



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Adquisición, tratamiento y validación de
modelos 3D mediante luz estructurada**

Autor:

Bermejo Pulgar, Adrián

Tutor:

**Santos Martin, Francisco Javier
Área de Ingeniería de los Procesos
de Fabricación**

Valladolid, Septiembre 2015.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado pretende estudiar el modelado tridimensional de una pieza de revolución, mediante aplicación de luz estructurada sobre la pieza objeto de estudio.

Comenzando por un análisis del estado de la cuestión a tratar, que abarca diversos estudios experimentales del modelado 3D, se avanzará hacia la obtención de un modelo 3D de una peonza de madera de pequeñas dimensiones, y a la generación de la pieza mediante una impresora 3D.

Los resultados obtenidos en esta experimentación de impresión han sido dos reproducciones de la pieza objeto de estudio; una sin sufrir modificaciones dimensionales, y otra por realimentación de los factores de escala para mantener las dimensiones iniciales.

Para finalizar se ha realizado una validación de los resultados de las mediciones obtenidas de ambas reproducciones y de la pieza real en un laboratorio de Metrología, con el objetivo de determinar el grado final de aproximación entre dichas piezas.

PALABRAS CLAVE: análisis tridimensional, modelización 3D, luz estructurada, piezas de revolución, impresión 3D.

SUMMARY

This Final Project aims to study the three-dimensional modelling of a revolution part by the application of a structured light onto the work piece.

Starting with an analysis of the state, which covers various experimental studies of the 3D modelling. It will move towards to obtain a 3D model of a Peg-top of small dimensions and suitable followed to generate the part by a 3D printer

The results obtained in this printing experiment came up with two different views of the work piece under study. One of the results did not suffer any dimensional changes whereas the other shows a result based on the feedback of the scale factors to maintain the initial dimensions.

To finalize, it has been done a validation of the results of the measurements obtained from both reproductions and also of the real part in a metrology laboratory, in order to determine the final grade of approximation between the pieces mentioned.

KEY WORDS: three-dimensional analysis, 3D modelling, structured light, revolution parts, 3D printing

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO	3
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Conceptos iniciales de modelación	7
2.2.1. Modelado con Sólidos/Polígonos	10
2.2.2. Modelado con Superficies	12
3. ESTADO DEL ARTE	19
3.1. Modelado tridimensional utilizando un scanner láser y un punto de algoritmo de registro nube	19
3.2. Impresión de objetos en 3D por unificación de partes.	22
3.2.1. Voxelización y análisis de la forma	27
3.2.2. Generación de partes 3D entrelazadas e implementación y actuación	31
3.3. Construcción de casas mediante la tecnología de la impresión 3D	33
3.4. Obtención de pistones rotativos mediante escaneo láser en 3D	36
3.5. Reconocimiento tridimensional del rostro humano mediante un láser escáner 3D	38
3.6. Visual SfM	41
4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	45
4.1. Introducción concepto de luz estructurada	45
4.2. Concepto de luz estructurada	47
4.3. Instalación y equipo de trabajo	51
4.4. Obtención del modelo tridimensional	56
4.4.1. Hardware setup	57
4.4.2. Calibration	58
4.4.3. Structured light	59
4.4.4. Shape fusion	61
4.5. Método de impresión en 3D	63
4.5.1. Software Netfabb y Slic3r	63

4.5.2. Impresora 3D	64
4.6 Desarrollo experimental	65
4.6.1. Introducción previa	65
4.6.2. Parámetros de modelación tridimensional. Software David Laser Scanner	66
4.6.3. Conclusiones modelación 3D mediante luz estructurada	74
5. IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL. SOFTWARE NETFABB Y SLIC3R	77
5.1. Netfabb	77
5.2. Slic3r	79
5.3. Método de impresión	82
6. RESULTADOS OBTENIDOS	89
6.1. Proceso de medición del modelo 3D sin escalar	96
6.1.1. Función modelo	96
6.1.2. Cálculo de la incertidumbre	98
6.2. Proceso de medición del modelo 3D escalado	101
6.2.1. Función modelo	101
6.2.2. Calculo de la incertidumbre	103
7. CONCLUSIONES	109
8. ESTUDIO ECONÓMICO	115
8.1 Costes directos	116
8.1.1 Coste de Personal	116
8.1.2 Coste material amortizable	117
8.1.3 Coste de material no amortizable	118
8.2 Costes indirectos	118
8.3 Coste total	119
9. BIBLIOGRAFÍA	123

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	(Izquierda) parche de un polígono (derecha) parche de una superficie	9
Figura 2.2	Redundancia de datos	10
Figura 2.3	Almacenamiento de triángulos tipo fan	11
Figura 2.4	Almacenamiento de triángulos tipo strip	11
Figura 2.5	Generación de strips	12
Figura 2.6	Puntos de control curvas de Bezier	14
Figura 2.7	Superficie de Bezier con 30 puntos de control	15
Figura 2.8	B-Spline uniforme no racional	16
Figura 3.1	Instantánea de montaje	20
Figura 3.2	Esquema del análisis del montaje	21
Figura 3.3	Una forma 3D y su voxelización	25
Figura 3.4	Completo (en verde) y parciales (en naranja / azul / morado / rojo) voxels: casos de fragmentos diminutos (caso 1), fragmentos inconexos (caso 2), y estructuras finas (caso 3), respectivamente	25
Figura 3.5	Conectados los voxels en partes	25
Figura 3.6	Piezas 3D delgadas y desconectadas (en morado y rojo(P1 y P2)); en lugar de estructuralmente estrechas, piezas 3D (en verde (P3))	25
Figura 3.7	Modelo estanco 3D como entrada	26
Figura 3.8	Voxelización y análisis de forma	26
Figura 3.9	Creación de piezas iniciales entrelazadas	26
Figura 3.10	Fijación de voxels de contorno a las piezas	26
Figura 3.11	Refinamiento de las partes geométricas	26
Figura 3.12	Forma 2D escogida para ilustrar el método de voxelización.	27
Figura 3.13	Puntos interiores (verde) y exteriores (gris) de muestra. En	27

	el vóxel inferior derecho se detecta un vóxel parcial desconectado por amplitud (ver círculos rojos)	
Figura 3.14	Deformación de la geometría local del modelo para	28
Figura 3.15	eliminar un vóxel parcial con un fragmento diminuto	
Figura 3.16	Resolución de un vóxel parcial con forma local	28
Figura 3.17	desconectada	
Figura 3.18	Voxelización de un pato	29
Figura 3.19	Voxels completos en el modelo	29
Figura 3.20	Voxels internos identificados	29
Figura 3.21	Gráfico de conexión de forma para los voxels de contorno	29
Figura 3.22	Voxels internos en verde y voxels de contorno	30
Figura 3.23	Forma grafica de conexión para los voxels de frontera débiles (rojo), normales (amarillo) y fuertes (verde)	30
Figura 3.24	Gráfico de conexión	31
Figura 3.25	Piezas voxelizadas antes y después de cortar el	31
Figura 3.26	refinamiento de la costura	
Figura 3.27	Mapa destacado	31
Figura 3.28	Piezas 3D refinadas sin y con corte de costura	31
Figura 3.29		
Figura 3.30	Partes de enclavamiento impresas en 3D (izquierda) y el objeto ensamblado correspondiente (a la derecha).	32
Figura 3.31	Impresora 3D de impresión de casas	33
Figura 3.32	Funcionamiento impresora 3D para impresión de casas	34
Figura 3.33	Método de extrusión para impresión de casas	34
Figura 3.34	Casa obtenida mediante una impresora 3D de grandes dimensiones	35
Figura 3.35	Perfil del láser escáner Micro-Epsilons' 2700	36
Figura 3.36	Puntos de referencia en la cara de una persona	39
Figura 3.37	Posición de las lecturas de distancia de los modelos virtuales	40
Figura 3.38	Nube de puntos a partir de una fotografía	41
Figura 4.1	Escáner de contacto ZEISS	46

