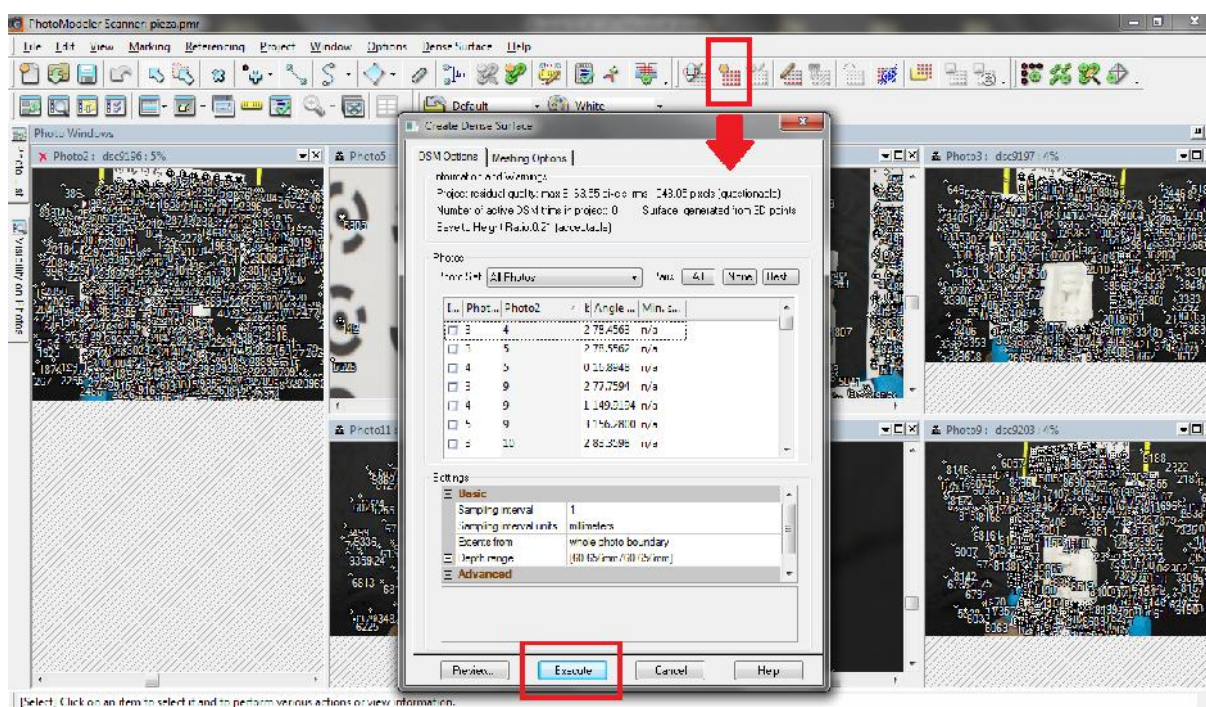


Figura 3.55: Parámetros nube de puntos.

Como se puede observar, esta fase, a pesar de ser la más importante, es la que menos trabajo nos exige, sin embargo, en cuanto a número de cálculos para el procesador es la más tediosa.



Para el caso que nos ocupa y atendiendo a las capacidades técnicas del ordenador que ejecutó los cálculos, la nube de puntos generada, de entorno a los 2 000 000 de puntos, necesitó prácticamente dos días ininterrumpidos, ofreciendo un resultado como el mostrado en la figura 3.56.

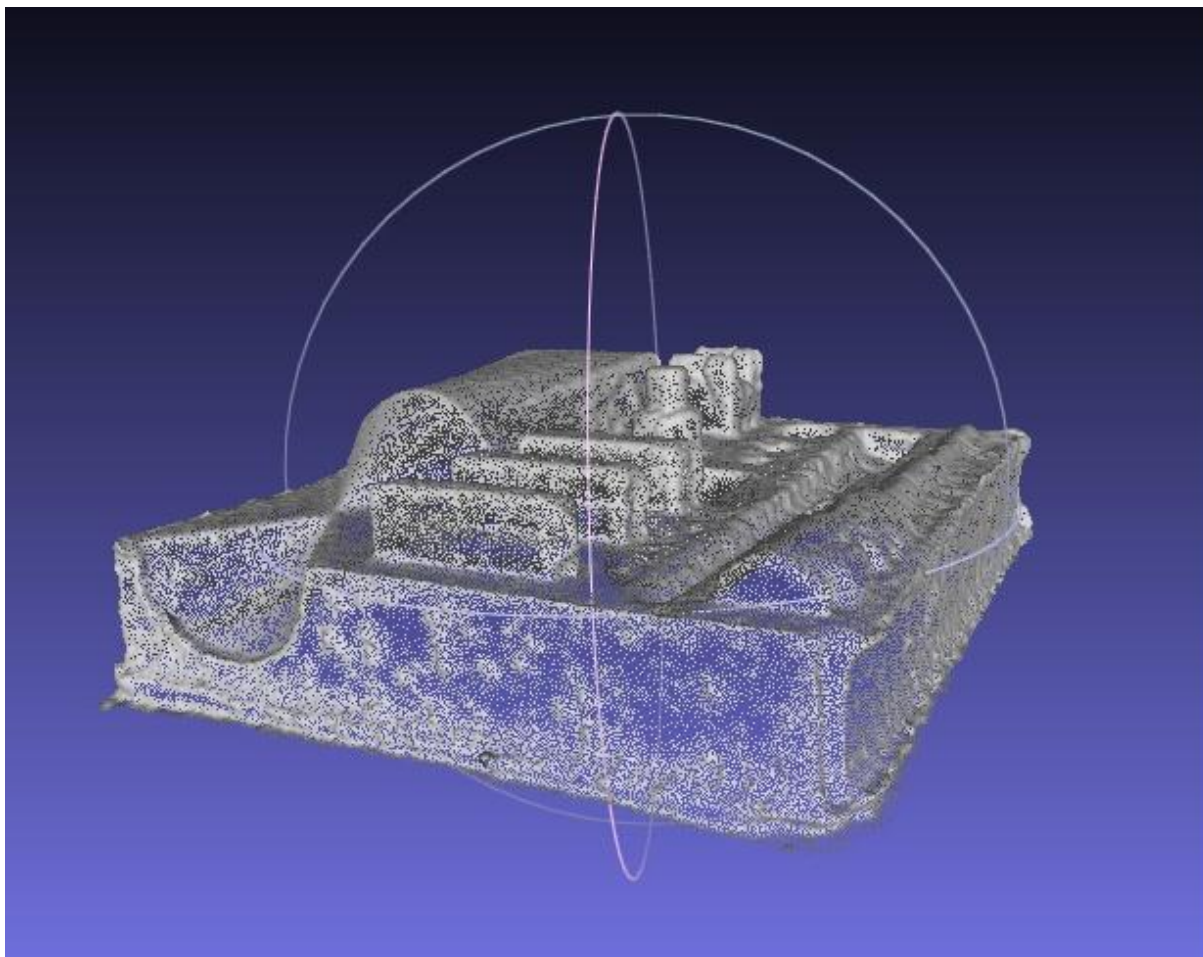


Figura 3.56: Pieza test restituida por nube de puntos.

Para su medición, esta nube de puntos se exporta a formato *.dwg, para que luego con el AutoCAD podamos realizar las mediciones que aportamos en el capítulo 4 de este Proyecto Fin de Carrera y comparemos con los obtenidos por el 123D Catch.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



4 RESULTADOS

En este capítulo se muestran todas las mediciones realizadas en el modelo restituido y se comparan con las realizadas sobre la pieza original.

Para las mediciones de la pieza de prueba se empleó un calibre digital marca Limit, con los siguientes errores en milímetros:

- **Error de precisión, e_p :**

$$e_p = 0,02 + 0,0005 \cdot l \quad (10)$$

- **Error de apreciación, e_{ap} :**

$$e_{ap} = 0,01 \quad (11)$$

- **Error total, e_t :**

$$e_t = e_p + e_{ap} \quad (12)$$



Figura 4.1: Medición de la pieza con calibre.



Las dimensiones que no se podían obtener con el citado calibre, un distanciómetro láser nos proporcionó tales datos. En la figura 4.2 se muestra la adquisición de los mismos.



Figura 4.2: Mediciones con láser.

Las siguientes tablas corresponden a los datos obtenidos de las mediciones realizadas (en milímetros), así como su error relativo (en mm) y absoluto (en tanto por cien) con respecto a las dimensiones originales tomadas como referencia. También la media de error de cada caso y su evaluación respecto a los ejes de coordenadas.

Las limitaciones intrínsecas a las herramientas de medición disponibles, nos impidieron medir la totalidad de las diferentes dimensiones de la pieza, sin embargo, para el estudio comparativo, resultaron suficientes las realizadas, otorgándonos una idea de la precisión de cada método.

En la figura 4.3 se muestra una captura de la totalidad de la pieza, que sirve para asignar los ejes coordenados que serán la referencia para el resto de imágenes que siguen, en las que se observan más de cerca las partes medidas.

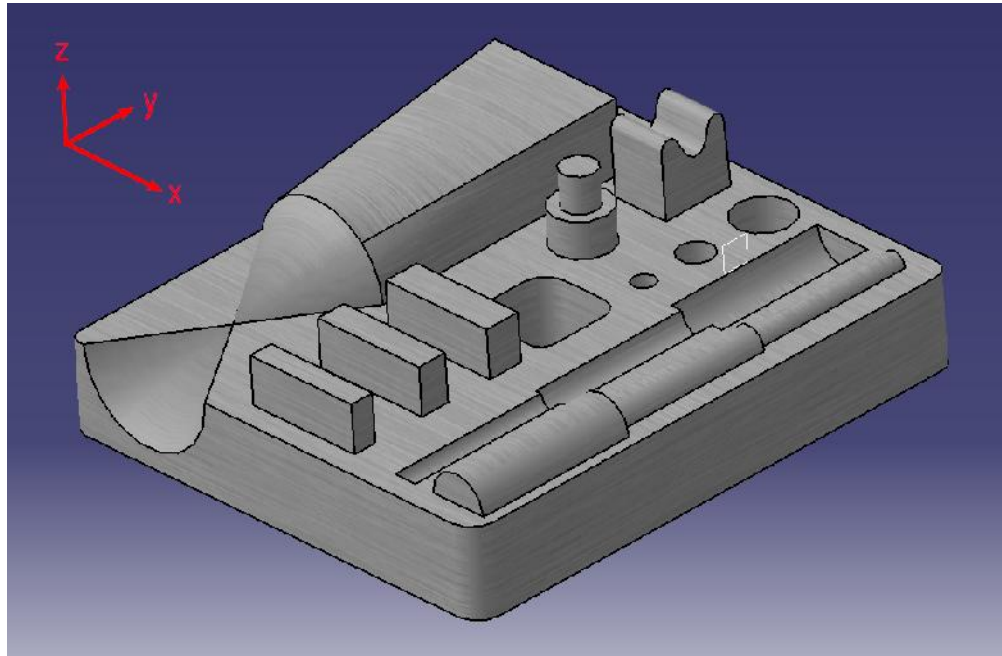


Figura 4.3: Vista de pieza y ejes de referencia.

Las fórmulas empleadas para el cálculo de los errores absolutos, relativos y la media son:

- **Error absoluto, e_{abs} :** es la diferencia entre el valor de la medida y el valor real de una magnitud (valor tomado como exacto).

$$e_{abs} = valor_{medida} - valor_{real} \quad (13)$$

- **Error relativo, e_{rel} :** es la relación que existe entre el error absoluto y la magnitud medida, es adimensional, y se expresa en porcentaje.

$$e_{rel} = \frac{e_{abs}}{valor_{real}} \cdot 100 \quad (14)$$



- **Error medio, e_{med} :** es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación.

$$e_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i)}{n} \quad (15)$$

A continuación, las tablas y sus correspondientes gráficas de los resultados obtenidos:

Detalle 1

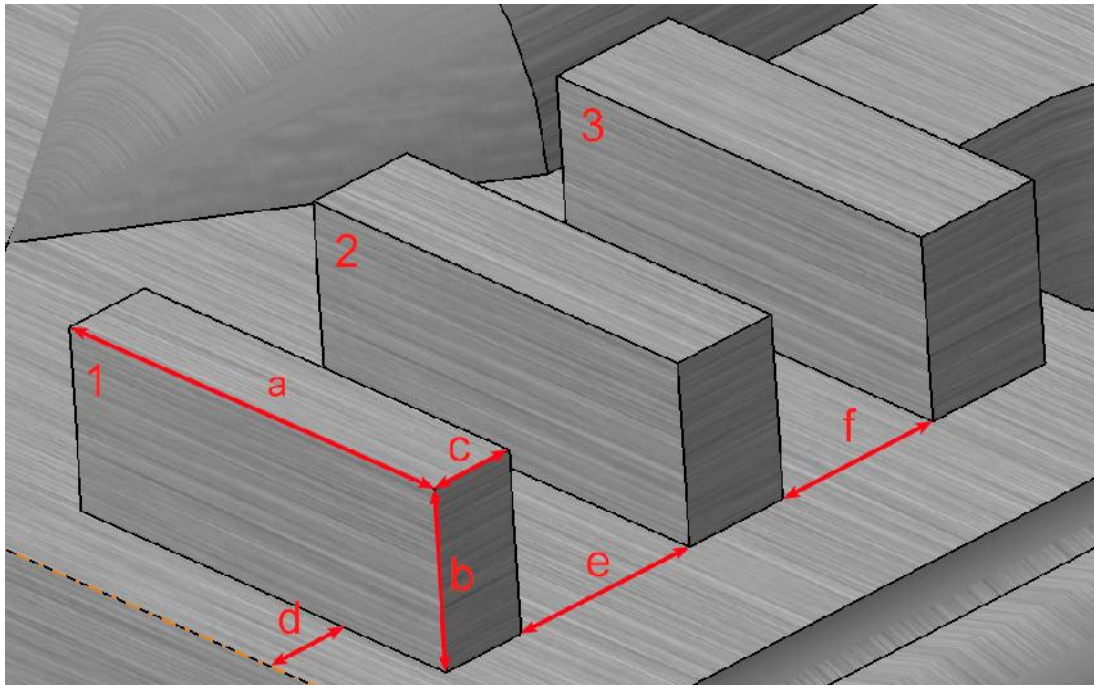


Figura 4.4: Captura detalle 1.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



Tabla 4.1: Mediciones detalle 1.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
a ₁	20	21,00	26,34	22,09
b ₁	8	11,20	18,42	12,6
c ₁	4	4,30	7,83	3,78
a ₂	20	20,84	25,84	20,33
b ₂	8	10,60	15,65	11,54
c ₂	5	4,48	9,12	6,42
a ₃	20	20,73	17,01	22,21
b ₃	8	10,80	14,97	12,67
c ₃	6	5,46	8,89	6,65
d	4	3,00	7,02	5,83
e	9	9,67	17,33	10,89
f	8	8,43	16,03	10,54

Tabla 4.2: Errores detalle 1.