Figura 4.2	Range image sin alineación	46
Figura 4.3	Patrón de luz de cuadrícula de colores (derecha), patrones de líneas horizontales y verticales (izquierda)	47
Figura 4.4	Técnica tecnología escáner time-of-flight	49
Figura 4.5	Esquema escáner láser por triangulación	49
Figura 4.6	Esquema de un radar o sonar	50
Figura 4.7	Pieza a modelar	51
Figura 4.8	Tarro de barro	52
Figura 4.9	Pen drive David Láser Scanner	52
Figura 4.10	Cámara web Logitech C615	53
Figura 4.11	Proyector Acer	53
Figura 4.12	Córner de calibración	54
Figura 4.13	Apoyo de rotación	54
Figura 4.14	Instalación completa para escaneado	55
Figura 4.15	Instalación para calibración de la cámara	56
Figura 4.16	Espacio de trabajo <i>David Láser Scanner</i>	56
Figura 4.17	Cuadro de diálogo Hardware Setup	57
Figura 4.18	Cuadro de diálogo Calibration <i>David Laser Scanner</i>	58
Figura 4.19	Calibración <i>David Laser Scanner</i>	59
Figura 4.20	Espacio de trabajo Structured Light <i>David Laser Scanner</i>	60
Figura 4.21	Ejemplo de escaneado <i>David Laser Scanner</i>	60
Figura 4.22	Cuadro de diálogo Shape Fusion <i>David Laser Scanner</i>	61
Figura 4.23	Modelo completo escaneado a partir de la fusión de escaneos	62
Figura 4.24	Modelo fusionado	62
Figura 4.25	Impresora 3D fabricada por la Fundació CM de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).	64
Figura 4.26	Puntos clave de calibración	66
Figura 4.27	Cuadro de dialogo cámara web Logitech	67
Figura 4.28	Cuadro de diálogo calibración correcta	68
Figura 4.29	Escaneos de la peonza a través de la aplicación de luz	68

	estructurada	
Figura 4.30	Escaneos a través de <i>David Laser Scanner</i>	69
Figura 4.31	Sucesión de escaneos a 60° del tarro de mármol	69
Figura 4.32	Sucesión de escaneos a 60° de la peonza de madera	70
Figura 4.33	Cuadro de diálogo Shape Fusion <i>David Laser Scanner</i>	70
Figura 4.34	Lista de escaneos realizados sobre el modelo real	71
Figura 4.35	Cuadro de propiedades de los escaneos	72
Figura 4.36	Shape fusión escaneos tarro de mármol y peonza de madera, respectivamente.	72
Figura 4.37	Modelo virtual 3D de la peonza de madera mediante <i>David Laser Scanner</i>	73
Figura 5.1	Espacio de trabajo software Netfabb Basic	77
Figura 5.2	Colocación del modelo 3D	78
Figura 5.3	Corte de la punta de la peonza	79
Figura 5.4	Medidas peonza Netfabb Basic	80
Figura 5.5	Factor de escala de corrección	81
Figura 5.6	Corte de la punta de la peonza	81
Figura 5.7	Parámetros de capa y perímetros	82
Figura 5.8	Parámetros de relleno	83
Figura 5.9	Parámetros de filamento	83
Figura 5.10	Parámetros generales de la impresora	84
Figura 5.11	Espacio de trabajo para la generación del G-Code	85
Figura 6.1	Peonza escalada	89
Figura 6.2	Peonza sin escalar	90
Figura 6.3	Peonza escalada y sin escalar	90

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 5.1	Parámetros de impresión de la peonza	84
Tabla 6.1	Medidas comparativas modelos	91
Tabla 6.2	Media y desviación típica de modelos	94
Tabla 6.3	Hoja de cálculo Excel para desviación típica	95
Tabla 8.1	Cálculo número total horas anuales	116
Tabla 8.2	Cálculo de coste de personal	116
Tabla 8.3	Cálculo de coste de material amortizable	117
Tabla 8.4	Cálculo de coste de material no amortizable	118
Tabla 8.5	Cálculo costes indirectos	118
Tabla 8.6	Cálculo del coste total asociado al personal en función de la dedicación	119
Tabla 8.7	Cálculo coste total	119

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS **DEL TRABAJO FIN DE GRADO**



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El uso de las impresoras 3D está creciendo exponencialmente. De hecho las noticias sobre las posibilidades de estas impresoras en numerosos sectores productivos e incluso de usuario, se han multiplicado en los últimos meses. En este contexto se debe hacer referencia a la mención de Barack Obama (presidente de EE.UU) en el discurso del estado de la nación de 2013: “La impresión 3D tiene el potencial de revolucionar la manera en que hacemos casi todo”.

Actualmente existen multitud de aplicaciones para el modelado digital de objetos del mundo real, estos son muy variados y con distintos enfoques, ya que se trata de un gran campo de aplicación e interés internacional que experimenta cada año un gran crecimiento, debido a la gran inversión de dinero en investigaciones de este tipo que abren un nuevo mercado en el que queda mucho por descubrir y cuyo futuro se precisa muy interesante. Alguna de dichas aplicaciones del modelado tridimensional son:

- Juegos y entretenimientos, donde los modelos 3D han mejorado el realismo de las aplicaciones y adaptación de modelos similares para la reducción de costes.
- CAD, utilizado por los Técnicos e Ingenieros de compañías de manufactureras.
- Patrimonio Cultural, donde la digitalización 3D se centra en la preservación digital de piezas y sitios históricos.
- Medicina, para la detección de deformaciones de órganos y poder ser usadas como herramientas de diagnóstico.
- Reconocimiento facial 3D, implementado principalmente en asuntos e investigaciones policíacas.
- Bioinformática. Una de sus aplicaciones es la comparación estructural de diferentes proteínas que juegan un papel muy importante en la vida de los humanos.
- Información geográfica, modelado de diferentes superficies para aplicaciones en cartografía o planeación espacial.

Es evidente que hoy en día existe un constante aumento en la demanda, usos y aplicaciones de la adquisición de datos de rango, obtención de geometría de superficies, modelado de objetos del mundo real, etc. Desafortunadamente la tecnología disponible para estos propósitos aún es muy costosa e incluso en años recientes se han hecho esfuerzos por buscar nuevos métodos y técnicas con el propósito de reducir los costes permitiendo



con esto que más personas se involucren en el desarrollo e investigación de esta tecnología.

Por tanto la decisión de afrontar este proyecto fue tomada debido al interés motivado por los temas relacionados con la obtención de modelos a partir de objetos reales que se realizan internacionalmente en la actualidad, tal y como se ha expuesto en los párrafos anteriores y posteriormente se ha profundizado en el estado del arte de este trabajo fin de grado, así como el interés de poder crear mi propio equipo de análisis tridimensional y digitalización 3D para obtener objetos de uso cotidiano, creyendo por tanto, que es un proyecto útil para que el día de mañana pueda estar al alcance de cualquier persona en el hogar o en el trabajo.

En resumen, la posibilidad de imprimir cualquier objeto que hayamos modelado resulta fascinante y, en mi opinión, supone un gran cambio en nuestra concepción de la producción.

Por otro lado el presente Trabajo Fin de Grado ha sido realizado con el fin de obtener los siguientes objetivos:

- ✓ El primer y principal objetivo es la obtención de un modelo tridimensional de piezas de revolución a través de la utilización de un software de digitalización basado en luz estructurada. Para ello se establecerá un equipo de trabajo para el análisis y toma de datos durante el proceso de experimentación en el Laboratorio de Metrología y Calibración del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación.
- ✓ El segundo objetivo es la posterior impresión del modelo tridimensional obtenido a través de una impresora 3D. La pieza real de revolución elegida para la impresión será una peonza de madera de pequeñas dimensiones.
- ✓ El tercer objetivo, será medir las discrepancias entre la pieza real y el modelo obtenido por impresión 3D, para posteriormente hacer una realimentación del factor de escalado del modelo y volver a calcular la discrepancia final con respecto a las dimensiones iniciales de la pieza real.

2. INTRODUCCIÓN



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Antecedentes

El presente Trabajo Fin de Grado es el resultado de una labor de investigación con el programa *David Laser Scanner* para el escaneo y digitalización de objetos en tres dimensiones, el cual se integra en las líneas de modelado tridimensional del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid

2.2. Conceptos iniciales de modelación y digitalización tridimensional

Antes de comenzar con el desarrollo de este trabajo, se ha considerado importante realizar un pequeño análisis de los conceptos iniciales de modelación y digitalización tridimensional, con el objetivo de acercarnos de forma teórica a su contenido.

La digitalización tridimensional es la generación de un modelo informático tridimensional de un objeto con el objetivo de no solamente generar imágenes y animaciones, sino también para realizar cálculos, estudiar sus propiedades o editarlo. Independientemente de la tecnología usada, la digitalización implica una toma de datos del objeto y un procesamiento informático de los mismos. No obstante la tecnología condicionará el esfuerzo de procesamiento y la bondad de los resultados obtenidos [1].

Siempre partiremos de la toma de datos de un modelo directo a partir de medidas realizadas sobre el objeto a reproducir en sí, es decir, de un conjunto de mediciones.

El procesamiento informático se reduce a generar el modelo digital con un programa de diseño 3D. Con este esquema es fácil añadir al modelo digital elementos que se han perdido por el paso del tiempo, siendo complejo reproducir con fidelidad el objeto en su estado actual. Por este motivo, esta técnica se ha usado esencialmente para la recreación virtual de ciudades y edificios.

Por tanto la digitalización 3D nos permite obtener una reproducción tridimensional del objeto estudiado para de esta forma poder analizar todos los planos deseados. El objetivo es obtener una reproducción fiel y completa del material que va mucho más allá de las fotografías 2D tradicionales.



La dificultad reside en generar modelos fieles a la realidad procedentes de un reducido volumen de información tomado. Para aumentar dicha información se pueden usar técnicas precisas de medida, o algoritmos que obtengan la información geométrica a partir de fotografías.

En las últimas décadas se han desarrollado diversas estrategias de este tipo. Ha sido el desarrollo del escáner lo que ha potenciado y profundizado capturar de forma rápida un conjunto de muestras suficientemente grande y fiable de los objetos.

El objetivo de los escáneres laser es devolver una distribución de puntos medidos sobre la superficie objeto de estudio independientemente del principio de funcionamiento o tecnología utilizada. Este conjunto de puntos se usa en algunos casos como representación del objeto, haciendo visualización directa de los puntos.

Sin embargo, para obtener un modelo 3D útil es necesario procesar esta nube de puntos para generar una malla poligonal. Por otra parte, la digitalización de cualquier objeto, por simple que sea, conlleva la realización de varias tomas con el escáner, que dan lugar a varias nubes de puntos, que se deben fusionar en una única malla. Además, el número de puntos suele ser excesivamente alto, debido a que el muestreo es fijo, e independiente de las irregularidades del objeto. Cada una de estos pasos se resuelve con procesos semiautomáticos, que deben realizarse por personal especializado y con un consumo alto de tiempo y recursos de cálculo.

Los requisitos que debe cumplir el modelo dependerán del uso que se va a hacer del mismo, dentro del objetivo hacia donde se dirige este proyecto uno de las aplicaciones más importante de modelación tridimensional es la obtención de maquetas del objeto usando una impresora 3D, para ello necesitaremos un modelo sólido, que además de tener el nivel de precisión exigido para el fin de la maqueta, sea geoméricamente correcto y defina un sólido válido.

Una vez asentados los anteriores conceptos básicos es conveniente que hablemos de uno de los parámetros más importantes a la hora de obtener unos modelos fiables que es la resolución del modelo digital, entendido como la distancias entre muestras adyacentes que está relacionado con el tamaño de la menor irregularidad que podemos representar.

La resolución depende de la tecnología del escáner laser y de la distancia a la que se ha capturado el objeto; además en el procesamiento del modelo es posible modificar la resolución, diezmando la malla poligonal o enriqueciéndola.

Un fiel modelo digital no solo depende del número de medidas que tenemos de él. La precisión de estas medidas también es esencial, ya que determina el error que podemos tener en cada vértice del modelo. La precisión depende exclusivamente de la tecnología del escáner, que condiciona el error cometido en la medida de distancias en cada dirección. Por tanto de las características del modelo dependerá el tipo de información que podamos obtener de él.

Comentado y establecidas las bases anteriores de los conceptos previos de modelación tridimensional es conveniente destacar que existen dos métodos importantes para modelar, el modelado a partir de *superficies* y el más solicitado, el modelado a partir de *sólidos/polígonos*. En estas dos técnicas existe un elemento en común llamado *parche*, que dependiendo de su uso y forma recibe un nombre diferente. Computacionalmente es más complicado trabajar con superficies, debido a los complejos métodos matemáticos implícitos, que trabajar con sólidos.

Un parche se define como una superficie formada mínimamente por tres puntos y que no necesariamente tiene que ser plana, en la figura 2.1 se observa los dos tipos de ejemplos de parches:

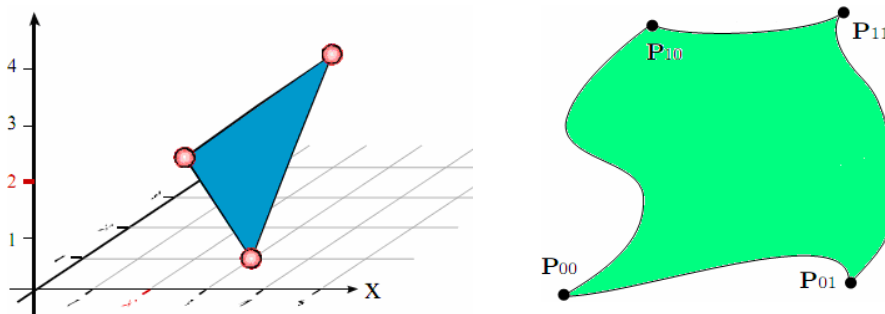


Figura 2.1 (Izquierda) parche de un polígono (derecha) parche de una superficie

Un parche por si mismo ya es una superficie o un polígono. La conexión de parches individuales permite el desarrollo y creación de modelos 3D tan complejos como se desee [2].

En los dos tipos de modelado tridimensional, existen figuras *primitivas* tales como el cubo, la esfera, el cono, el cilindro... que permiten un fácil desarrollo para la obtención de objetos más complejos.

2.2.1 Modelado con Sólidos/Polígonos

Un polígono se define con al menos tres vértices, y cada línea del polígono que une dos vértices recibe el nombre de edge (arista). De forma corriente se puede decir que un polígono es un conjunto de líneas que no se cruzan y están unidas por puntos coplanares, de tal forma que encierren un área simple convexa.

Como se ha visto anteriormente, un polígono es un parche, por lo que su unión con otros polígonos pueden llegar a formar diferentes tipos de objetos 3D. Pero la mayoría de los modelos del mundo real están compuestos por complejos conjuntos de triángulos que comparten vértices entre sí, por tanto, reforzando la definición de parche, a esto se le conoce como mallas triangulares o como *TINs* (del inglés Triangular Irregular Networks).

El siguiente paso es saber donde almacenar dicha información, con el objetivo de que el objeto creado puede ser manipulado con posterioridad y que la información ocupa la menos cantidad de espacio posible, para de esta manera poder hacer uso del manejo de texturas con total eficiencia.

Una primera idea fue almacenar los vértices de cada uno de los triángulos que conforman la malla, sin embargo existía redundancia de datos ya que varios de los triángulos comparten varios vértices, tal como se ve en la figura 2.2, y la adyacencia no está bien definida.

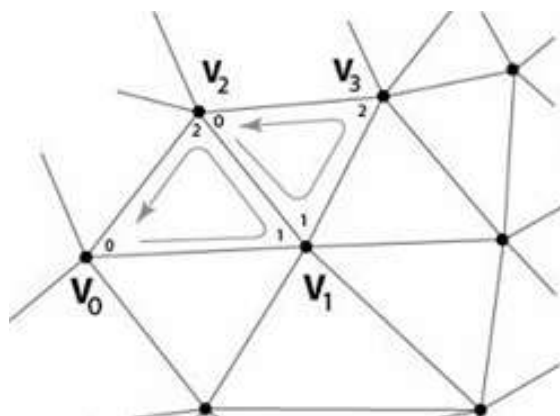


Figura 2.2 Redundancia de datos

Ante este inconveniente surgieron dos nuevas alternativas, por un lado los triángulos tipo *strip* y por otro los triángulos tipo *fan*, en los cuales la

idea principal es la de tener la menor cantidad de aristas, vértices, normales... con el objetivo de incrementar la performance.

En primer lugar se tienen los *fans*, que es un algoritmo básico en computación gráfica.