COTA	e _i calibre (mm)	e _{abs} 123D (mm)	e _{abs} PMS (mm)	e _{rel} 123D (%)	e _{rel} PMS (%)
a ₁	0,04	5,34	1,09	25,43	4,93
b ₁	0,04	7,22	1,4	64,46	11,11
c ₁	0,03	3,53	0,52	82,09	13,76
a ₂	0,04	5,00	0,51	23,99	2,51
b ₂	0,04	5,05	0,94	47,64	8,15
c ₂	0,03	4,64	1,94	103,57	30,22
a ₃	0,04	6,28	1,48	30,29	6,66
b ₃	0,04	4,17	1,87	38,61	14,76
c ₃	0,03	3,43	1,19	62,82	17,89
d	0,03	4,02	2,83	134,00	48,54
e	0,03	7,66	1,22	79,21	11,20
f	0,03	7,60	2,11	90,15	20,02
Media	0,04	5,33	1,43	65,19	15,81

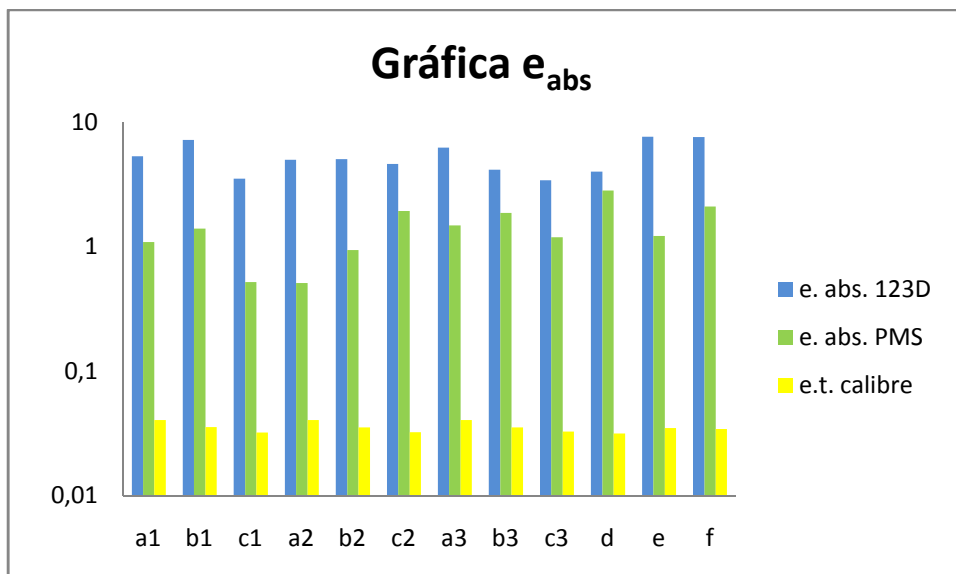


Figura 4.5: Gráfica error absoluto detalle 1.

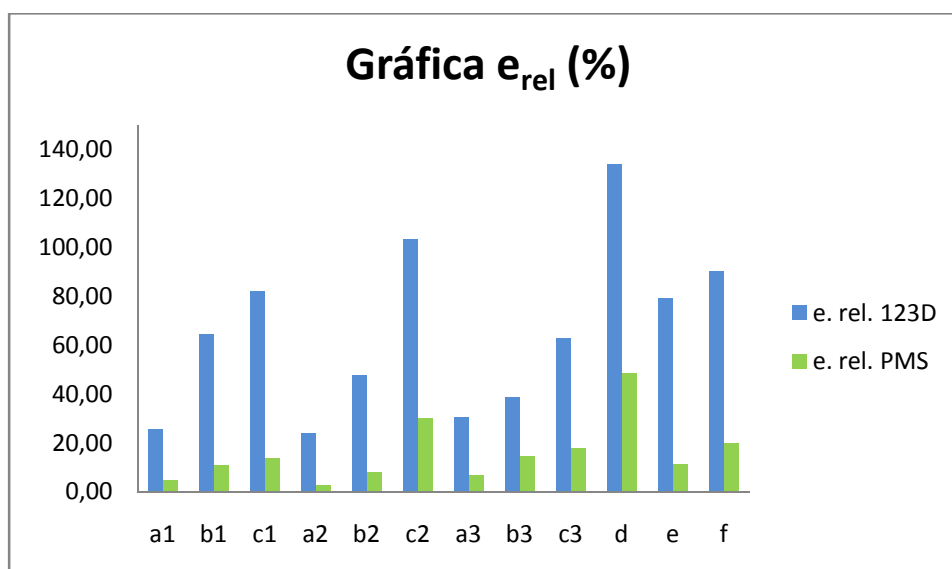


Figura 4.6: Gráfica error relativo detalle 1.

Detalle 2

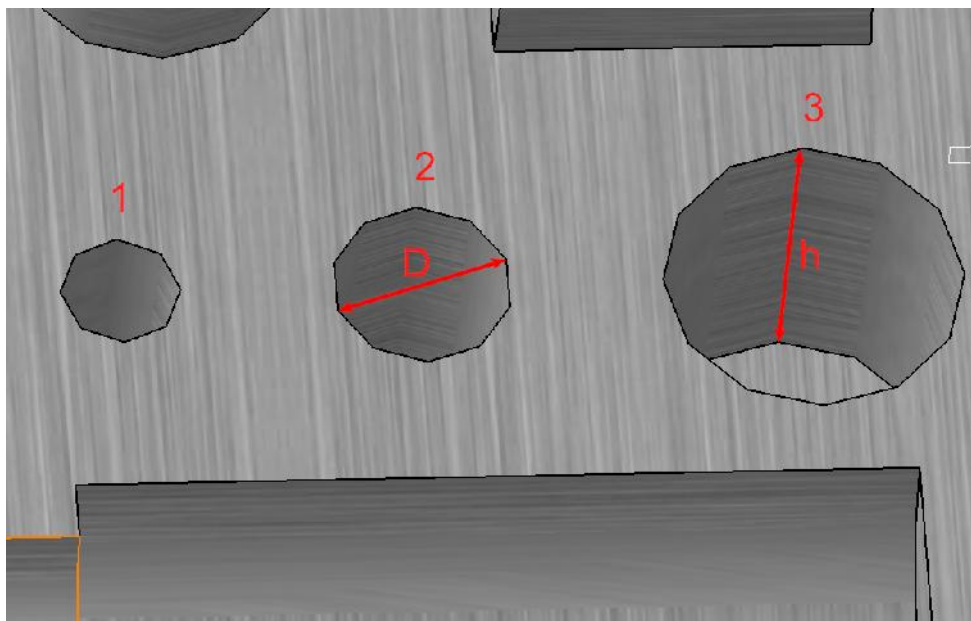


Figura 4.7: Captura detalle 2.

Tabla 4.3: Mediciones detalle 2.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
D ₁	4	-	-	-
h ₁	12	7,72	3,67	5,80
D ₂	6	6,89	4,22	5,63
h ₂	12	13,49	4,84	9,24
D ₃	10	10,31	4,97	11,89
H ₃	12	12,70	6,69	10,12



Tabla 4.4: Errores detalle 2.

COTA	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
D_1	-	-	-	-	-
h_1	0,03	4,05	1,92	54,46	33,10
D_2	0,03	2,67	1,26	38,75	22,38
h_2	0,04	8,65	4,25	64,12	46,00
D_3	0,04	5,34	1,58	51,79	13,29
h_3	0,04	6,01	2,58	47,32	25,49
Media	0,04	5,34	2,32	50,89	28,05

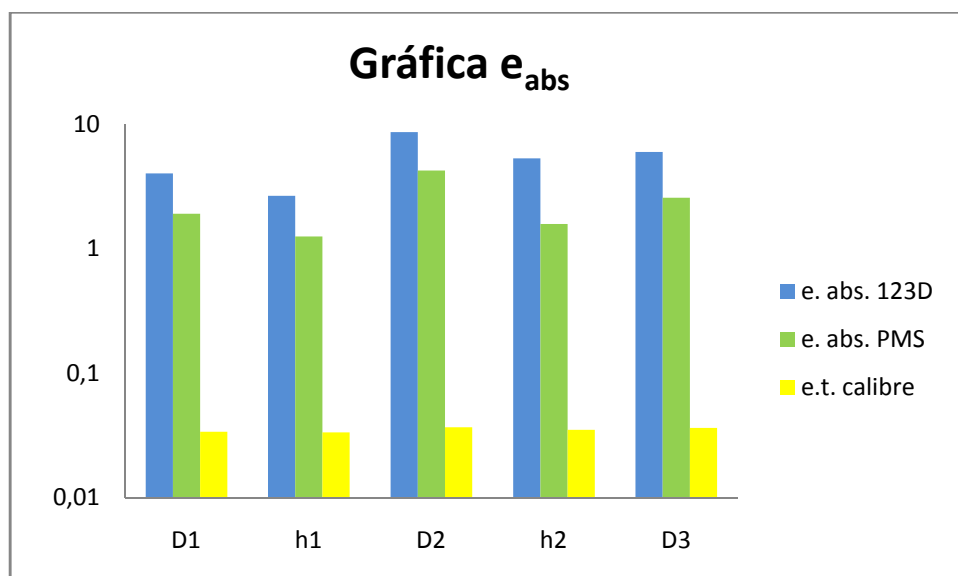


Figura 4.8: Gráfica error absoluto detalle 2.

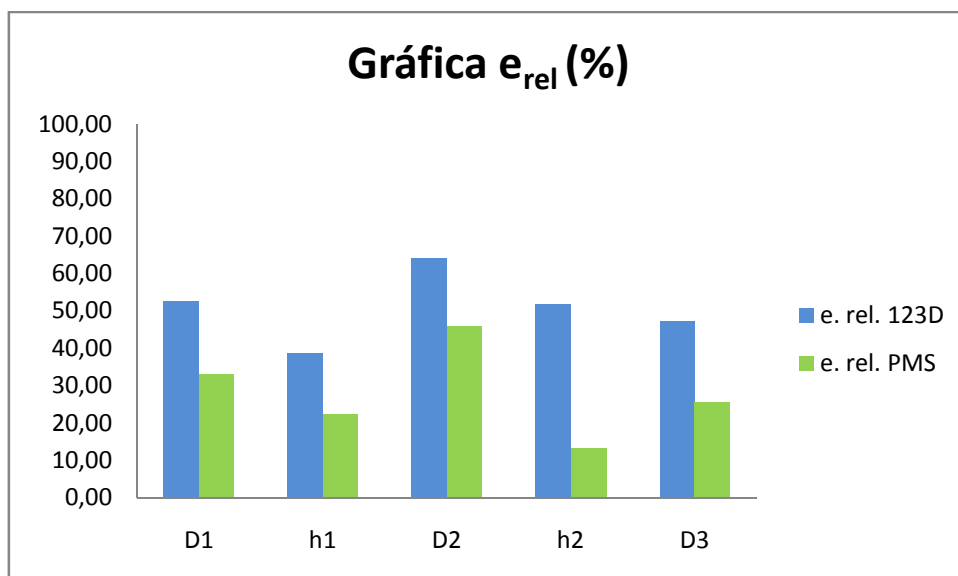


Figura 4.9: Gráfica error relativo detalle 2.

Detalle 3

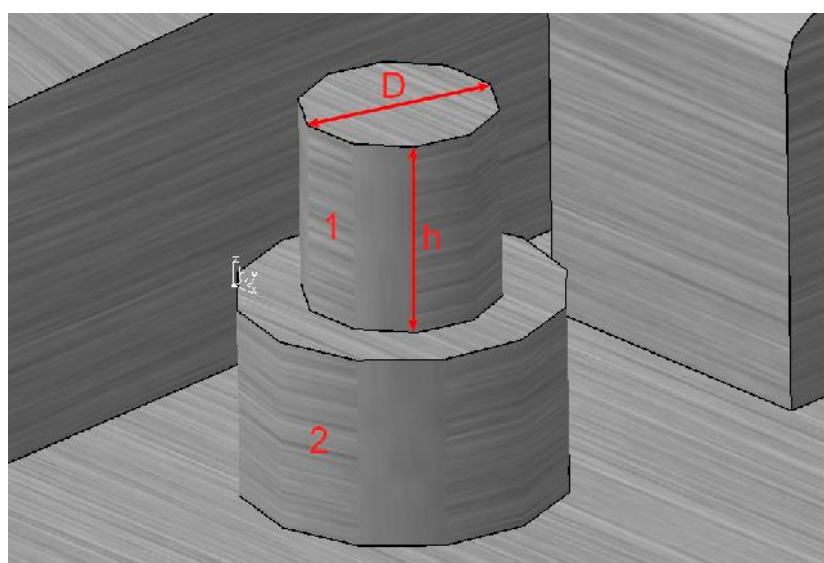


Figura 4.10: Captura detalle 3.

Tabla 4.5: Mediciones detalle 3.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
D ₁	6	4,34	8,13	6,02
h ₁	6	7,40	12,12	4,98
D ₂	10	9,38	15,34	11,20
h ₂	6	7,10	9,27	9,39



Tabla 4.6: Errores detalle 3.

COTA	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
D_1	0,03	3,79	1,68	87,33	27,91
h_1	0,03	4,72	2,42	63,78	48,59
D_2	0,03	5,96	1,82	63,54	16,25
h_2	0,03	2,17	2,29	30,56	24,39
Media	0,03	4,16	2,05	61,30	29,28

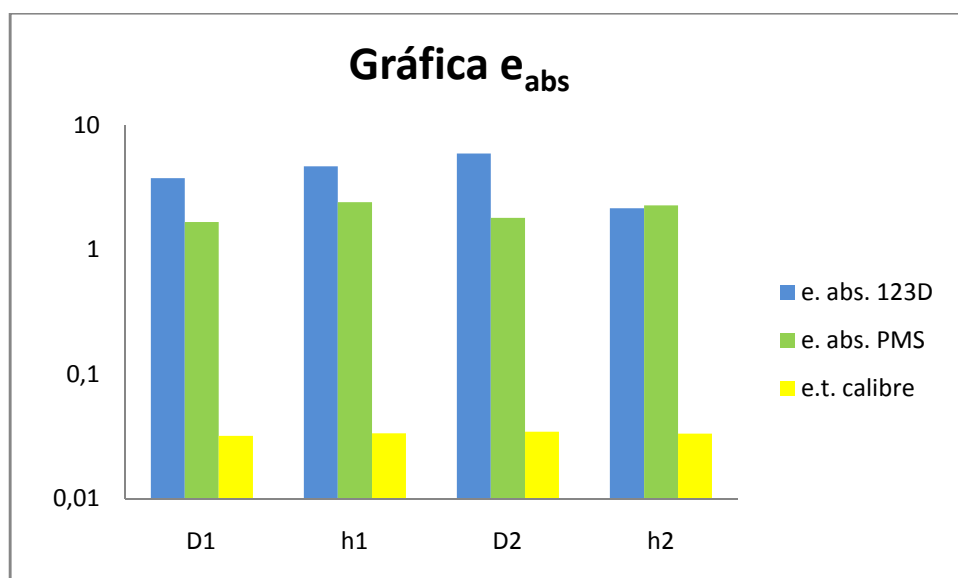


Figura 4.11: Gráfica error absoluto detalle 3.