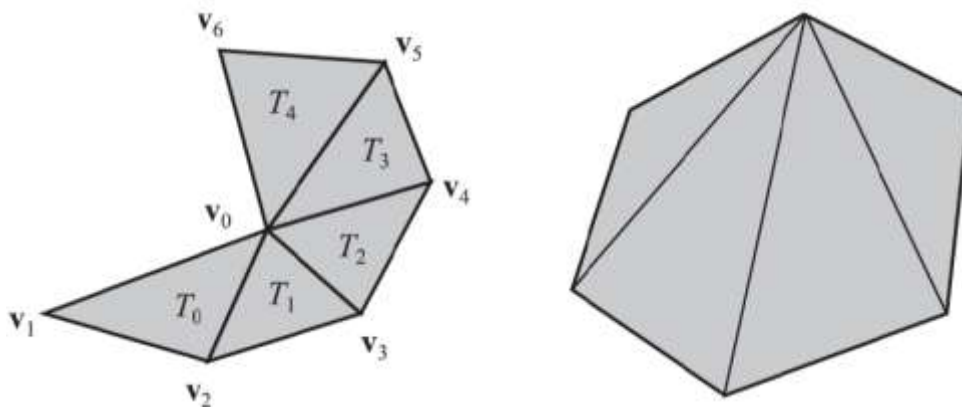


Figura 2.3 Almacenamiento de triángulos tipo fan.

Se ve que se comparte el vértice central V_0 . Los cálculos nos llevan a que por cada triángulo en la malla solamente se representan 1,4 vértices y no 3 vértices.

Además cualquier triángulo fan puede convertirse en cualquier triángulo strip, pero no ocurre lo mismo de forma inversa.

En segundo lugar se tienen los *Strips*, que son similares a los fans, pero no comparten V_0 y cada triángulo ayuda l siguiente, tal y como vemos en la siguiente figura:

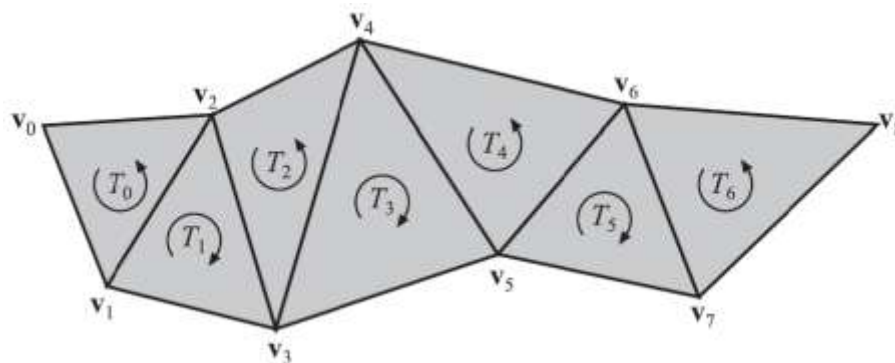


Figura 2.4 Almacenamiento de triángulos tipo Strip.



Por tanto en este caso se establece un orden secuencial de recorrido de los triángulos, dando lugar a algoritmos más eficientes, que no repiten vértices y que incluso pueden elegir en función de la conveniencia al dibujar.

En la siguiente figura se puede ver la generación de strips a partir de una malla triangularizada, donde cada uno de los colores de la figura 2.5 representa un strip:

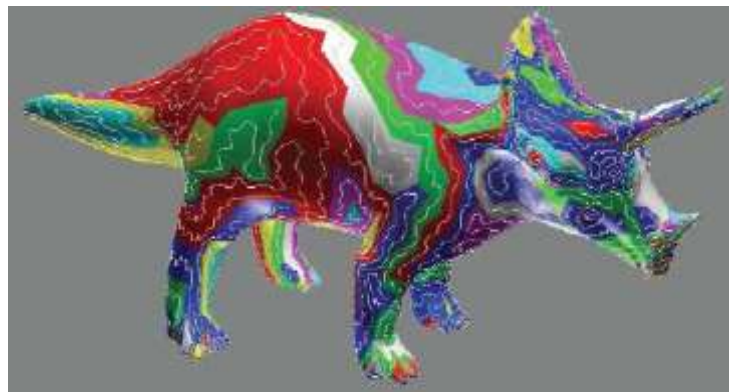


Figura 2.5 Generación de strips

Por tanto strip y fan permiten compartir parcialmente datos, pero este método hace que esta acción se realice de una forma mucho más cuidadosa y eficiente.

2.2.2 Modelado con Superficies

Existen diversos métodos matemáticos de interpolación y aproximación para la modelación de superficies, de los cuales los más solicitados e instaurados y por tanto más utilizadas son las NURBS, a continuación se nombran algunas de ellas:

- ✓ **Subdivisión de Poliedros:** Se fundamenta el alterar los vértices de un poliedro base, subdividiendo los lados y agregando vértices durante el proceso. Sin embargo posee dos inconvenientes importantes que son la posterior implementación por pantalla y el complejo manejo para el usuario.

- ✓ Método de Hermite: Se fundamenta en el uso de los polinomios de la familia de hermite, los cuales son interpolaciones y no aproximaciones, lo que permite actuar sobre los puntos de control y de esta manera poseer mayor manejo.
- ✓ Superficie de Coons: Uno de los primeros métodos desarrollados y propuestos en los orígenes de la modelación de superficies, y se basa en la determinación de cuatro curvas que definan las fronteras de la superficie.
- ✓ Superficies Splines: También llamadas NURBS, que como se dijo anteriormente son las mas utilizadas y provienen del inglés (Non-Uniform Rational Basis Splines).
- ✓ Superficies de Bezier: Profundizaremos a continuación de forma más detallada, además para hablar de este tipo de superficies es convenientes establecer primeramente unos conceptos básicos de las curvas de Bezier.

Las curvas de Bezier se calculan por aproximación a una serie de puntos, llamados puntos de control o vértices, con el objetivo de poder realizar una interpolación de curvas y así conseguir que estas sean más suaves.

El grado del polinomio n será determinado a partir del número de puntos de control tomados $n+1$.

Bezier calcula las coordenadas de un punto de la curva a partir del peso de los puntos de control que influyen en él. Ese peso está dado por la distancia al punto de control y una distribución normal ordinaria [2]. Así pues, el punto se obtiene sumando esos pesos.

En la figura 2.6 se observan los puntos de control citados anteriormente.

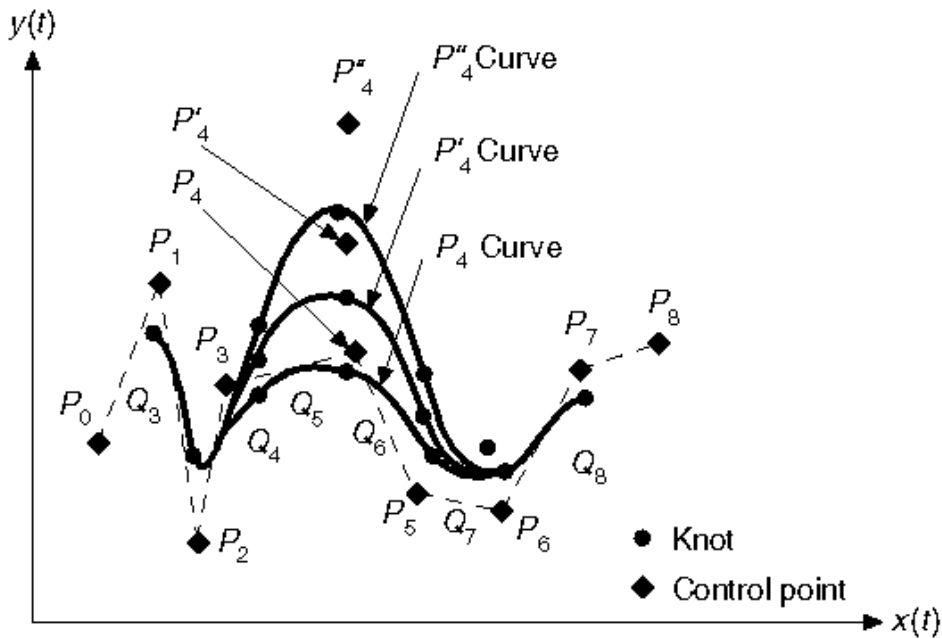


Figura 2.6 Puntos de control curvas de Bezier

Por tanto, dados $n+1$ puntos de control, P_0, P_1, \dots, P_n por sus coordenadas cartesianas (x_i, y_i) el polinomio de Bezier es:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n b_{i,n}(t) P_i, \quad t \in [0, 1] \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Un inconveniente de este método es que todos los puntos de la curva son afectados por los puntos de control, por lo que la curva sufrirá alteración si se mueve cualquiera de sus puntos.