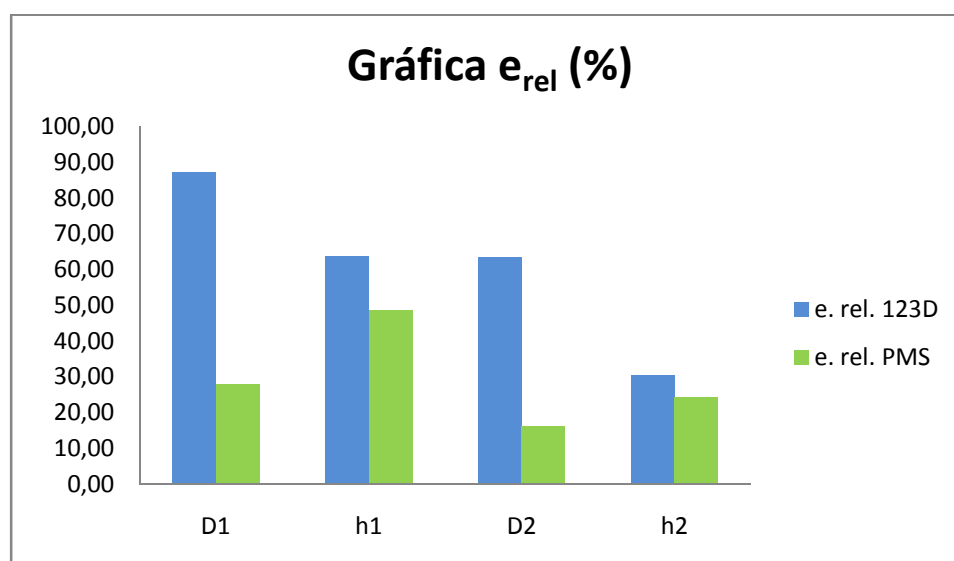


Figura 4.12: Gráfica error relativo detalle 3.



Detalle 4

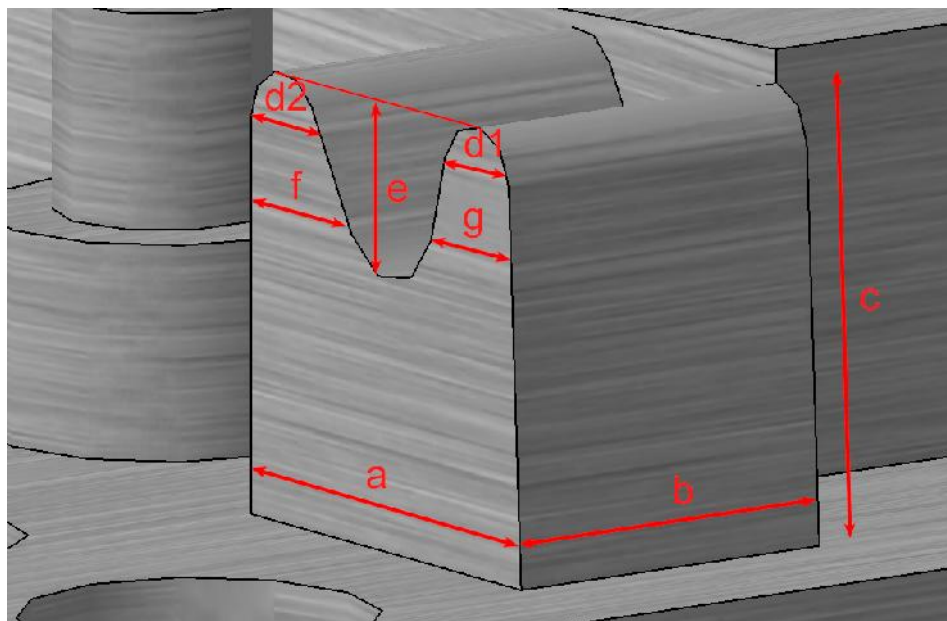


Figura 4.13: Captura detalle 4.

Tabla 4.7: Mediciones detalle 4.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
a	12,5	11,73	17,20	13,09
b	10	10,59	18,12	12,30
c	12,5	12,90	16,67	11,88
e	5	5,00	5,82	4,21
f	-	-	-	-
g	-	-	-	-
d ₁	3	2,85	5,15	3,87
d ₂	3	2,28	5,02	3,54



Tabla 4.8: Errores detalle 4.

COTA	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
a	0,04	5,47	1,36	46,63	10,39
b	0,04	7,53	1,71	71,10	13,90
c	0,04	3,77	1,02	29,22	8,59
e	0,03	0,82	0,79	16,40	18,76
f	.	-	-	-	-
g	-	-	-	-	-
d ₁	0,03	2,30	1,02	80,70	26,36
d ₂	0,03	2,74	1,26	120,18	35,59
Media	0,03	2,83	0,89	60,71	18,93

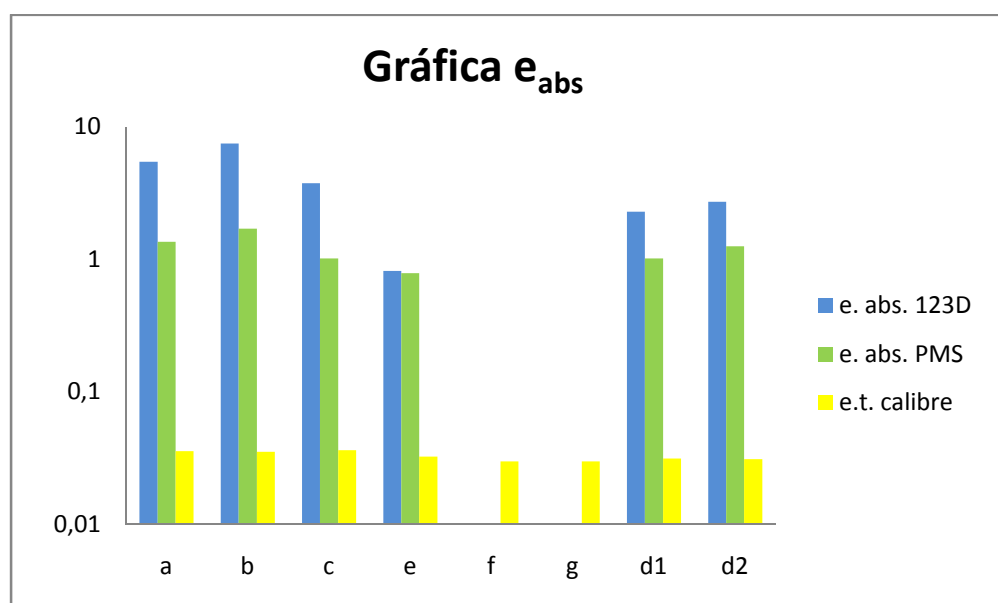


Figura 4.14: Gráfica error absoluto detalle 4.

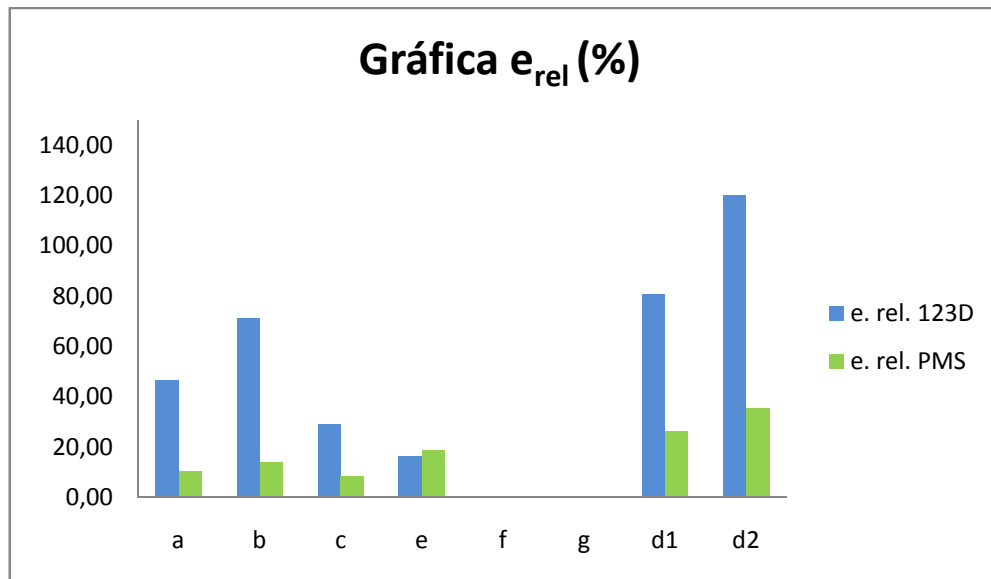


Figura 4.15: Gráfica error relativo detalle 4.

Detalle 5

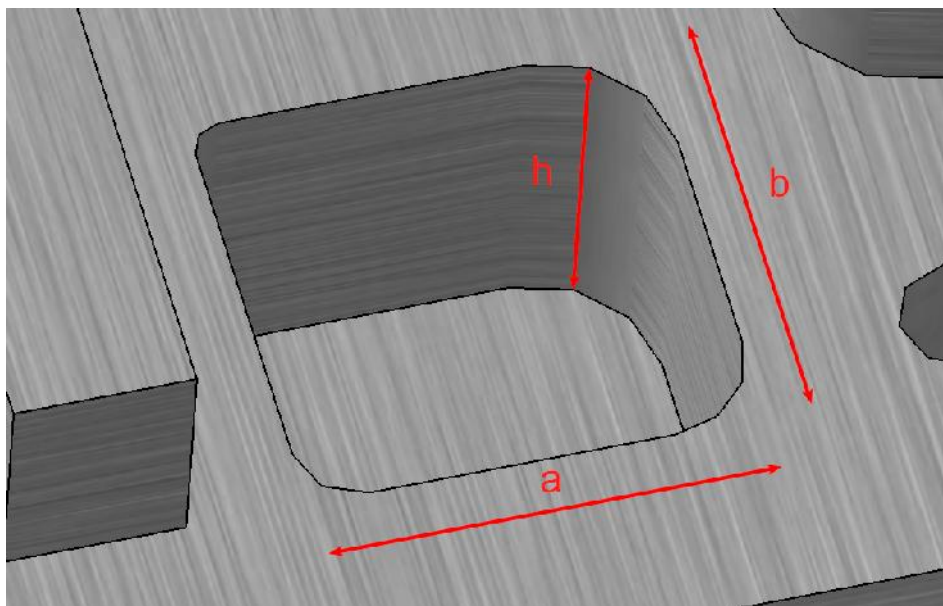


Figura 4.16: Captura detalle 5.

Tabla 4.9: Mediciones detalle 5.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
a	15	12,20	8,76	11,65
b	15	11,68	7,62	12,02
h	12	11,80	4,91	9,98



Tabla 4.10: Errores detalle 5.

COTA	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
a	0,04	3,44	0,55	28,20	4,72
b	0,04	4,06	0,34	34,76	2,83
h	0,04	6,89	1,82	58,39	18,24
Media	0,04	4,80	0,90	40,45	8,60

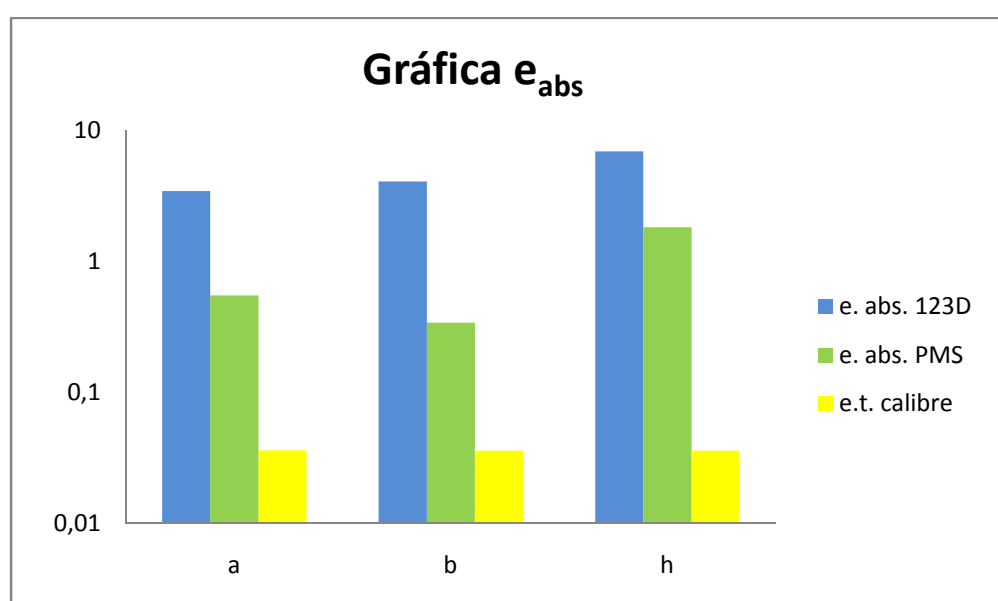


Figura 4.17: Gráfica error absoluto detalle 5.

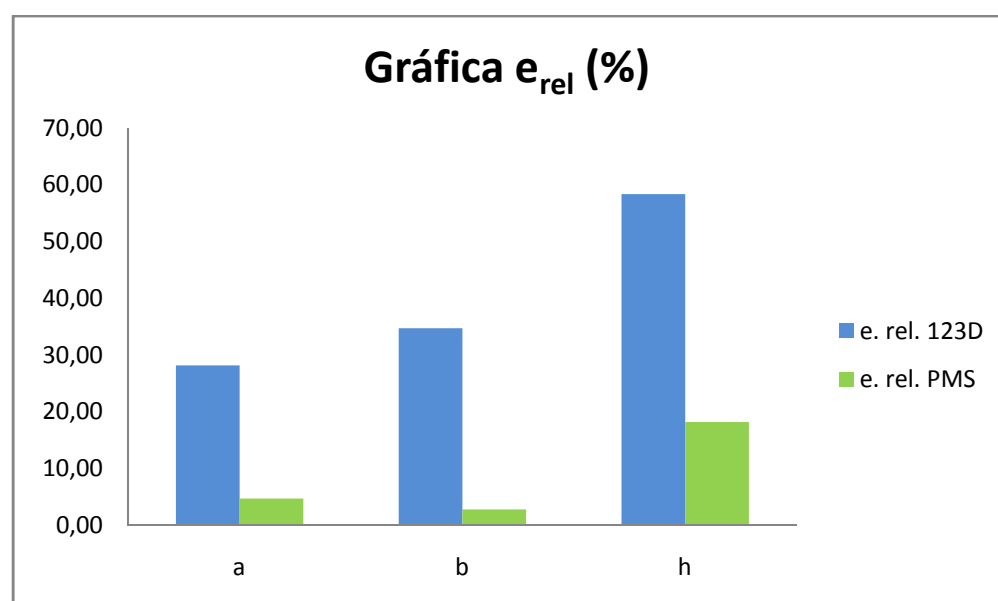


Figura 4.18: Gráfica error relativo detalle 5.



Detalle 6

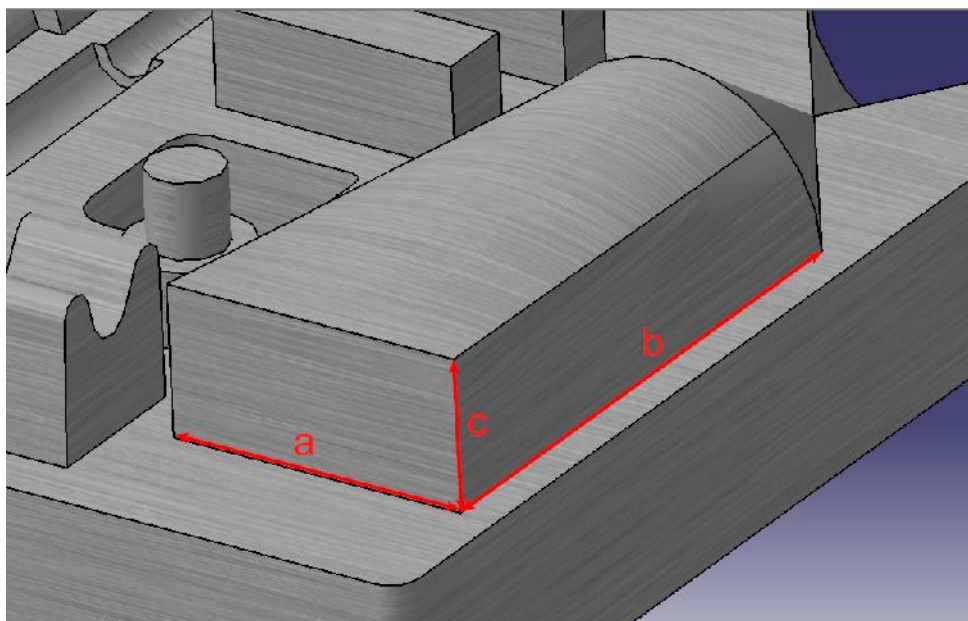


Figura 4.19: Captura detalle 6.

Tabla 4.11: Mediciones detalle 6.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
a	24	24,00	28,33	22,67
b	45,72	45,00	51,2	46,25
c	12	12,00	16,03	12,98

Tabla 4.12: Errores detalle 6.

COTA	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
a	0,04	4,33	1,33	18,04	5,87
b	0,05	6,20	1,25	13,78	2,70
c	0,04	4,03	0,98	33,58	7,55
Media	0,04	4,85	1,19	21,80	5,37

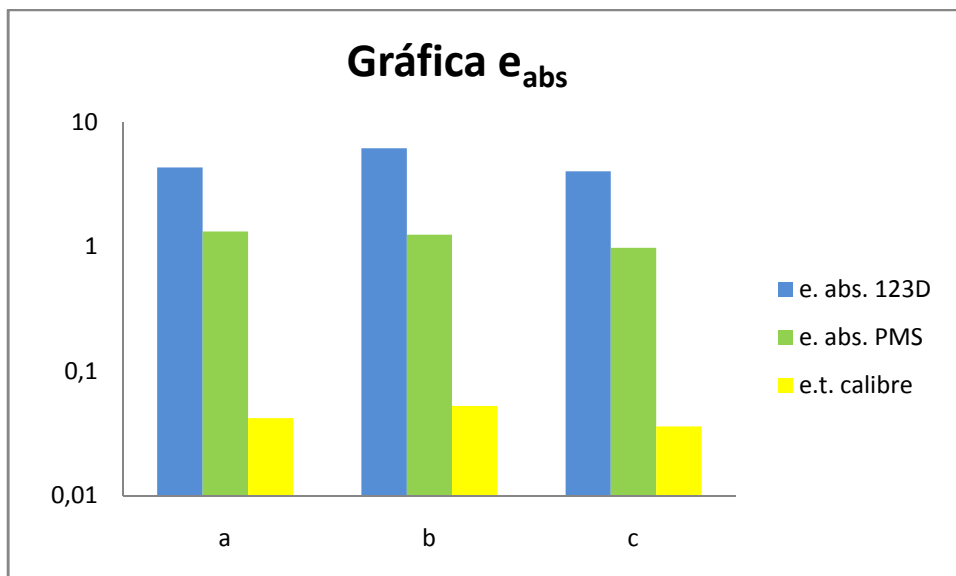


Figura 4.20: Gráfica error absoluto detalle 6.

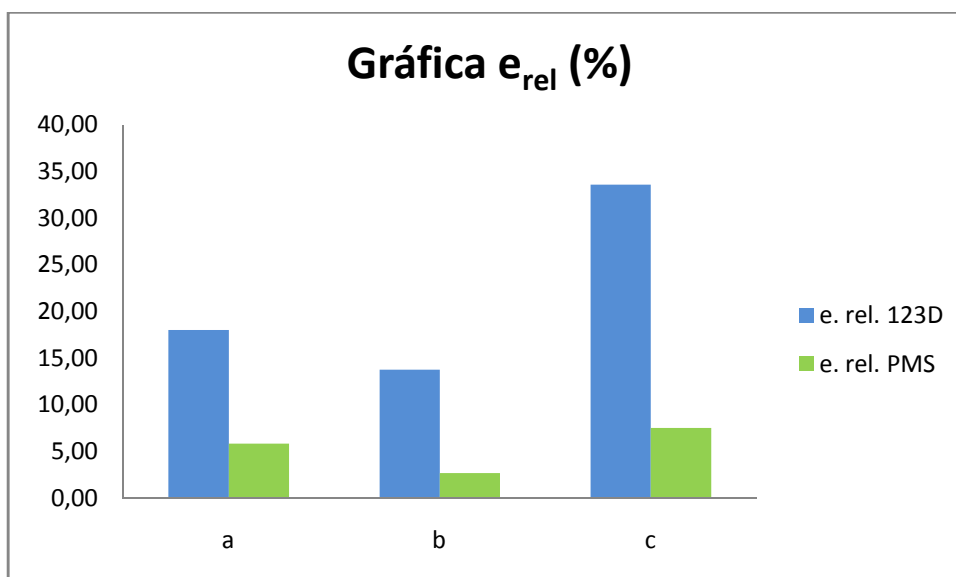


Figura 4.21: Gráfica error relativo detalle 6.



Detalle 7

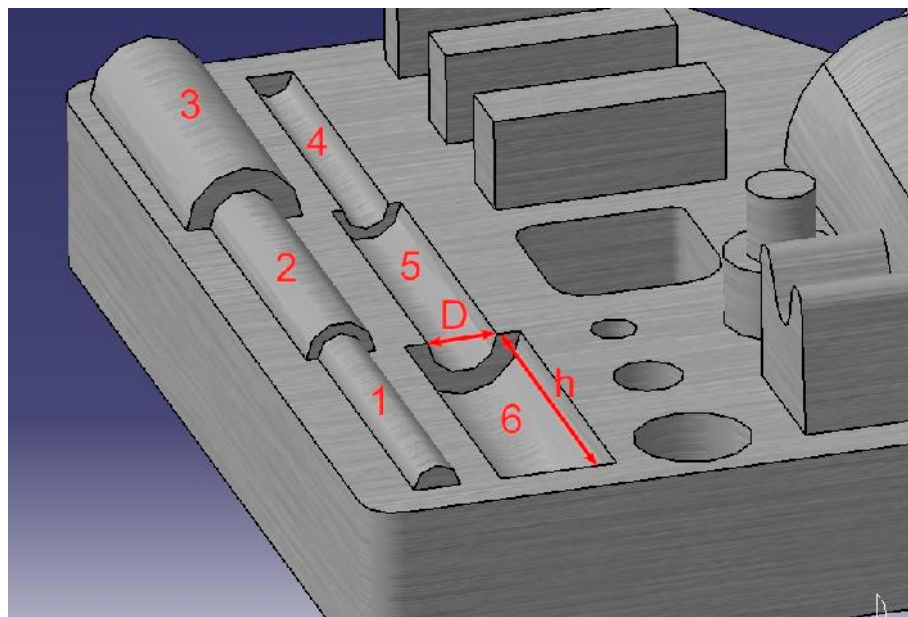


Figura 4.22: Captura detalle 7.

Tabla 4.13: Mediciones detalle 7.

COTA	IDEAL (mm)	REAL (mm)	Autodesk 123D Catch (mm)	PhotoModeler Scanner 7(mm)
D ₁	4	6,00	2,80	6,65
h ₁	28	-	-	-
D ₂	6	8,00	7,27	7,27
h ₂	28	-	-	-
D ₃	10	11,30	5,80	12,28
h ₃	28	27,61	31,61	29,01
D ₄	4	5,00	2,03	3,82
h ₄	28	28,39	33,12	26,64
D ₅	6	7,50	2,96	8,26
h ₅	28	27,88	33,40	28,78
D ₆	10	12,00	6,80	10,54
h ₆	28	27,30	32,78	28,06



Tabla 4.14: Errores detalle 7.

COTA	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
D ₁	0,03	3,20	0,65	53,33	9,77
h ₁	0,03	-	-	-	-
D ₂	0,03	3,62	0,73	45,25	10,04
h ₂	0,03	-	-	-	-
D ₃	0,04	5,50	0,98	48,67	7,98
h ₃	0,04	3,99	1,40	14,45	4,83
D ₄	0,03	2,97	1,18	59,40	30,89
h ₄	0,04	4,73	1,75	16,66	6,57
D ₅	0,03	4,54	0,76	60,53	9,20
h ₅	0,04	5,52	0,90	19,80	3,13
D ₆	0,04	5,20	1,46	43,33	13,85
h ₆	0,04	5,48	0,76	20,07	2,71
Media	0,04	4,65	1,06	38,15	9,90

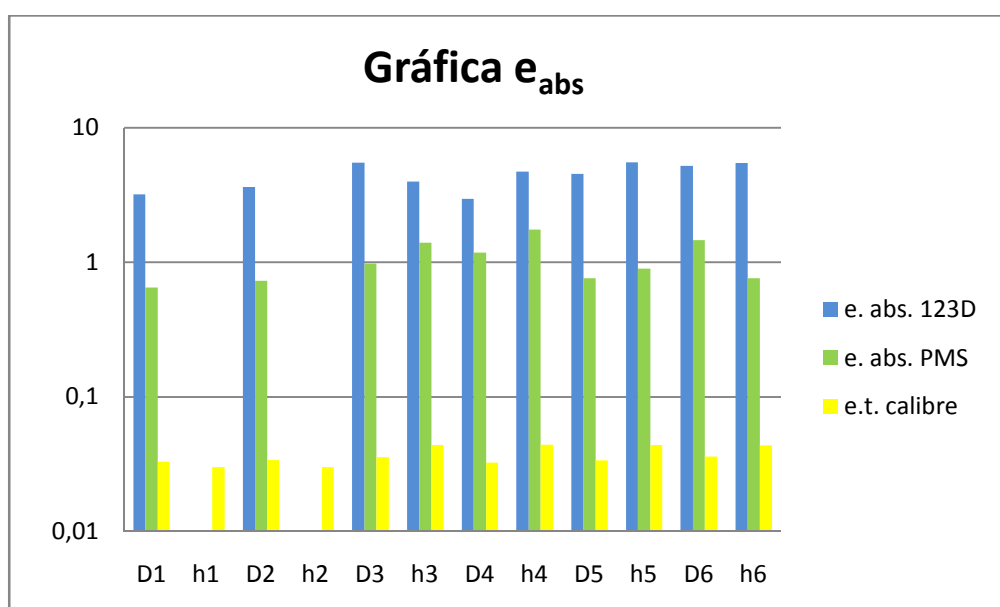


Figura 4.23: Gráfica error absoluto figura 7.

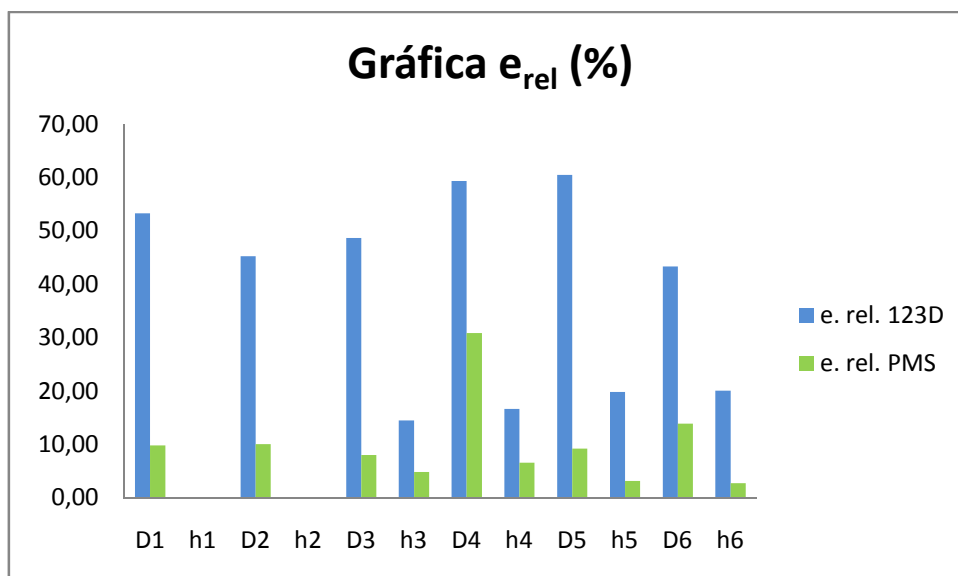


Figura 4.24: Gráfica error relativo detalle 7.

En cuantos a los errores globales, de todas las mediciones efectuadas, se obtienen los resultados de la tabla 4.15:

Tabla 4.15: Errores generales de la pieza

	e_t calibre (mm)	$ e_{abs} $ 123D (mm)	$ e_{abs} $ PMS (mm)	e_{rel} 123D (%)	e_{rel} PMS (%)
Media	0,04	4,57	1,51	49,36	17,57

Un detalle importante es que, en la dirección del eje z es dónde más error se obtiene, en torno al 20% en el caso del Photomodeler Scanner, eso se debe a la dificultad que tiene el programa a la hora de poder calcular correctamente la distancia entre los planos que el programa estima como referencia, es decir, la profundidad de los taladros, el relieve de la pieza.

Por otro lado, como se indica en varias ocasiones en este Proyecto, también se efectuó el mismo trabajo pero con una cámara Nikon P7100. El error tan grande cometido con la misma y sus resultados tan groseros, se optó por no incluir los datos de la misma en este estudio.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**





5 CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos, podemos sacar las siguientes conclusiones:

En primer lugar, el error cometido es lo suficientemente significativo como para no ser una herramienta fiable a la hora de obtener planimetría de un objeto de pequeñas proporciones.

Un error relativo del 17,57% en el caso del Photomodeler Scanner, en una pieza que su dimensión mayor son 92 mm, es un error considerable. El 49,36 % producido por el Autodesk 123D Catch implica un desfase todavía mayor sobre las medidas reales de la pieza test, que dadas sus dimensiones, no es admisible para un trabajo profesional. Si tenemos en cuenta que el material fotográfico es, posiblemente el mejor del mercado en la actualidad, hace difícil que esta técnica sea útil para el objeto de este estudio.

De los dos programas analizados, el Photomodeler es, de largo, con el que más precisión se obtiene. Tiene un planteamiento más técnico, requiere mayor cantidad de tiempo en su manejo y ello se traduce en unos mejores resultados.

El Autodesk 123D Catch, ofrece una herramienta sencilla al usuario, con el que poder restituir un objeto 3D, sin ninguna pretensión mayor que la del empleo ornamental o como reclamo de una presentación, un videojuego, etc.