Por otro lado para modelar superficies de Bezier se utilizan dos conjuntos de curvas de este tipo como se puede ver en la figura 2.7. En este caso se deben de introducir $(m+1) \times (n+1)$ puntos de control, obteniendo la superficie como el producto cartesiano de las curvas de control.

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) k_{i,j} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

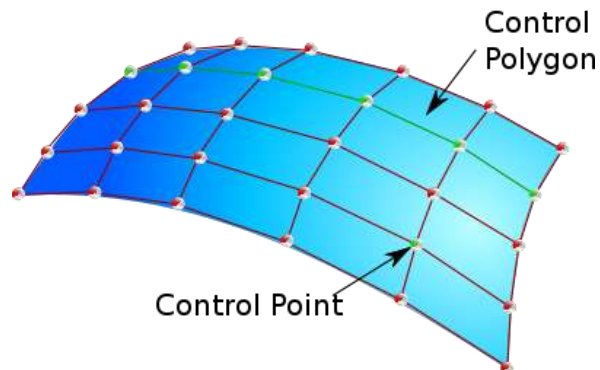


Figura 2.7 Superficie de Bezier con 30 puntos de control

Debido a la inconveniencia de Bezier por su carácter global comentando anteriormente, surgió una mejora del proceso con la aparición de las NURBS, las cuales se utilizan en la actualidad como implementación en librerías de gráficos y en software de graficación asistida.

Las mejoras más destacadas fueron la implementación de un vector nodal, conocido como Knot vector, y la racionalización a los puntos de control, de esta forma se consigue que el usuario tenga una mayor facilidad y autonomía para manipular un mayor número de parámetros y conseguir la curva o superficie deseada de una manera sencilla y fidedigna [1].

Cuando se habla de racionalización se refiere a la homogenización de las coordenadas de los Knot mediante la inclusión de un cuarto elemento $W(t)$ en la ecuación paramétrica:

$$Q(t) = (X(t), Y(t), Z(t), W(t)) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Una consecuencia positiva de esto es la invariación ante la rotación, translación y escalonamiento, lo cual significa que las rotaciones deben de ser únicamente para los puntos de control y de esta forma reevaluar la curva o superficie.



En la siguiente figura se puede ver los puntos de control representados por cuadros así como los nodos representados por círculos:

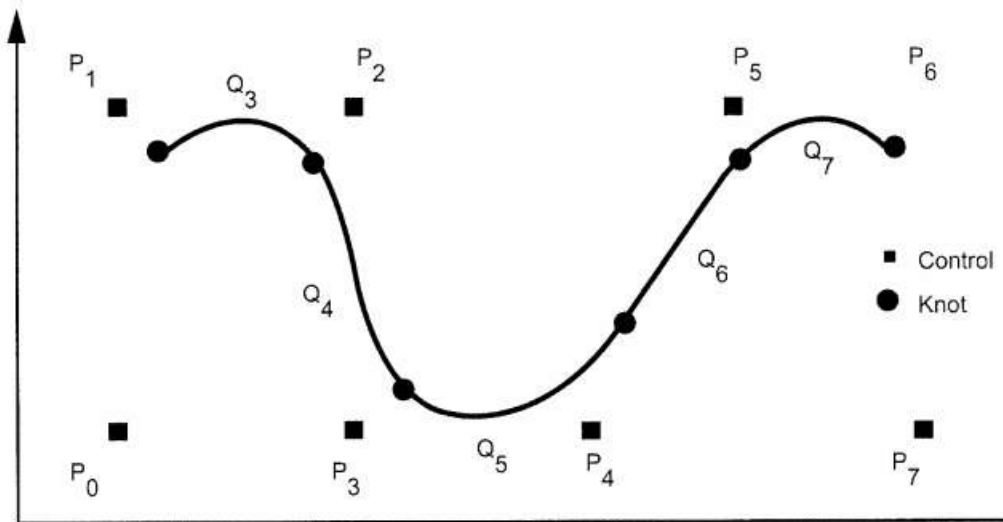


Figura 2.8 B-Spline Uniforme No Racional

3. ESTADO DEL ARTE



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se darán a conocer algunas de las investigaciones y proyectos de carácter internacional llevados a cabo durante los últimos años y en la actualidad acerca de la modelación tridimensional y de la impresión 3D apoyándose en artículos y libros con datos constatados.

Se mostrará una visión global de los descubrimientos y proyectos más relevantes, con el objetivo de que se puedan entender mejor cuáles son los aspectos básicos de este amplio mundo 3D.

En primer lugar se hablará del modelado tridimensional utilizando un scanner láser y un punto de algoritmo de registro nube, un tipo de scáner similar al David Láser Scanner. Seguidamente la impresión en objetos en 3D por unificación de partes mediante voxelización y análisis de la forma, de acuerdo al artículo publicado en 2015 por P.Song [6]. Construcción de casas mediante la tecnología de impresión 3D, obtención de pistones rotativos mediante escaneo láser en 3D, software libre Visual SfM y para finalizar reconocimiento tridimensional del rostro humano con un láser scanner 3D.

3.1. Modelado tridimensional utilizando un scanner láser y un punto de algoritmo de registro nube.

Este tipo de modelado supone un análisis tridimensional muy similar al software *David Láser Scanner*, pero en vez de utilizar una luz estructurada, se utilizará un barrido de láser para obtener la forma del modelo 3D de un objeto real que luego se puede aplicar en una amplia variedad de campos.

El artículo publicado en 2012 por J. Chen [3], sobre óptica y tecnología láser, basándose y adquiriendo referencias de los trabajos desarrollados por Gregory J. (2001) [4], en sistemas de inspección 3D de formas de piezas de automóviles basados en el patrón de luz estructurada; nos pone de manifiesto un método mediante el uso de un escáner láser 3D que puede explorar muchas veces y rápidamente la superficie sujeta para obtener conjuntos de coordenadas 3D de puntos geométricos espaciales de muestreo (llamadas nubes de puntos), que luego pueden ser utilizados para reconstruir la forma del objeto. Un escáner 3D es análogo a una cámara 2D cuando se utiliza principalmente para la recogida de la información rango (es decir, imagen del rango) de las superficies dentro de su campo de visión.

Con el fin de adquirir un modelo completo, se procede a escanear un objeto desde diferentes puntos de vista mediante la rotación del objeto para a continuación alinear las nubes de puntos obtenidas, y luego combinarlas

obteniendo un modelo completo. En otras palabras, de la nube de puntos de cada exploración se da un sistema de coordenadas local de acuerdo a la posición entre el objeto y el escáner, por lo que el sistema de la transformación de cada vista necesita ser computado para construir el completo modelo del objeto escaneado.

El esquema de hardware del sistema (Figura 3.1) es similar al *David Láser Scanner*, el cual es el centro de mi proyecto, pero la composición es más costo-eficiente: una cámara web (LogitechPro9000 con 2 millones de píxeles), un emisor láser de línea (rojo) y dos placas planas perpendiculares al suelo con la correspondiente malla de calibración.

El transmisor láser proyecta una línea láser sobre un objeto, y luego a través del mecanismo de triangulación, el escáner láser de mano mide la distancia a la superficie y crea los datos de la gama (Figura 3.2). Un usuario puede barrer a mano la línea de láser sobre un objeto 3D para adquirir digitalmente la forma de la superficie del objeto. Como hemos visto (Figura 3.2), el principio de triangulación de este sistema es muy sencillo, pero la precisión del sistema de adquisición de datos de escaneo láser 3D óptica, depende principalmente de las dos tareas fundamentales: la calibración de la cámara y la del rayo de láser de extracción de la línea central de la imagen.



Figura 3.1 Instantánea del montaje

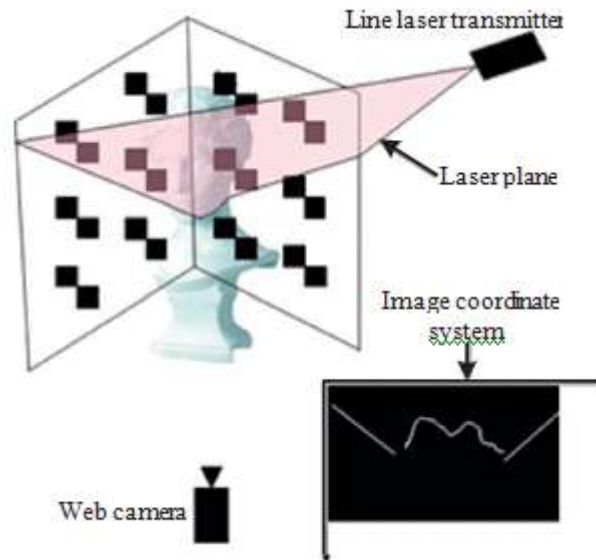


Figura 3.2 Esquema del análisis del montaje

La nube de puntos de cada exploración se da en un sistema de coordenadas local de acuerdo a la posición entre el objeto y el scanner, este mismo sistema de coordenadas será computado posteriormente para construir el modelo del objeto escaneado.