Por tanto, ¿no son fiables las actuales técnicas fotogramétricas para la restitución de precisión y la generación de planimetría? La respuesta es, sí. Es una herramienta muy potente, que no requiere de otros elementos que no sean material fotográfico y el propio programa, pero no para objetos como los descritos en este Proyecto Fin de Carrera sino para objetos mayores, edificios, puentes, etc. En estos casos se conseguirían errores de pocos centímetros en dimensiones de unas decenas de metros, un error mucho más admisible que el conseguido.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**





6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] CUELI LÓPEZ, JORGE TOMÁS. “*Fotogrametría práctica. Tutorial Photomodeler*”. Ediciones Tantín, 2011. ISBN: 978-84-96920-93.
- [2] DELGADO CABRERA, JOSÉ MARÍA. “Photoshop CS6. Manuales imprescindibles”. ANAYA Multimedia, 2012. ISBN: 9788441532205.
- [3] KALPAKJIAN, SEROPE. “*Manufactura, ingeniería y tecnología*”. Quinta edición. Pearson Educación, 2008, México. ISBN: 978-970-26-1026-7.
- [4] LAMBÁS PÉREZ, JESÚS. “*Diseño gráfico con CATIA. Curso práctico con los módulos Sketcher y Part Design*”. RA-MA Editorial, 2006. ISBN: 978-84-7897-6966.
- [5] SENABRE BLANES, CAROLINA. “*Diseño mecánico con Autodesk Inventor paso a paso*”. Editorial Club Universitario, 2010. ISBN: 9788484548669.

Referencias Web

- [1] <http://daetsigct.jimdo.com/apuntes-y-ex%C3%A1menes/optativas-intensificaci%C3%B3n-cartograf%C3%ADa-y-sig-i-t-t/laboratorio-de-fotogrametr%C3%ADa-digital/>
(Laboratorio de fotogrametría digital).
- [2] <http://dibujoarqueologico3d.blogspot.com.es/2011/05/manual-para-hacer-de-una-camara.html>
(Manual para hacer de una cámara fotográfica, un escaner 3D).
- [3] <http://personales.upv.es/jogomez/labvir/material/errores.htm>
(Teoría de errores. Universidad Politécnica de Valencia).



- [4] http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/Fotogrametria/index_file/Page361.htm
(Historia de la fotogrametría).
- [5] http://www.alarsis.com/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=91&lang=es
(Alarsis Fresadora FR 180)
- [6] http://www.fresadorasnc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=79&Itemid=85
(Software CAM 3D).
- [7] <http://www.genbeta.com/imagen-digital/convierte-tus-fotografias-en-modelos-3d>
(Convierte tus fotografías en modelos 3D).
- [8] <http://www.geociencias.cl/paginas/descargas.htm>
(Apuntes fotogrametría).
- [9] http://www.nikon.es/es_ES
(Nikon España)
- [10] <http://www.motivarte.com/diccionario.htm>
(Diccionario de términos fotogramétricos).
- [11] <http://www.quesabesde.com/camdig/glosario.asp?>
(Cámaras digitales y fotografía: glosario).
- [12] <http://www.secft.org/>
(Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección).
- [13] <http://www.worldphotogrammetry.com/>
(World Photogrammetry. La Web de fotogrametría para todos).



ANEXOS



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**





ANEXO A -

GLOSARIO DE TÉRMINOS FOTOGRÁFICOS Y FOTOGRAMÉTRICOS

❖ Aberración:

Deficiencia óptica de un objetivo que da lugar a imágenes faltas de nitidez o deformadas. Ningún objetivo es perfecto y la corrección de las aberraciones es uno de los aspectos más importantes del diseño. Por lo general se logra combinando lentes simples de manera que las aberraciones de una sean corregidas por las aberraciones opuestas de otra. Aunque es relativamente fácil corregir así cualquier aberración particular, es mucho más difícil lograr un equilibrio general, ya que la compensación de un defecto puede incrementar otro. Bajo este punto de vista, el diseño de un objetivo es siempre un compromiso.

Hay dos tipos principales de aberración: la aberración **esférica**, o perturbación del foco, y la **cromática**, o perturbación del color. Ambas se deben al hecho de que los rayos luminosos que atraviesan una lente simple no enfocan todos en un mismo punto, porque los que la cruzan por su parte exterior sufren una refracción mayor que los que lo hacen por el centro, y en el caso de una lente convexa, se enfocan más cerca de ésta.

De la misma forma, las diferentes longitudes de onda de los colores del espectro que forman la luz blanca están sometidas a diferentes grados de refracción, de manera que la luz azul forma el foco en un punto más próximo a la lente que la roja. Los objetivos corregidos para enfocar dos de los colores primarios en un mismo plano mediante el empleo de diferentes tipos de vidrio se llaman **acromáticos**; casi todos los empleados actualmente pertenecen a esta categoría. Los corregidos para el azul, el verde y el rojo se llaman **apocromáticos**; son muy caros de fabricar y se reservan a trabajos técnicos.

Las consecuencias de las aberraciones esférica y cromática se minimizan trabajando a aberturas pequeñas, porque así todos los rayos luminosos se ven obligados a atravesar el objetivo por el centro, donde la curvatura y las diferencias de refracción son mínimas. Ambos tipos de distorsión afectan a las imágenes formadas por cualquier clase de rayo luminoso, incluso los que atraviesan el objetivo a lo largo del eje, pero hay otras cinco que afectan sólo a las imágenes no axiales y que, por tanto, son más importantes en los objetivos gran angular:



1) **Aberración cromática lateral**, que determina la alteración del tamaño de la imagen en función del color; cuanto más oblicua sea la imagen, tanto mayor será la deformación provocada por la dispersión de las diferentes longitudes de onda de la luz. La aberración no se corrige diafragmando.

2) **Coma**, una forma exagerada de aberración esférica que transforma las imágenes de los puntos no axiales en series de diminutos círculos solapados dispuestos de forma parecida a la de una cola de cometa.

3) **Astigmatismo**, o incapacidad de enfocar en un mismo plano las líneas perpendiculares situadas en el perímetro del campo; el resultado es una imagen comprometida, con bordes difusos.

4) **Curvatura de campo**, o incapacidad del objetivo para producir una imagen nítida sobre el campo plano de la película; las imágenes de objetos lejanos se forman más cerca del objetivo que las de los próximos, de manera que cuando se trata de formar la imagen de una superficie plana y paralela al plano focal, los bordes de la misma se enfocan más lejos del objetivo que la parte central. En un objetivo sin corregir para esta aberración es imposible enfocar a la vez el centro y los bordes.

5) **Distorsión** o dispersión de los rayos luminosos no axiales, de forma que el aumento de la imagen varía dentro del plano focal. Afecta pues, a la forma, no a la nitidez. Si los bordes de la imagen se abomban hacia afuera, se habla de **distorsión en barrilete**; si se curvan hacia adentro, de **distorsión en almohadón**. La coma, el astigmatismo y la curvatura de campo se reducen diafragmando, pero no la distorsión, que varía con la abertura relativa. Los buenos objetivos son actualmente de tan buena calidad que el usuario casi nunca tiene que preocuparse de las aberraciones, aunque los zoom raramente alcanzan el nivel de los de focal fija equivalentes. Los objetivos convencionales pueden enfrentarse con casi cualquier situación, aunque hay cada vez más objetivos especializados. Los empleados en fotografía aérea, por ejemplo, están diseñados para rendir un campo lo más plano posible y una nitidez muy alta en toda el área de imagen cuando están enfocados a infinito y funcionan a elevadas velocidades de obturación (para neutralizar el movimiento del aparato) y, en consecuencia, a aberturas grandes; la corrección cromática está pensada para compensar los filtros amarillos,



naranjas o rojos con que suelen usarse. Las aberraciones pueden también aprovecharse creativamente; así, los objetivos llamados suavizadores, estilizadísimos en retrato, tienen una aberración esférica deliberadamente alta.

❖ Abertura:

Orificio practicado en la parte anterior de la cámara para dar paso a la luz. Suele ser circular y, salvo en cámaras muy elementales, de tamaño variable para regular la cantidad de luz que atraviesa el objetivo y llega a la película.

Se llama **abertura efectiva** al diámetro del haz luminoso que atraviesa el elemento anterior del objetivo a lo largo del eje. Salvo en los raros instrumentos en que la abertura está por delante del objetivo, la abertura efectiva es un poco mayor que la real, porque la luz se refracta al atravesar la primera lente y el haz se estrecha; no obstante la abertura efectiva varía proporcionalmente a la real, cuyo diámetro debe modificarse por medio de un diafragma iris.

La **abertura relativa** es la relación entre la longitud focal del objetivo y la abertura efectiva. Así si el objetivo tiene una focal de 50 mm y la abertura efectiva es de 25 mm., la relativa será de $50/25=2$, resultado que suele expresarse como número f, en este caso f2; a mayor número f, menor abertura. La serie de valores de abertura normalmente grabada en los objetivos es 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16 y 22; cada paso supone (aproximadamente) la mitad de luz que el anterior o el doble que el siguiente. Algunos objetivos superan los límites superior o inferior de la serie indicada; si la abertura máxima es mayor se dice que el objetivo es rápido, porque la gran cantidad de luz a que da paso permite emplear una velocidad de obturación más alta, cualidad muy de apreciar cuando se trabaja en lugares poco iluminados o cuando las circunstancias, fotografía deportiva, por ejemplo, aconsejan el empleo de velocidades de obturación altas. La consideración de rápido depende del estado del diseño de objetivos en cada momento; en la actualidad, un 50 mm con más de f2.8 pueden describirse como tales. Cuanto mayor sea la rapidez (o luminosidad) del objetivo, tanto más difícil es su fabricación y, por tanto, alto su precio.



❖ **Ángulo de toma:**

Ángulo cubierto por un objetivo. En una cámara de 35 mm., el objetivo normal de 50 mm cubre un ángulo de unos 45°, más o menos equivalente al de la visión normal humana (se entiende por normal el ángulo sobre el que los ojos ven una imagen enfocada: el ángulo realmente cubierto por la visión humana es de 150° -170°, pero los objetos de la periferia aparecen indistintos. Subjetivamente, el ángulo parece mayor que el de un objetivo normal, pero ello se debe a que los ojos se mueven continuamente y el cerebro procesa la información y recrea una panorámica general; mirar con la fijeza de un objetivo es completamente innatural). Un objetivo de 18 mm tiene un ángulo de toma de unos 73° y de alrededor de 20° un 135 mm. Este ángulo puede expresarse más científicamente como el subtendido por la diagonal del plano focal o de la película en el **punto nodal** posterior del objetivo. Así, cuanto mayor sea el formato del negativo, mayor será el ángulo de toma para cualquier longitud focal. Por ejemplo: en una cámara de gran formato, un 50 mm es en realidad un gran angular, y en una cámara que use película en rollo de formato 120 el objetivo normal tiene alrededor de 80mm. De la misma forma, el objetivo normal de una cámara de formato 110 tiene una longitud focal de unos 24 mm.

❖ **Autoenfoco:**

El autoenfoco es un mecanismo automático de focalización del objetivo. Algunas cámaras digitales para profesionales sacrifican éste sistema por el manual.

❖ **Autoexposición:**

El sistema de auto exposición establece automáticamente la velocidad de obturación y la abertura del diafragma de la cámara fotográfica según las condiciones de luz existentes.

❖ **Autoexposición programada:**

Modo de disparo que ofrece al fotógrafo la opción de escoger un tipo de exposición concreta tipificada por la cámara. Es decir, la cámara digital puede almacenar la mejor exposición para un tipo de fotografía, es decir, la abertura y velocidad de obturación adecuada para, por ejemplo, un retrato, una puesta de sol, un día nublado, etc.



❖ **Cámara compacta:**

Término utilizado para referirse al diseño de aquellas cámaras en que el visor de imagen es independiente de la lente. Esta separación es la causante del efecto de paralaje.

❖ **Cámara réflex:**

Tipo de cámaras en las que, a diferencia de las cámaras compactas, la porción de imagen que capta la lente coincide exactamente con lo que puede visualizarse a través del visor de imagen.

❖ **CCD:**

Acrónimo de Charge Coupled Device, que puede traducirse por "dispositivo de acoplamiento por carga". Familiarmente, se conoce con este nombre al chip integrado por millones de diodos fotosensibles que recoge el haz de luz que pasa por el objetivo, aunque en realidad esta denominación hace referencia a cada uno de esos fotosensores capaces de generar un voltaje cuando entran en contacto con la luz (fotones). La electrónica del circuito es la encargada de recoger y coordinar la corriente generada por todos y cada uno de los captadores. Tras su correspondiente procesado, la señal original se convierte en una representación electrónica del encuadre. Por este motivo, se suele decir que el captador CCD equivale al negativo químico convencional, puesto que la función que desempeñan es la misma.

❖ **CMOS:**

Al igual que el sensor CCD, se basa en el efecto fotoeléctrico. Está formado por numerosos fotositos, uno para cada píxel, que producen una corriente eléctrica que varía en función de la intensidad de luz recibida. En el CMOS, a diferencia del CCD se incorpora un amplificador de la señal eléctrica en cada fotosito y es común incluir el conversor digital en el propio chip. En un CCD se tiene que enviar la señal eléctrica producida por cada fotosito al exterior y desde allí se amplifica. A la computadora. La ventaja es que la electrónica puede leer directamente la señal de cada píxel con lo que se soluciona el problema conocido como *blooming*, por el que la recepción de una gran intensidad lumínica en un punto influye en los píxeles adyacentes (un brillo fuerte produce líneas blancas en la imagen). La desventaja es



que entre los receptores de luz (fotositos) se encuentra mucha electrónica que no es sensible a la luz, lo que implica que no pueda captar tanta luz en una misma superficie del chip. La solución al problema vino no sólo por una mayor densidad de integración, por lo que la electrónica no sensible se reducía en tamaño, sino por la aplicación de microlentes que a modo de lupa concentran la luz de cada celda en su fotosito. Contiene un filtro para recoger solo la luz roja, otros para la verde y otros para el azul.

Ventajas

- ✓ Consumo eléctrico muy inferior.
- ✓ Económico (necesita pocos componentes externos).
- ✓ Lectura simultánea de mayor número de píxeles.
- ✓ El conversor digital puede estar integrado en el mismo chip.
- ✓ Escaso *Blooming* ("*Smear*") o inexistente.
- ✓ Mayor flexibilidad en la lectura (Previsualización más rápida, vídeo,...)
- ✓ Los píxeles pueden ser expuestos y leídos simultáneamente.
- ✓ Otras topologías posibles (el sensor SuperCCD de Fujifilm emplea una construcción en forma de panel (octogonal) para los píxeles).
- ✓ Distintos tipos de píxeles (según tamaño y sensibilidad) combinables.
- ✓ Muy alta frecuencia de imagen en comparación a un CCD del mismo tamaño.

Inconvenientes

- ✓ Menor superficie receptora de la luz por píxel.
- ✓ Menor uniformidad de los píxeles (mayor ruido de patrón fijo-FPN).
- ✓ Efecto "*jelly*" o inestabilidad en la imagen con movimientos rápidos o flashes debido (se tuerce el video) al tipo de obturación giratoria que utiliza.