Jia Chen tras varias investigaciones y centrándose en las técnicas experimentales llevadas a cabo por Besl y McKay (1992) [5], sobre la ICP clásica (Puntos iterativos cercanos), asentó las bases de la ICP, convirtiéndose en el método dominante para registro de escaneo 3D, basado puramente en la geometría y a veces en el color de las nubes de puntos.

Tal y como publica en este artículo de óptica y etnología, la ICP inicia con dos nubes de puntos y una aproximación inicial para su transformación relativa como cuerpo rígido, y de forma iterativa redefine la transformación euclidiana generando repetidamente pares de puntos de las nubes de puntos y minimizando el error métrico.

Durante cada iteración, ICP tiene que hallar el punto más cercano desde el otro punto de ajuste para cada punto en el conjunto de puntos actual dado, lo cual es computacionalmente caro.



3.2. Impresión de objetos en 3d por unificación de partes.

Una de las limitaciones intrínseca de la impresión 3D es no poder fabricar objetos que sean mayores que el volumen de trabajo de la impresora 3D.

Esta limitación práctica ha sido señalada recientemente por *Song, P. y otros* (2012) [6], quienes propusieron la solución de dividir un objeto en partes 3D de tamaños manejables y a continuación montar las piezas impresas mediante reconstrucción del modelo.

Además de abordar esta limitación intrínseca, este enfoque tiene otras ventajas. En primer lugar, facilita el mantenimiento rentable ya que sólo hay que imprimir una pieza de recambio para una parte rota correspondiente en lugar de volver a imprimir todo el objeto. En segundo lugar, este enfoque es bueno para el almacenamiento y transporte ya que podemos desmontar un objeto 3D grande para ahorrar espacio y evitar que se rompa durante el transporte. Por último, al igual que los ladrillos de Lego, podríamos volver a montar un objeto 3D existente, cambiar algunas de sus partes, e incluso reconfigurarlo para diseños alternativos o una mejor apariencia.

Para conectar dichas partes impresas en 3D existen algunos enfoques comunes, por ejemplo, *Luo y otros* (2009 y 2012) [7] propuso la creación de piezas machos y hembras para su interconexión, mientras que *Shapeways* (2014) [8] propuso la unión mediante pegamento. Para el caso de conectores macho y hembra, puede que estos no proporcionen suficiente resistencia estructural para mantener las conexiones de piezas. Además, para las diminutas características impresas pueden romperse fácilmente durante el propio montaje o el transporte. Para el caso de pegamento, la unión de las partes 3D es una conexión homogénea pero permanente desalentando el posible reensamblaje objeto, mantenimiento rentable y reconfiguración.

Por tanto el enfoque de unificación de partes 3D llevado a cabo por *Xin y otros* y *Song y otros*, solventa los problemas de unificación mencionados anteriormente, para iniciarnos en los experimentos llevados a cabo por los citados autores de unión por unificación de partes 3D.

Estos autores en su trabajo, presentan un nuevo método basado en voxelización particional de un modelo de objetos 3D determinado de tal forma que el objeto 3D se puede imprimir con partes más pequeñas que están conectados por unificación 3D. Primero se voxeliza el modelo 3D de entrada y analizamos la forma local dentro de cada voxel, donde se desarrolla una

estrategia de deformación local para evitar la fragmentación en el voxel. En segundo lugar, se diferenciarán voxels internos y de contorno de acuerdo a la forma local de contenidos y se emplearan voxels internos para crear piezas iniciales entrelazadas 3D. Por último, se aplica la información de forma local, codificada por la forma y conexión entre voxels para guiar la construcción de la geometría de las partes finales. Por esto, podemos generar piezas 3D que son estructuralmente sólida y fuertemente conectadas por unificación 3D, sin costuras de corte a través de características obvias de objetos salientes.

Este método esta validado por la fabricación de una gran variedad de modelos que utilizan diferentes tipos de impresoras 3D. Algunas de las más ventajas más significativas son:

- En primer lugar, las conexiones de las piezas se consiguen por la propia geometría de las partes, sin necesidad de la creación de conectores pequeños adicionales, tales como conectores macho y hembra.
- En segundo lugar el objeto ensamblado puede ser desmontado y vuelto a montar repetidamente, lo que facilita el mantenimiento rentable, el almacenamiento y el transporte.
- En tercer lugar la unificación 3D es conocida por ser fuerte, evidenciado por su uso en grandes estructuras de madera de arquitectura; por lo tanto, este método de conexión nos permite lograr fuertes conexiones de piezas en 3D.
- Por último, nos permite producir piezas en 3D con superficie limpia y lisa sin necesidad de taladrar agujero y saliente.

Este es un gran proyecto que tiene que cumplir no sólo el complicado requisito de unificación 3D, sino también las exigencias geométricas y dimensionales de las partes impresas en 3D, así como mantener la apariencia del objeto después de su montaje. Los requisitos a cumplir son los siguientes:

- Entrelazado 3D: las piezas 3D impresas deben entrelazarse entre sí, pudiéndose montar y desmontar.
- Las piezas para imprimir no deben ser demasiado pequeñas, cada parte impresa 3D debe encajar en el volumen de trabajo de la impresora 3D de destino.
- Solidez estructural: evitar rasgos finos y / o débiles en las piezas en 3D, ya que tales características podrían romperse fácilmente durante la impresión de objetos, montaje o transporte.



- Conexión Fuerte: lograr fuertes conexiones de piezas en 3D, garantizando fuerte bloqueo entre las partes 3D en el conjunto de unificación 3D.
- Estética: evitar estructuras cortadas que pasan a través de las regiones más destacadas de la superficie del objeto montado ya que esto afecta a la apariencia del objeto.

Peng Song y Zhongqi FU asientan las bases de los métodos del estado de la técnica llevados a cabo por *Xin y Song (2012)* [9], dándose cuenta que la creación de estructuras entrelazadas 3D son insuficientes para manejar el problema ya que se centran principalmente en la exigencia de unificación 3D sin considerar la impresión 3D así como la solidez de la estructura y apariencia del objeto.

Para lograr los requisitos anteriores, *Peng Song y Zhongqi FU* desarrollan un nuevo enfoque basado en voxelización para construir partes de unificación 3D a partir de un modelo 3D dado. Sus contribuciones técnicas son tres:

En primer lugar, desarrollan un nuevo marco que puede crear unificación de piezas 3D a partir de modelos 3D de forma general, en donde nuevas ideas incluyen modelar el modelo 3D con el análisis de la forma local empleando voxels internos para crear piezas iniciales entrelazadas, y adjuntando voxels límites a las partes iniciales para conseguir la unificación 3D. En segundo lugar, proponen deformar la superficie del modelo de entrada sujeta a la voxelización, lo que ayuda a evitar las características de formas fragmentadas y desconectadas en las piezas 3D generados. Por último, proponen formas y conexiones gráficas que codifican información de forma local para guiar a las partes de la construcción geométrica y lograr solidez estructural y requisitos de estética.

Hay dos retos principales para la construcción de piezas entrelazadas por voxelización. En primer lugar, cuando se modeliza un modelo 3D, un voxel puede ser total, parcial o vacío de acuerdo a la forma local dentro del voxel. Más importante aún, un voxel parcial resultante puede tener varios tipos de formas locales, por ejemplo, un pequeño fragmento (Figura 3.3), fragmentos inconexos dentro de un voxel (Figura 3.4) o una estructura delgada (Figura 3.5). Por lo tanto, la modelación podría producir fácilmente una gran cantidad de voxels parciales no deseados por ejemplo, pequeñas o desconectadas formas locales. En segundo lugar, se conectan voxels vecinos para formar componentes 3D ensamblados, aquí se pueden generar algunas partes

problemáticas si conectamos arbitrariamente voxels en partes, por ejemplo, piezas con un fragmento débil (P1 en Figura 3.6) y partes con fragmentos desconectados (P2 en Figura 3.6). Para el caso de P2, no se puede resolver el problema uniendo por separado dos fragmentos a diferentes partes ya que esto puede violar la unificación 3D.