❖ Diafragma:

Parte de la cámara que determina el tamaño de la abertura. En su forma más elemental, usada en las cámaras más antiguas, no era más que una placa perforada. Los primitivos diafragmas ajustables consistían en una pletina metálica con varios orificios de tamaños diferentes que se deslizaba o giraba ante el objetivo. Actualmente casi todos los diafragmas ajustables adoptan



el diseño llamado iris, que consiste en un juego de laminillas metálicas imbricadas que determinan entre sí una abertura de forma aproximadamente circular y diámetro continuamente variable que se controla por medio de un anillo dispuesto en el cuerpo del objetivo. El diafragma puede ir montado por delante o por detrás de aquel, aunque en los diseños compuestos va casi siempre en el centro del sistema óptico. El llamado **diafragma-obturador** es un mecanismo similar en el que las laminillas pueden cerrar por completo la abertura y combinan así en un solo dispositivo las funciones del diafragma y el obturador; esta disposición impide, naturalmente la lectura y encuadre a través del objetivo.

❖ **Distancia focal:**

Distancia en milímetros desde el centro óptico del objetivo hasta el plano focal donde se forma la imagen, cuando la lente está enfocada hacia el infinito. A mayor distancia focal, menor es el ángulo de vista y mayor el tamaño de los objetos enfocados.

❖ **Enfoque:**

El enfoque nos permite colocar en el plano focal al sujeto que queremos que aparezca nítido en la imagen final. El enfoque puede ser automático, manual o fijo. El automático utiliza un haz infrarrojo para determinar la distancia respecto a la cámara a la que se encuentra el sujeto central de la imagen y enfocar a partir de esta el objetivo. El manual permite realizar al usuario dicha operación para conseguir el efecto óptico que desee. El enfoque fijo no se puede ajustar, pero puede incorporar distintos parámetros establecidos de enfoque.

❖ **Enfoque macro:**

El dispositivo de macro-objetivo permite enfocar y captar objetos desde muy cerca. Es ideal para tomar fotografías de objetos pequeños. El alcance macro se especifica en centímetros y varía de una cámara a otra.



❖ **Enfoque manual:**

Tipo de enfoque que permite al usuario controlar la nitidez final de la imagen, pudiendo conseguir un resultado más creativo. En vez de enfocarse automáticamente el centro de la imagen, el enfoque manual permite enfocar cualquier punto de ésta.

❖ **EXIF:**

Información escrita sobre la fotografía que la cámara digital incluye en un borde de la imagen cuando es comprimida en formato JPEG. Algunos programas permiten leer dicha información.

❖ **Exposición:**

Término que se refiere a la cantidad de luz que entra en la cámara, y que puede controlarse mediante la abertura del diafragma y la velocidad de obturación.

❖ **Exposición manual:**

La exposición manual permite al usuario controlar tanto la abertura del diafragma como la velocidad de obturación al realizar una fotografía.

❖ **Flash:**

El flash es un haz de luz que puede activarse al disparar la cámara en situaciones de oscuridad, poca iluminación o grandes contrastes de brillo y sombras. La mayoría de cámaras digitales llevan incorporado un sistema de flash, que puede ser automático o manual. El flash puede ser externo y conectarse a la cámara mediante un sincronizador o una zapata para flash.

❖ **ISO, sensibilidad:**

Medición numérica que determina la sensibilidad a la luz del sensor de imagen en las cámaras digitales y, por tanto, el tiempo de exposición. Aún tratándose de un sistema de medición propio de la película fotográfica de las cámaras analógicas, se utiliza del mismo modo con las



cámaras digitales. Cuanto más alto es el ISO, se dice que más rápido es el film, por lo que el tiempo de exposición será menor. Las cámaras digitales tienen una variedad más amplia de sensibilidad que la de las películas analógicas.

❖ **Objetivo:**

Se denomina objetivo al dispositivo que contiene el conjunto de lentes convergentes y divergentes y, en algunos casos, el sistema de enfoque y/o obturación, que forman parte de la óptica de una cámara tanto fotográfica como de vídeo.

Su función es redireccionar los haces de luz para crear una imagen "óptica" en un soporte fotosensible, permitir un enfoque lo más preciso posible y mantener una colimación constante de los elementos ópticos. Este soporte fue evolucionando de las primeras etapas de la fotografía química, a los sensores de imagen en el caso de una cámara digital.

Se pueden distinguir los siguientes tipos:

Ojos de pez. Son los objetivos con el mayor ángulo de visión, alcanzan los 180° o más, y su distancia focal suele estar entre los 6 y los 16mm. Estos objetivos suelen distorsionar demasiado las líneas rectas, por lo que se suelen usar buscando ese efecto tan característico que producen.

Gran angular. Suelen denominarse así a los objetivos con focales entre los 18 y 35mm, con ángulos de visión que van de los 180° a los 63°. Son objetivos que producen distorsión en los márgenes, pero según su calidad esto puede estar más o menos acentuado. Ofrecen mucho realismo a nuestras fotos, ya que casi todo lo pueden sacar nítido, es decir, tienen mucha profundidad de campo. Pero hay que tener en cuenta que cuanto más se acerque un objeto a la cámara más distorsionado se verá. Se suelen utilizar en espacios abiertos como la fotografía de paisaje, para la fotografía de arquitectura o en espacios interiores, y suelen ser objetivos bastante luminosos.

Objetivo Normal. El objetivo normal es aquel que suele dar un ángulo de visión muy parecido al del ojo humano, esto es, unos 45°. Y además no produce distorsión alguna



en las líneas. Lo normal que sea de 50mm. Son los más luminosos pudiendo llegar a una apertura de 1.4f.

Objetivos Macro. Permiten el enfoque a muy corta distancia. La denominación *macro* aplica cuando la imagen proyectada, sobre la superficie fotosensible, tiene al menos el mismo tamaño del objeto fotografiado.

Teleobjetivos. Poseen longitudes focales entre 70 a 300 mm, y con un ángulo de visión menor a 40°. Tienen una profundidad de campo reducida respecto a las longitudes focales más cortas. Como característica de su imagen, comprimen la perspectiva mostrando objetos relativamente lejanos en sí a un tamaño comparativo similar.

❖ Obturador:

Mecanismo de la cámara que se abre y cierra, permitiendo que la luz alcance el sensor de imagen con menor o mayor permanencia. La velocidad con que se abre y cierra viene especificada por la denominada velocidad de obturación.

❖ Paralaje:

Desplazamiento aparente de un objeto al cambiar de punto de vista. En fotografía, la expresión error de paralaje se usa para referirse a la discrepancia entre la imagen de un motivo observada por el visor y la registrada en la película cuando el visor es independiente del objetivo y está separado de él, por lo que ve al motivo bajo un punto de vista ligeramente diferente (es lo que ocurre, por ejemplo, en las cámaras de 35 mm no réflex y en las réflex de dos objetivos). Este error de paralaje suele hacerse manifiesto a distancias inferiores a unos 2 m aproximadamente (depende de la longitud focal del objetivo empleado), situación en la que es necesario introducir algún tipo de corrección. Para ello, las cámaras no réflex suelen tener unas líneas en el visor que señalan la reducción del campo a poca distancia; en algunas TLR estas líneas son sustituidas por una barra o una cortinilla que se desplaza sobre la pantalla de enfoque y señala la parte del campo cortada a las distintas distancias. En estas cámaras también se compensa el paralaje levantándolas, tras encuadrar y enfocar, a una altura igual a la distancia que separa los dos objetivos; esta corrección puede hacerse midiendo dicha



distancia o, si hace falta una exactitud mayor, con ayuda de un sencillo accesorio llamado Paramender, que se monta entre la cámara y el trípode. En todo caso, la única forma de hacer primeros planos encuadrados con exactitud es utilizar una SLR o una cámara de gran formato, que presentan en sus pantallas de enfoque exactamente la misma imagen que aparecerá en la película y que, por tanto, están libres de error de paralaje.

❖ **Profundidad de campo:**

Distancia entre el punto más cercano y el más lejano del sujeto de la fotografía que aparecen nítidos. La profundidad de campo viene determinada, básicamente y entre otras cosas, por la abertura de la lente de la cámara. Cuanto menor es la abertura, más profundidad de campo se consigue.

❖ **RAW, formato:**

RAW (en inglés *crudo*) es un formato de archivo digital de imágenes que contiene la totalidad de los datos de la imagen tal como ha sido captada por el sensor digital de la cámara fotográfica. El formato **RAW** no suele llevar aplicada compresión (sea con o sin pérdidas) como ocurre con el popular JPEG, aunque en algunos casos sí se emplea.

Debido a que **RAW** contiene la totalidad de los datos de la imagen captada por la cámara y una mayor profundidad de color (por lo general 30 ó 36 bits/píxel), sus ficheros tienen un tamaño de archivo muy grande, salvo cuando incorporan compresión, en cuyo caso no aumenta tanto.

Las cámaras profesionales y semiprofesionales ofrecen por lo general la opción de grabar imágenes en el formato **RAW**, además del formato **JPEG** y eventualmente otros. También algunas cámaras compactas de nivel alto ofrecen esta posibilidad.

El formato **RAW** se usa en aquellos casos en los que interesa archivar una fotografía tal como ha sido captada por el sensor digital, sin ningún tipo de manipulación por la cámara, para poder procesarla posteriormente en el ordenador mediante un programa de tratamiento de imágenes.



El gran inconveniente de los formatos *RAW* es la falta de estandarización, cada fabricante usa su formato, lo que puede producir incompatibilidades o que el formato no se pueda usar en el futuro, por ello se pide que exista un formato *RAW* abierto; es lo que hacen en openRAW.org. Una alternativa abierta podría ser el *Digital Negative Format* o *DNG* de Adobe.

Por asociación con la fotografía analógica, también suele conocerse el formato *RAW* como negativo digital.

❖ **Resolución:**

Término que hace referencia a la calidad de la imagen que una cámara digital es capaz de obtener. Ésta depende del número de píxeles que incluya. En concreto, la resolución se obtiene multiplicando el número de píxeles horizontales por los verticales. La resolución puede ser óptica (la resolución real, de acuerdo con el número de fotodiodos existentes en el sensor de imagen) o interpolada (añade más píxeles a la imagen para hacerla más grande).

❖ **Sensor de imagen:**

El sensor de imagen de la cámara es el dispositivo que permite capturar la imagen. El sensor de imagen está formado por fotodiodos que reciben el impacto de la luz y la transforman en píxeles, es decir, en información digital. A cada fotodiodo le corresponde un píxel. El sensor de imagen es un mecanismo analógico, pero la información que captura la digitaliza un conversor A/D. Hay diversos tipos de sensores de imagen, en función del fabricante. Sony, por ejemplo, ha utilizado en sus últimos modelos el CCD SuperHad, y Fujifilm, el SuperCCD.

❖ **Velocidad de obturación:**

Cantidad de tiempo, en fracciones de segundo, que el obturador permanece abierto cuando se realiza una fotografía. Para congelar una imagen en movimiento hará falta una velocidad de obturación alta.



❖ **Visor de imagen:**

A través del visor podemos visualizar y componer la imagen que vamos a capturar. Existen tres tipos de visores: el mayoritario en las cámaras digitales es el óptico; menos común es el visor electrónico, y el mejor y aún más difícil de encontrar es el visor réflex. Además, existen cámaras que no tienen visor de imagen, por lo que ésta debe encuadrarse con la ayuda del monitor LCD.

❖ **Zoom digital:**

El zoom digital sencillamente recorta el centro de una imagen y la muestra magnificada mediante el sistema de interpolación, lo cual incide en una pérdida de su resolución original.

❖ **Zoom óptico:**

La cámara utiliza un objetivo multifocal para engrandecer la imagen. De este modo, variando la distancia focal, podemos acercarnos o alejarnos del sujeto encuadrado. El zoom óptico es distinto del zoom digital, que magnifica la parte seleccionada de la imagen digitalizada por interpolación.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



ANEXO B -

ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL FOTOGRÁFICO.

➤ **Nikon D800E**



Figura B.1: Cámara Nikon D800E (Nikon).

Tabla B.1: Especificaciones Nikon D800E (Nikon).

Tipo	Cámara réflex digital de objetivo único
Montura del objetivo	Montura F Nikon (con acoplamiento AF y contactos AF)
Píxeles efectivos	36,3 millones
Sensor de imagen	Sensor CMOS de 35,9 x 24,0 mm (formato FX de Nikon)
Píxeles totales	36,8 millones
Sistema de reducción del polvo	Limpieza del sensor de imagen, datos de referencia de eliminación de polvo de la imagen (se requiere el software opcional Capture NX 2)

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.1: *Continuación*

Tamaño de imagen (píxeles)	FX (36 x 24) Zona de imagen: 7.360 x 4.912 (L), 5.520 x 3.680 (M), 3.680 x 2.456 (S) 1,2 aumentos (30 x 20) Zona de imagen: 6.144 x 4.080 (L), 4.608 x 3.056 (M), 3.072 x 2.040 (S) DX (24 x 16) Zona de imagen: 4.800 x 3.200 (L), 3.600 x 2.400 (M), 2.400 x 1.600 (S) 5: 4 (30 x 24) Zona de imagen: 6.144 x 4.912 (L), 4.608 x 3.680 (M), 3.072 x 2.456 (S) Fotografías de formato FX tomadas en modo live view de vídeo: 6.720 x 3.776 (L), 5.040 x 2.832 (M), 3.360 x 1.888 (S) Fotografías de formato DX tomadas en modo live view de vídeo: 4.800 x 2.704 (L), 3.600 x 2.024 (M), 2.400 x 1.352 (S) Nota: Las fotografías tomadas en modo live view de vídeo tienen una relación de aspecto de 16: 9. Para las fotografías tomadas con la zona de imagen DX (24 x 16) de 1,5 aumentos, se usa un formato basado en DX; para el resto de fotografías, se usa un formato basado en FX.
Formato de archivo	NEF (RAW): 12 o 14 bits, comprimido sin pérdidas, comprimido o sin compresión TIFF (RGB) JPEG: compatible con línea de base JPEG con compresión fina (aprox. 1: 4), normal (aprox. 1: 8) o básica (aprox. 1: 16) (Prioridad al tamaño); está disponible la compresión Calidad óptima NEF (RAW)+JPEG: cada fotografía se graba en los formatos NEF (RAW) y JPEG
Sistema de Picture Control	Se puede seleccionar entre Estándar, Neutro, Vívido, Monocromo, Retrato, Paisaje; se puede modificar el Picture Control seleccionado; almacenamiento de Picture Control personalizados
Soportes	Tarjetas de memoria SD (Secure Digital) y SDHC y SDXC compatibles con UHS-I; tarjetas de memoria CompactFlash Tipo I (compatibles con UDMA)
Doble ranura para tarjetas	Puede utilizarse cualquier tarjeta para el almacenamiento principal o de copia de seguridad o para el almacenamiento independiente de imágenes de formato NEF (RAW) y JPEG; es posible copiar imágenes de una tarjeta a otra.
Sistema de archivos	DCF (Norma de diseño para sistemas de archivo en cámaras) 2.0, DPOF (Formato de orden de impresión digital), Exif (Formato de archivos de imagen intercambiables para cámaras fotográficas digitales) 2.3, PictBridge
Visor	Visor réflex de objetivo único con pentaprisma al nivel del ojo
Cobertura del encuadre	FX (36 x 24): aprox. 100% horizontal y 100% vertical de 1,2 aumentos (30 x 20): aprox. 97% horizontal y 97% vertical DX (24 x 16): aprox. 97% horizontal y 97% vertical 5:4 (30 x 24): aprox. 97% horizontal y 100% vertical
Ampliación	0,7 aumentos aprox. (objetivo de 50 mm f/1,4 ajustado a infinito, -1,0 m-1)
Punto de mira	17 mm (-1,0 m-1; desde la superficie central del objetivo del ocular del visor)
Ajuste dióptrico	De -3 a +1 m-1
Pantalla de enfoque	Pantalla BriteView Clear Matte Mark VIII de Tipo B con marcas de zona de AF y cuadrícula de encuadre
Espejo réflex	Retorno rápido
Vista previa de profundidad de campo	Al pulsar el botón de vista previa de profundidad de campo, se cierra el diafragma del objetivo hasta el valor seleccionado por el usuario (modos A y M) o por la cámara (modos P y S)

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.1: *Continuación*

Diafragma del objetivo	Retorno instantáneo, control electrónico
Objetivos compatibles	Compatible con objetivos NIKKOR AF, incluidos los objetivos de tipo G y D (se aplican determinadas restricciones a los objetivos NIKKOR Micro PC) y los objetivos DX (con zona de imagen DX 24 x 16 de 1,5 aumentos), objetivos NIKKOR AI-P y objetivos AI sin CPU (sólo modos de exposición A y M). No se pueden usar objetivos NIKKOR IX, objetivos para F3AF ni objetivos sin sistema AI. El telémetro electrónico se puede utilizar con objetivos que presenten un diafragma máximo de f/5,6 o más rápido.
Tipo	Obturador de plano focal de desplazamiento vertical controlado electrónicamente
Velocidad	De 1/8.000 a 30 segundos en pasos de 1/3, 1/2 o 1 EV, bulb, X250
Velocidad de sincronización del flash	X=1/250 s; sincronización con el obturador a una velocidad de 1/320 s o inferior (el alcance del flash disminuye a velocidades comprendidas entre 1/250 y 1/320 s)
Modo de disparo	Un solo fotograma, continuo a baja velocidad, continuo a alta velocidad, obturador silencioso, disparador automático, espejo arriba
Velocidad de avance de fotogramas aproximada	Con baterías EN-EL15 - Zona de imagen: FX/5: 4; CL: 1-4 fps, CH: 4 fps - Zona de imagen: DX/1,2 aumentos; CL: 1-5 fps, CH: 5 fps Otras fuentes de alimentación - Zona de imagen: FX/5: 4; CL: 1-4 fps, CH: 4 fps - Zona de imagen: 1,2 aumentos; CL: 1-5 fps, CH: 5 fps - Zona de imagen: DX; CL: 1-5 fps, CH: 6 fps
Disparador automático	2 s, 5 s, 10 s, 20 s; de 1 a 9 exposiciones en intervalos de 0,5, 1, 2 o 3 s
Medición	Medición de la exposición TTL mediante el sensor RGB de 91K (91.000) píxeles
Método de medición	Matricial: medición matricial en color 3D III (objetivos de tipo G y D); medición matricial en color III (otros objetivos con CPU); medición matricial en color disponible con objetivos sin CPU si el usuario proporciona sus datos Central ponderado: se asigna un valor del 75% al círculo de 12 mm de diámetro del centro del encuadre. El diámetro del círculo puede modificarse a 8, 15 o 20 mm, o la ponderación puede basarse en la media de todo el encuadre (los objetivos sin CPU utilizan un círculo de 12 mm o la media de todo el encuadre) Puntual: mide el círculo de 4 mm (alrededor del 1,5% del encuadre) centrado en el punto de enfoque seleccionado (en el punto de enfoque central cuando se utiliza un objetivo sin CPU)
Intervalo (ISO 100, objetivo f/1,4, 20 °C)	Medición matricial o ponderada central: de 0 a 20 EV Medición puntual: de 2 a 20 EV
Acoplamiento del exposímetro	CPU y AI combinados

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.1: *Continuación*

Modo de exposición	Automático programado con programa flexible (P); automático con prioridad a la obturación (S); automático con prioridad al diafragma (A); manual (M)
Compensación de exposición	Entre -5 y +5 EV en incrementos de 1/3, 1/2 o 1 EV
Horquillado de la exposición	Entre 2 y 9 fotogramas en pasos de 1/3, 1/2, 2/3 o 1 EV
Horquillado del flash	Entre 2 y 9 fotogramas en pasos de 1/3, 1/2, 2/3 o 1 EV
Horquillado del balance de blancos	Entre 2 y 9 fotogramas en pasos de 1, 2 o 3
Horquillado ADL	2 fotogramas utilizando el valor seleccionado para un fotograma o entre 3 y 5 fotogramas utilizando los valores preajustados para todos los fotogramas
Bloqueo de la exposición	La luminosidad se bloquea en el valor detectado con el botón AE-L/AF-L
Sensibilidad ISO (índice de exposición recomendado)	ISO 100-6400 en pasos de 1/3, 1/2 o 1 EV. También se puede ajustar en aprox. 0,3, 0,5, 0,7 o 1 EV (equivalente a ISO 50) por debajo de ISO 100, o en aprox. 0,3, 0,5, 0,7, 1 o 2 EV (equivalente a ISO 25600) por encima de ISO 6400; control de sensibilidad ISO automática disponible
D-Lighting activo	Se puede seleccionar entre Automático, Extra alto, Alto, Normal, Bajo o Desactivado
Autofoco	Módulo de sensor de autofocus Multi-CAM 3500FX avanzado de Nikon con detección de fase TTL, ajuste de precisión, 51 puntos de enfoque (incluidos los 15 sensores en cruz) y luz de ayuda de AF (alcance aproximado de 0,5 a 3 m)
Alcance de la detección	De -2 a +19 EV (ISO 100, 20 °C)
Servo del objetivo	Autofoco (AF): AF de servo único (AF-S); AF de servo continuo (AF-C); el seguimiento predictivo del enfoque se activa automáticamente en función del estado del sujeto Enfoque manual (M): se puede utilizar el telémetro electrónico
Punto de enfoque	Se puede seleccionar entre 51 y 11 puntos de enfoque
Modo de zona AF	AF de punto único, AF de zona dinámica de 9, 21 o 51 puntos, seguimiento 3D, AF de zona automática
Bloqueo del enfoque	Es posible bloquear el enfoque si se pulsa el botón del disparador hasta la mitad (AF de servo único) o el botón AE-L/AF-L
Flash incorporado	Apertura manual mediante liberación del botón y número de guía de 12/39, 12/39 con flash manual (m, ISO 100, 20 °C)

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.1: *Continuación*

Control de flash	TTL: el control de flash i-TTL con sensor RGB de 86K (86.400) píxeles se encuentra disponible con flash incorporado y con los modelos SB-910, SB-900, SB-800, SB-700, SB-600 o SB-400; el flash de relleno equilibrado i-TTL para cámaras SLR digitales se utiliza con medición matricial y ponderada central, el flash i-TTL estándar para cámaras SLR digitales se utiliza con medición puntual
Modo del flash	Sincronización a la cortinilla delantera, sincronización lenta, sincronización a la cortinilla trasera, reducción de ojos rojos, reducción de ojos rojos con sincronización lenta, sincronización lenta a la cortinilla trasera; compatible con sincronización de alta velocidad auto FP
Compensación de flash	Entre -3 y +1 EV en incrementos de 1/3, 1/2 o 1 EV
Indicador de flash listo	Se ilumina cuando el flash incorporado o el flash opcional está completamente cargado; parpadea durante 3 s después de que el flash destelle a plena potencia
Zapata de accesorios	ISO 518 con contactos de sincronización y datos, así como bloqueo de seguridad
Sistema de Iluminación Creativa (CLS) de Nikon	La iluminación inalámbrica avanzada es compatible con el flash incorporado, los flashes SB-910, SB-900, SB-800 o SB-700 actuando como flash maestro y los flashes SB-600 o SB-R200 actuando como remotos, o el SU-800 como controlador; el flash incorporado puede servir como flash maestro en el modo controlador; Sincronización de alta velocidad auto FP y luz de modelado admitidas por todos los flashes compatibles con CLS, excepto el SB-400; Comunicación de la información de color del flash y Bloqueo del valor del flash admitidos por todos los flashes compatibles con CLS
Terminal de sincronización	Terminal de sincronización ISO 519 con rosca de bloqueo
Balance de blancos	Automático (2 tipos), incandescente, fluorescente (7 tipos), luz de sol directa, flash, nublado, sombra, manual preajustado (capaz de almacenar hasta 4 valores) y opción de la temperatura de color (entre 2.500 °K y 10.000 °K); ajuste de precisión disponible en todas las opciones.
Modos	Fotografía live view (imágenes estáticas), live view de vídeo (vídeos)
Servo del objetivo	Autofoco (AF): AF de servo único (AF-S); AF de servo permanente (AF-F) Enfoque manual (M)
Modo de área AF	AF con prioridad al rostro, AF de área ampliada, AF de área normal, AF de seguimiento de sujeto
Autofoco	AF de detección de contraste en cualquier parte del encuadre (la cámara selecciona un punto de enfoque automáticamente si se selecciona AF prioridad al rostro o AF de seguimiento de sujeto)
Medición	Medición de la exposición TTL mediante el sensor de imagen principal

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.1: *Continuación*

Formato de archivo	MOV
Compresión de vídeo	Codificación de vídeo avanzada H.264/MPEG-4
Formato de grabación de audio	PCM lineal
Dispositivo de grabación de audio	Micrófono monoaural integrado o micrófono estéreo externo; es posible ajustar la sensibilidad
Opciones de vídeo	Marca de índice, fotografías a intervalos
Pantalla	Panel LCD TFT de 8 cm y aprox. 921.000 puntos (VGA) con un ángulo de visión de aprox. 170 °, cobertura del encuadre del 100% aprox. y control automático del brillo de la pantalla mediante el sensor de brillo ambiente
Reproducción	Reproducción a pantalla completa y de miniaturas (4, 9 o 72 imágenes) con zoom de reproducción, reproducción de vídeos, pases de diapositivas de fotos y/o vídeos, altas luces, pantalla de histograma, rotación de imagen automática y comentario de la imagen (hasta 36 caracteres)
USB	SuperSpeed USB (conector de USB 3.0 Micro-B)
Salida HDMI	Conector de minicontactos HDMI tipo C; se puede usar simultáneamente con la pantalla de la cámara
Entrada de audio	Toma estéreo de minicontactos (3,5 mm de diámetro)
Salida de audio	Toma estéreo de minicontactos (3,5 mm de diámetro)
Terminal remoto de diez contactos	Se puede utilizar para conectar el control remoto opcional, la unidad GPS GP-1 o un dispositivo GPS compatible con NMEA0183 versión 2.01 o 3.01 (se requiere un cable adaptador de GPS MC-35 opcional y un cable con conector D-sub de 9 contactos)
Idiomas admitidos	Alemán, árabe, checo, chino (simplificado y tradicional), coreano, danés, español, finlandés, francés, holandés, indonesio, inglés, italiano, japonés, noruego, polaco, portugués, rumano, ruso, sueco, tailandés, turco y ucraniano
Batería	Una batería recargable de ion de litio EN-EL15
Unidad de alimentación	Pack de baterías múltiple MB-D12 opcional con una batería recargable de ion de litio EN-EL15 de Nikon u 8 pilas alcalinas de tamaño AA, Ni-MH o de litio.
Adaptador de CA	Adaptador de CA EH-5b; requiere un conector a la red eléctrica EP-5B (disponible por separado)
Rosca para el trípode	1/4 de pulgada (ISO 1222)
Dimensiones (an x al x prf)	Aprox. 146 x 123 x 81,5 mm
Peso	Aprox. 1.000 g con la batería y la tarjeta de memoria SD, pero sin la tapa del cuerpo; aprox. 900 g (sólo el cuerpo de la cámara)

- Continúa en la página siguiente -

Tabla B.1: *Continuación*

Temperatura	De 0 a 40 °C
Humedad	Menos del 85% (sin condensación)

➤ **Nikon P7100**

Figura B.2: Cámara Nikon P7100 (Nikon).



Tabla B.2: Especificaciones de Nikon P7100 (Nikon).

Píxeles efectivos	10,1 millones
Sensor de imagen	Tipo: CCD de transferencia interlineal de 14,9 mm; Matriz de filtro de color: filtros de colores primarios RGB; Píxeles totales: 10,39 millones; Píxeles de grabación: 9,98 millones (3.648 x 2.736)
Objetivo	Aumento: zoom óptico de 7,1 aumentos, objetivo NIKKOR; Distancia focal: 6,0-42,6 mm; Ángulo de visión: ángulo de visión equivalente al formato de 35 mm [135]: 28 a 200 mm Diafragma máximo: f/2,8-5,6 Construcción del objetivo: 11 elementos en 9 grupos; Cristal ED: 2 elementos
Reducción de la vibración	Imágenes estáticas: desplazamiento de la lente (sistema óptico) Videos: desplazamiento de la lente (sistema óptico)

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.2: *Continuación*

Rango de enfoque (desde el objetivo)	Disparo normal (en posición de gran angular): aprox. 50 cm a infinito; Disparo normal (en posición de teleobjetivo): aprox. 80 cm a infinito; En modo macro (en posición de gran angular): aprox. 2 cm a infinito; Distancia de enfoque más corta en modo macro: aprox. 2 cm a infinito; En modo macro (en posición de teleobjetivo): aprox. 50 cm a infinito
Apertura	13 pasos; Control de apertura; Diafragma iris de siete láminas con control electrónico; número f: T (f/5,6, f/8); Gran angular: W (f/2,8, f/8)
Enfoque manual	Sí (ampliación y visualización de la parte central, se puede aplicar el autofocus con una sola operación)
Obturador	Velocidad de obturación: 1/4000-8 s, 1/4000-60 s (modo M), y 4 s (modo de escena Espectáculo de fuegos artificiales)
Medición	Medición de la exposición TTL con el sensor de imagen; Modo; Medición matricial, Medición central ponderada, Medición puntual, Zona de AF puntual (compatible con 99 zonas de enfoque) Modo de exposición: P, S, A y M
Visor	Visor óptico: Sí; Ajuste dióptrico: Sí
Pantalla	Tamaño (longitud diagonal): 7,5 cm (3 pulgadas) Tipo: Pantalla LCD TFT; Aprox. 921.000 puntos (VGA), 100% sRGB
Vídeo	HD estéreo a 720p, zoom óptico, entrada para micrófono externo
Soportes de grabación	Memoria interna: MB 94
Ajuste de la sensibilidad ISO	Manual: ISO 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, HI 1; Automático: Ganancia automática desde ISO 100 a 800; Intervalo fijo automático: ISO 100 a 200, 100 a 400; Alta sensibilidad ISO automática: ISO 100 a 1600; Modo nocturno con bajo nivel de ruido hasta ISO 12800
Filtros	Suave, Sepia nostálgico, Clave alta, Clave baja, Monocromo de alto contraste, Color selectivo, Proceso cruzado, Exposición con zoom, Desenfoque durante la exposición, Monocromo creativo, Pintura
Flash incorporado	Número de guía: 7,0 (ISO 100, m); Alcance de control del flash: Gran angular de aprox. 0,3 a 8 m, Teleobjetivo de aprox. 0,3 a 4 m. Modo: Automático, automático con reducción de ojos rojos, flash de relleno, apagado, sincronización lenta manual, sincronización a la cortinilla trasera
Balance de blancos	Modo: Auto1, 2 Preajuste, manual, luz del día, incandescente, fluorescente: FL 1, FL 2 y FL 3 Nublado Flash incorporado Selección de la temperatura del color (K) Horquillado del balance de blancos
Procesamiento de imágenes	Picture control: Estándar, Neutro, Vívido, Monocromo, Imagen y Controles personalizados; D-Lighting activo
Formatos de imagen	4:3, 16:9, 3:2 y 1:1
Formato de grabación	Vídeos: MOV (Vídeo: MPEG-4 AVC/H.264, Audio: AAC estéreo) Audio: WAV estéreo (22.050 kHz, 16 bits)
Desarrollo RAW	Balance de blancos, compensación de la exposición, Picture Control, calidad de imagen, tamaño de imagen, control de distorsión y D-Lighting

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.2: Continuación

Función de edición de vídeo (con reproducción)	Guardar únicamente una parte necesaria de un vídeo (ajuste de los puntos de inicio/fin) y guardar únicamente un fotograma de un vídeo como imagen estática
Interfaz	USB de alta velocidad, PictBridge, HDMI
Fuente de alimentación	Batería: batería recargable de ion de litio EN-EL14 (7,4 V, 1030 mAh) con función ID; Rendimiento de la batería: aprox. 350 disparos (con la EN-EL14)
Peso	Aprox. 395 g
Dimensiones (an x al x prf)	Aprox. 4,6 x 3,1 x 1,9 in

➤ **Objetivo Nikon AF-S 35mm F/1,4 G**



Figura B.3: Objetivo Nikon AF-S 35mm F/1,4 G (Nikon)

Tabla B.3: Especificaciones del objetivo Nikon AF-S 35mm (Nikon).