Para hacer frente a las cuestiones antes mencionadas, proponen analizar la forma local dentro de cada voxel parcial, y aplicar la información para guiar la construcción de piezas en 3D. De esta forma logran componentes estructuralmente fuertes (P3 en Figura 3.6) en el conjunto de unificación 3D.

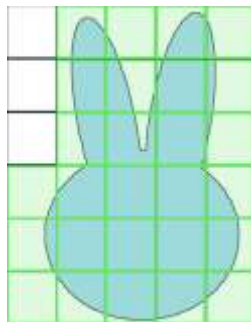


Figura 3.3 Una forma 3D y su voxelización

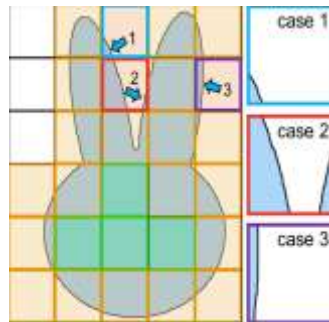


Figura 3.4 Completo (en verde) y parciales (en naranja / azul / morado / rojo) voxels: casos de fragmentos diminutos (caso 1), fragmentos inconexos (caso 2), y estructuras finas (caso 3), respectivamente

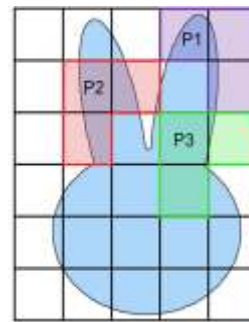


Figura 3.5 conectados los voxels en partes podrían producir fácilmente,



Figura 3.6 Piezas 3D delgadas y desconectadas (en morado y rojo(P1 y P2)); en lugar de estructuralmente estrechas, piezas 3D (en verde (P3))

La información general del enfoque de Peng Song y Zhongqi FU es tomar una superficie estanca 3D como entrada que engrane con un límite exterior bien definido y el volumen cerrado puede ser impreso en 3D, (Figura 3.7).



Figura 3.7
Modelo estanco
3D como
entrada

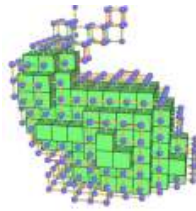


Figura 3.8
Voxelización y
análisis de forma



Figura 3.9
Creación de
piezas iniciales
entrelazadas

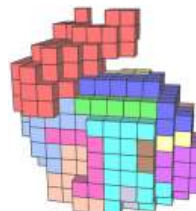


Figura 3.10
Fijación de
voxels de
contorno a las
piezas



Figura 3.11
Refinamiento de
las partes
geométricas

Dada una superficie estanca de entrada, primero colocan una malla voxel en el espacio de objetos 3D y ajustan ligeramente el tamaño del voxel para reducir el número de voxels parciales no deseados. Luego, modelizan el modelo de entrada. A continuación, se mide la intensidad de la conexión entre vecinos voxels (parciales) y se construye un gráfico de conexión forma mediante el análisis de las formas locales (Figura 3.8). Después de los trabajos de preparación anteriores, se construye un conjunto inicial de unificación de piezas 3D de los voxels internos (Figura 3.9). Por lo tanto, las piezas 3D iniciales pueden cumplir la solidez estructural y condiciones de conexión fuertes ya que todo los voxels empleados son suficientemente grandes y por lo tanto proporcionan un bloqueo suficiente para cumplir la integración 3D.

A continuación, se entrelazan los voxels parciales restantes obteniendo partes construidas unificadas y que servirán como guía por el gráfico de la conexión de forma (Figura 3.10) sin romper los requisitos cumplidos. Más tarde, se debe cumplir la exigencia estética reasignando voxels de frontera entre partes vecinas para evitar objetos salientes no unificados.

Por último, se construye la geometría de las piezas finales en 3D (Figura 3.11) mediante la unificación entre las partes voxelizadas (Figura 3.10) y la malla de entrada (Figura 3.7).

3.2.1 Voxelización y análisis de la forma

Antes de la construcción de la geometría de unificación de piezas 3D se realizan una serie de obras de preparación que incluye la voxelización, deformación de la forma local y gráfico de conexión.

Los estudios de *Peng Song y Zhongqi FU* toman como base modelo 3D estanco de entrada, primero voxelizando mediante el método desarrollado por (*Nooruddin y Turk, en 2003*), que arroja rayos paralelos a través del modelo y clasifica los voxels como interior o exterior.

Peng Song y Zhongqi Fu mejoran este método echando rayos paralelos adicionales no sólo para clasificar los voxels sino también para estimar la forma local dentro de cada voxel. Para un volumen acotado de $W \times H \times D$ voxels, primero construyen una $(K \times W + 1) \times (K \times H + 1) \times (K \times D + 1)$ rejilla de puntos 3D uniforme en su interior, donde tiene $K + 1$ puntos ejemplos a lo largo del borde de cada voxel. Luego dan $(K \times W + 1) \times (K \times H + 1)$ rayos a través del modelo para clasificar cada punto de muestra como interior o exterior, donde cada rayo pasa por $(K \times D + 1)$ puntos de muestreo, teniendo en cuenta que se puede hacer la colada de rayos a lo largo de cualquiera de los tres principales ejes de la cuadrícula.

La figuras 3.12 y 3.13 ilustra, el método de voxelización con un ejemplo 2D con $K = 6$. Los puntos verdes y grises clasifican los puntos de muestreo interiores y exteriores respectivamente. El voxel inferior derecha se detecta como un voxel parcial a partir de un punto de muestra interior, puntos rojos de la figura 3.13.

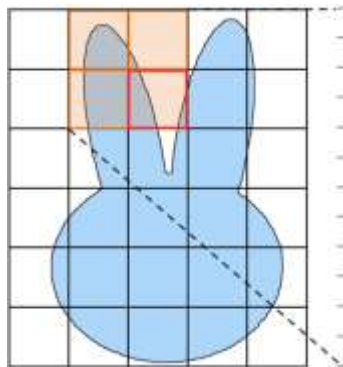


Figura 3.12 Forma 2D escogida para ilustrar el método de voxelización

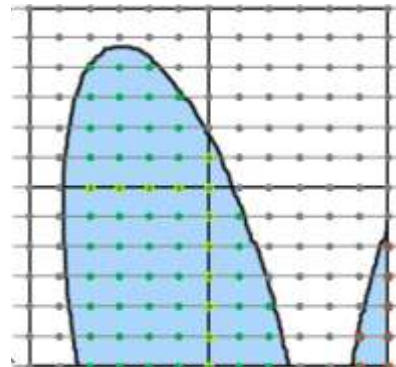


Figura 3.13 Puntos interiores (verde) y exteriores (gris) de muestra. En el voxel inferior derecho se detecta un voxel parcial desconectado por amplitud (ver círculos rojos)

A continuación, se calculan las propiedades de la forma local dentro de cada voxel en base a los puntos de muestreo clasificados:

- Forma del volumen local estimada contando el número de puntos de muestra interior y luego calculando su porcentaje de cobertura dentro del vóxel.
- El Tipo de vóxel es clasificado como completo, parcial o vacío basado en el valor del volumen de forma local, es decir, 1, (0, 1), y 0, respectivamente.
- El área de contacto de la cara del voxel parcial se estima calculando el porcentaje de puntos de muestra interior en la cara de contacto del voxel con su vecino, ver los puntos de muestra de color verde amarillento en la figura 3.13.
- La conectividad de la forma local en un voxel parcial está marcada por la amplitud de un punto de muestreo de interiores y por la comprobación de si se llega a todos los puntos de muestreo de interior en el voxel.

Para facilitar la forma de partición, deben evitarse diminutos voxels parciales o formas locales desconectadas (Figura 3.13). Por lo tanto, para la red voxel con una resolución dada, primero hay que ajustarse el tamaño de voxel ligeramente para reducir el número de voxels parciales no deseados. Esto se logra mediante el muestreo al azar del tamaño del voxel dentro de un pequeño rango y seleccionando el tamaño de el vóxel correspondiente al menor número de voxels no deseados.