Distancia focal	35 mm
Diafragma máximo	f/1,4
Diafragma mínimo	f/16
Construcción del objetivo	10 elementos en 7 grupos (con un elemento de objetivo asférico)

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.2: *Continuación*

Ángulo de imagen	63° con cámaras SLR de película de Nikon en formato de 35 mm (135) y cámaras SLR digitales de formato FX de Nikon, 44° con cámaras SLR digitales de formato DX de Nikon
Enfoque	Autofoco con SWM integrado y enfoque manual
Distancia mínima de enfoque	0,3 m
Relación de reproducción máxima	0,2x
N.º de láminas del diafragma	9 (circular)
Tamaño de rosca para accesorios de filtros	67 mm
Dimensiones	Aprox. 83 x 89,5 mm
Peso	Aprox. 600 g (Basado en las directrices de la CIPA)

➤ **Nikon Flash SB-910**



Figura B.4: Flash Nikon SB-910 (Nikon)



Tabla B.4: Especificaciones del Flash Nikon SB-910 (Nikon).

Construcción electrónica	Transistor bipolar automático de puerta aislada (IGBT) y circuitos de serie
Número de guía (posición del cabezal del zoom a 35 mm, en formato FX, patrón de iluminación estándar, 20 °C)	34 (ISO 100, m), 48 (ISO 200, m)
Rango de distancias de la intensidad de destello efectiva del flash (en modo i-TTL, flash de diafragma automático o flash automático sin TTL)	De 0,6 m a 20 m (varía en función de la configuración de la zona de imagen de la cámara, el patrón de iluminación, la sensibilidad ISO, la posición del cabezal del zoom y la apertura del diafragma del objetivo que se esté utilizando)
Patrón de iluminación	Hay tres patrones de iluminación: estándar, equilibrado y central ponderado. El ángulo de distribución de la luz se ajusta automáticamente a la zona de imagen de la cámara en los formatos FX y DX
Modos de flash disponibles	i-TTL, Flash con diafragma automático, Flash automático sin TTL, Flash manual con prioridad a la distancia, Flash manual y Flash de repetición
Otras funciones disponibles	Destellos de prueba, predestellos de control, luz de ayuda de AF para AF de varios puntos y luz de modelado
Sistema de Iluminación Creativa de Nikon	Existe una cantidad de operaciones de flash disponibles con las cámaras compatibles: modo i-TTL, iluminación inalámbrica avanzada, bloqueo del valor del flash, comunicación de la información del color del flash, sincronización de alta velocidad auto FP y luz de ayuda de AF para AF de varios puntos
Operaciones de fotografía con varios flashes	Iluminación inalámbrica avanzada Fotografía con varios flashes inalámbricos de tipo SU-4
Control de la exposición del flash ajustado en la cámara	Modos de sincronización de la cámara: sincronización lenta, sincronización lenta con reducción de ojos rojos, sincronización a la cortinilla delantera, sincronización a la cortinilla trasera, sincronización lenta a la cortinilla trasera Funciones fotográficas: sincronización de alta velocidad auto FP, bloqueo del valor del flash, reducción de ojos rojos
Función de rebote	El cabezal del flash se inclina hacia abajo hasta 7° o hacia arriba hasta 90° con paradas en -7°, 0°, 45°, 60°, 75° y 90°. En sentido horizontal, gira 180° hacia la izquierda y hacia la derecha con paradas en 0°, 30°, 60°, 75°, 90°, 120°, 150° y 180°

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.4: *Continuación*

Alimentación ACTIVADA/DESACTIVADA	Gire el interruptor principal/interruptor de modo inalámbrico para varios flashes si desea encender o apagar el SB-910 También es posible ajustar la función de reposo
Fuente de alimentación	Utilice cuatro baterías de tamaño AA de la misma entre cualquiera de los siguientes tipos: Baterías alcalinas LR6 de 1,5 V (tamaño AA) Baterías de litio FR6 de 1,5 V (tamaño AA) Baterías recargables de Ni-MH HR6 de 1,2 V (tamaño AA)
Indicador de flash listo	El SB-910 está completamente recargado: se ilumina Intensidad de destello del flash insuficiente para obtener la exposición correcta (en modos i-TTL, flash de diafragma automático, flash automático sin TTL o flash manual con prioridad a la distancia): parpadea
Indicador de flash listo (en modo remoto)	El SB-910 está completamente recargado: parpadea Intensidad de destello del flash insuficiente para obtener la exposición correcta (en modos i-TTL, flash de diafragma automático o flash automático sin TTL, o bien, en modo AUTOMÁTICO en fotografía con varios flashes inalámbricos de tipo SU-4): parpadea
Duración del flash (aprox.)	Intensidad de destello de 1/880 s en M1/1 (completa) Intensidad de destello de 1/1.100 s en M1/2 Intensidad de destello de 1/2.550 s en M1/4 Intensidad de destello de 1/5.000 s en M1/8 Intensidad de destello de 1/10.000 s en M1/16 Intensidad de destello de 1/20.000 s en M1/32 Intensidad de destello de 1/35.700 s en M1/64 Intensidad de destello de 1/38.500 s en M1/128
Palanca de bloqueo del pie de montaje	Proporciona un acoplamiento seguro del SB-910 a la zapata de accesorios de la cámara mediante una placa de sujeción y una clavija de seguridad para evitar desprendimientos fortuitos
Compensación de flash	De -3,0 EV a +3,0 EV en incrementos de 1/3 de paso EV en los modos i-TTL, flash de diafragma automático, flash automático sin TTL o flash manual con prioridad a la distancia
Configuraciones personalizadas	19 elementos
Otras funciones	Ajuste manual de la sensibilidad ISO, revisualización de la cantidad de subexposición debido a la intensidad de destello del flash insuficiente en modo i-TTL, restauración de los ajustes predeterminados, bloqueo de teclas, limitación térmica, actualización de firmware
Dimensiones (an x al x prf)	Aprox. 78,5 × 145 × 113 mm
Peso	Aprox. 510 g (con cuatro baterías alcalinas LR6 de 1,5 V de tamaño AA) Aprox. 420 g (sólo el flash)
Accesorios suministrados	Soporte de flash AS-21, Cúpula de difusión SW-13H de Nikon, Filtro fluorescente SZ-2FL, Filtro incandescente SZ-2TN, Estuche blando SS-910

➤ **Nikon Flash SB-800**



Figura B.5: Flash Nikon SB-800 (Nikon).

Tabla B.5: Especificaciones del flash Nikon SB-800 (Nikon).

Nº de guía (ISO 100, fijado a zoom de 35mm) [m]	38
Tiempo de recarga aprox. (plena potencia)	2.7 con SD-800 adjunto; 6 con 4 baterías estándares tipo AA
Margen ISO en Auto TTL	25 a 1000
Número de disparos aprox. (plena potencia)	150
Cobertura del flash (margen de distancia focal del objetivo)	24-105; 17 y 14mm con adaptador incluido, 14mm con difusor SW-10H
Fuente de alimentación (baterías tipo AA)	4 (5 con SD-800 incluido)
Dimensiones aproximadas (Ancho x Alto x Profundo) [mm]	70.6 x 127.4 x 91.7
Peso aproximado con/sin batería [g]	350

➤ **Fotómetro Sekonic Flashmate L-308-S**



Figura B.6: Fotómetro Sekonic Flashmatic L-308-S (Sekonic).

Tabla B.6: Especificaciones del fotómetro Sekonic Flashmatic L-308-S (Sekonic).

Tipo	•	Exposímetro digital para medición de la luz ambiente y de flash
Método de recepción de la luz	•	Luz incidente y luz reflejada
Sección de recepción de la luz	•	Luz incidente: Lumisfera, Lumidisc
	•	Luz reflejada: Lente (ángulo de recepción de la luz del 40%)
Receptor de luz	•	Fotodiodo de silicio
Modos de medición	•	Luz ambiente: Medición con prioridad de la velocidad del obturador Medición EV
	•	Luz de flash: Con cable de sincronización Sin cable de sincronización
Rango de medición (ISO 100)	•	Luz ambiente: EV 0 a EV 19,9
	•	Flash: F1,4 a F90,9
Precisión de la repetición	•	$\pm 0,1$ EV o menos
Constante de calibración	•	Medición de luz incidente: C = 340 (Lumisfera), C = 250 (Lumidisc)
	•	Medición de luz reflejada: K = 12,5
Rango de indicación	•	Velocidad de la película: ISO 3 a 8000 (a paso 1/3)
	•	Velocidad del obturador
		Luz ambiente: 60 seg a 1/8000 seg (a paso 1, 1/2 ó 1/3)
		Velocidad de cine (f/s): 8, 12, 16, 18, 24, 25, 30, 32, 64, 128 (ángulo del obturador: 180 grados)
		Flash: 1 seg a 1/500 seg (en pasos de 1, 1/2 ó 1/3) y 1/75, 1/80, 1/90, 1/100 seg
	•	Valor de la abertura: F0,5 a F90,9 (en pasos de 1, 1/2 ó 1/3)
	•	EV (valor de la exposición): EV -5 a EV 26,2 (en pasos de 1/10)

- Continúa en la página siguiente -



Tabla B.6: *Continuación*

Otras funciones	• Indicación fuera de la gama: Advertencias de E.u (subexposición) y de E.o (sobreexposición) • Indicación de verificación de la pila con 3 íconos de condición del nivel • Apagado automático (aprox. 4 min después de la última operación) • Ajuste personal
Pila utilizada	• Pila tipo AA de 1,5 voltios (alcalina, manganeso o litio)
Gama de temperaturas de operación	• 0°C a +40°C
Gama de temperaturas de almacenamiento	• -20°C a +60°C
Dimensiones	• Aprox. 63 (ancho) x 110 (altura) x 22 (prof.) mm
Peso	• Aprox. 95 g (con pila)
Accesorios normales	• Estuche blando, correa, Lumidisc, estuche blando para Lumidisc, tapa del terminal de sincronización, pila AA de 1,5 voltios

Las características y especificaciones están sujetas a cambio sin previo aviso.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**



ANEXO C -

FRESADORA ALARSIS FR180



Figura C.1: Fresadora Alarsis FR180 (Alarsis).

Características técnicas:

- Equipo de sobremesa muy robusto, con perfil de aluminio acanalado para sujeción de piezas mediante bridas.
- Guías lineales con patines de recirculación de bolas de 15 mm. Sin holguras.
- Transmisión de correas dentadas en poliuretano con hilos de acero interiores inextensibles, paso HTD3M.
- Alta velocidad de desplazamiento (15.000 mm/min.).
- Resolución 0,01 mm.
- Adaptable cualquier motor fresador industrial. Incluye Kress 1050 W.
- Motores de 200 pasos CeNeCe 24HB90 torque 30 Kg/cm.

- Electrónica de control modelo CeNeCe-C6 de micropaso y PWM.
- Desplazamiento en los ejes X e Y mediante poleas dentadas.
- Desplazamiento en el eje Z por husillo de rosca trapezoidal.
- Detección de fin de carrera en los ejes.
- Dimensiones de la mesa: 1590 x 810 cm.
- Área útil de trabajo: 1360 x 740 cm. Altura útil eje Z: 80 mm.

Componentes:

➤ **Motor Fresador KRESS 1050 FME**



Figura C.2: Mandrino KRESS 1050 FME (Kress).

- o Escobillas autodesconectables para proteger el motor.
- o Pestaña de acero con cojinete doble.
- o Embobinado del motor blindado para protegerlo contra el polvo y las partículas.
- o Arranque suave con limitación de corriente inicial.
- o Protección electrónica de sobrecarga para evitar un sobrecalentamiento del motor.

Tabla C.1: Características técnicas del mandrino KRESS 1050 FME (Kress).

Potencia nominal	1 050	W
Velocidad en vacío	10 000 – 29 000	rpm
Pinza	8	mm
Casquillo-Ø	43	mm
Peso	1,7	kg



Tabla C.2: Especificaciones del mandrino KRESS 1050 FME (Kress).

Valor de emisiones de vibraciones a_h	5,0 m/s ²
Valor de la incertidumbre de medida K	1,5 m/s ²
Nivel de presión sonora L_{pA}	78 dB(A)
Valor de la incertidumbre de medida K	3,0 dB(A)
Nivel de potencia acústica L_{wA}	89 dB(A)
Valor de la incertidumbre de medida K	3,0 dB(A)

➤ **Electrónica de control modelo CeNeCe-C6**

Electrónica integrada en caja lista para su uso para fresadoras FR CeNeCe. Compuesta de controladora C6 micropaso hasta 1/8, 4 driver de 2,5A. Fuente de alimentación conmutada de 12 A. 2 salidas a relé filtradas de 1500W para aspirador y amoladora. Entrada para finales de carrera y paro de emergencia exterior. Conectores de muy alta calidad. Conexión a PC por LPT.

➤ **Palpador para puesta a cero eje Z.**

Palpador para detección automática de altura del material.

➤ **Kit de aspiración**

Conjunto de accesorios necesarios para la colocación de cualquier aspirador industrial.

➤ **Kit inicial de fresas**

Incluye conjunto de fresas entre 2 y 6 mm para diversos materiales, para los primeros pasos con nuestra fresadora.

➤ **Bridas de sujeción de acero**

Set de bridas de sujeción para materiales de hasta 20mm de espesor para las mesas de trabajo de todos los modelos FR.



**INGENIERÍA INVERSA DE UNA PIEZA DE TEST MEDIANTE
TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICAS.
ANÁLISIS Y CONTRASTE DE RESULTADOS**





PLANOS