Para evitar por tanto indeseados voxels parciales y pequeños fragmentos se va a realizar una deformación local del modelo 3D. Para un vóxel parcial con un fragmento pequeño (Figura 3.14), se calculan tres variables del fragmento mediante el examen (en promedio) de los triángulos de malla relacionados con el pequeño fragmento en el voxel:

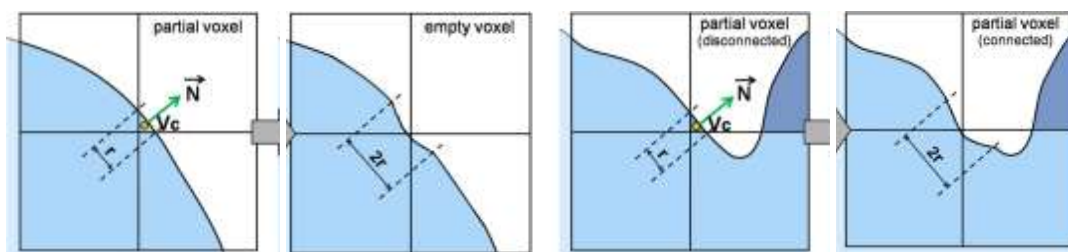


Figura 3.14

Figura 3.15

Figura 3.16

Figura 3.17

Deformación de la geometría local del modelo para eliminar un vóxel parcial con un fragmento diminuto

Resolución de un vóxel parcial con forma local desconectada.

Centroide V_c , superficie media normal N , y el radio de una esfera de delimitación r . Para un voxel parcial con fragmentos diminutos desconectados (Figura 3.16), las mismas tres variables se calculan para cada fragmento pequeño. Para evitar un fragmento pequeño, como se ve en la ecuación 3.1, se puede localmente deformar la geometría del modelo 3D moviendo de forma iterativa los vértices de malla relacionados con:

$$V_{i^{k+1}} = V_{jk} - \alpha (2r - \text{dist}(V_{jk}, V_c)) N \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde V_i es un vértice de malla dentro de una esfera de delimitación centrado en V_c con $2r$ de radio, y α es un parámetro para controlar la deformación, donde ponemos α como 0,01 en dicha aplicación. Hay que tener en cuenta que tenemos que volver a calcular las tres variables (V_c , N y r) para el pequeño fragmento deformado en cada iteración, y el proceso iterativo termina cuando el pequeño fragmento se desvanece en el voxel relacionado. (Figuras 3.15 y 3.17).

Para incluir más voxels y así lograr una buena integración también se tomaran algunos voxels parciales en cuenta en función del volumen de forma local, que ninguna cara voxel posea pequeñas zona de contacto y que al menos poseer un voxel completo como su vecino. Estos voxels son voxels parciales mientras que los completos serán internos formando el volumen interno:



Figura 3.18
 Voxelización de un pato



Figura 3.19 Voxels completos en el modelo

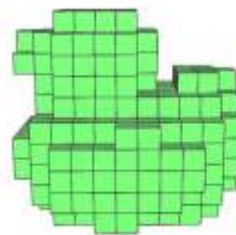


Figura 3.20 Voxels internos identificados

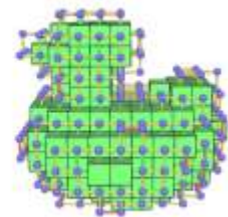


Figura 3.21 Gráfico de conexión de forma para los voxels de contorno

Para los voxels de frontera, se construye un gráfico de conexión de forma para describir su fuerza de conexión estructural con voxels vecinos (Figuras 3.21 y 3.23)

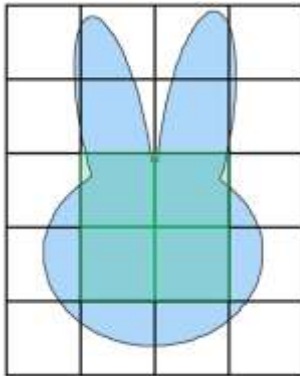


Figura 3.22. Voxels internos en verde y voxels de contorno

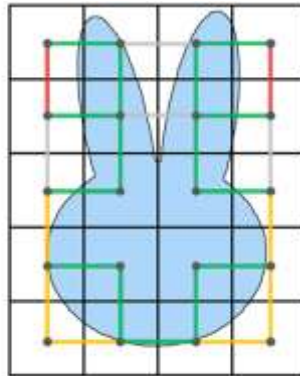


Figura 3.23. Forma grafica de conexión para los voxels de frontera débiles (rojo), normales (amarillo) y fuertes (verde)

Tal conexión puede ser identificado como ninguno, débil, normal o fuerte dependiendo del área de la cara de contacto normalizada (en los experimentos de *Peng Song* y *Zhongqi FU*, los valores se establecen en 0, (0, 0,05], (0,05, 0,25], [0,25, 1,0], respectivamente). La gráfica de conexión forma será más tarde de ayuda para evitar la creación de piezas 3D desconectadas o frágiles.

3.2.2. Generación de partes 3D entrelazadas e implementación y actuación

Las partes extraídas 3D son unificación general y se debe de cumplir el requisito general de unificación en cada $k > 3$ partes inmediatamente consecutivas en la construcción de ellos.

El tamaño de cada parte 3D no debe exceder el volumen de trabajo de la impresora 3D. Por lo tanto, en la construcción de una parte 3D, se mantiene la actualización de su cuadro delimitador cuando crece de acuerdo con el procedimiento previsto y se le dará un nuevo voxel a ella sólo si su cuadro delimitador todavía está contenido dentro del 3D del volumen de trabajo de la impresora. A continuación se procederá a la unión entre de voxels límites a las partes iniciales de las piezas 3D.

Para montar de nuevo el objeto 3D dado, todos los voxels de frontera tienen que ser unidos a las piezas 3D iniciales manteniendo los diversos requisitos de fabricación. En este apartado se tiene en cuenta que la fijación de voxels a las partes iniciales 3D podría reforzar las piezas de bloqueo, por lo que el requisito fuerte conexión siempre se puede mantener siempre. Para adjuntar voxels de contorno se desarrollo un método iterativo para unir a las piezas 3D iniciales una por una a través de un algoritmo. Para un voxel límite dado, se trata de encontrar una de sus partes vecinas para fijar el voxel, sin violar los requisitos de fabricación. Aquí se emplea el gráfico de conexión de forma para asegurar que un voxel límite está unido a una parte 3D solamente cuando se comparta una fuerte conexión estructural (es decir, área de contacto grande).

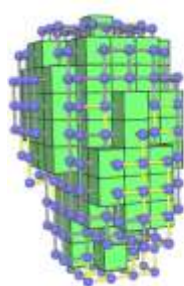


Figura 3.24
Gráfico de
conexión

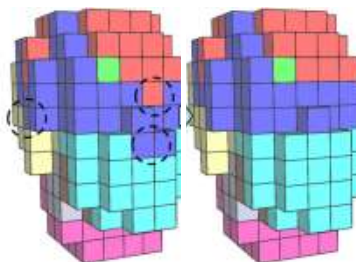


Figura 3.25 Figura 3.26
Piezas voxelizadas antes y
después de cortar el
refinamiento de la costura

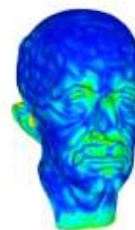


Figura 3.27
Mapa
destacado

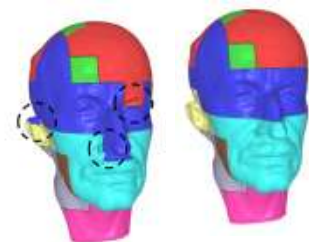


Figura 3.28 Figura 3.29
Piezas 3D refinadas sin y
con corte de costura

En las figuras anteriores los voxels reasignados y costuras de corte indeseables están marcados con círculos negros.

Por último se procede a la impresión del modelo donde se aconseja que el modelo sea dividido en al menos 10 partes, ya que un mayor número de piezas requiere más tiempo para la impresión 3D y montaje físico.

Se debe de tener en cuenta que tal vez el rendimiento depende de varios factores, como el número de piezas en 3D, la complejidad de la forma del modelo, la resolución de la malla de entrada, y la resolución de la voxelización (Figura 3.30).



Figura 3.30. Partes de enclavamiento impresas en 3D (izquierda) y el objeto ensamblado correspondiente (a la derecha).

3.3. Construcción de casas mediante la tecnología de impresión 3D

Según un artículo de la revista *Muy Interesante* publicado el 14 de abril de 2015 [10], he podido conocer y entender uno de los proyectos más recientes, impactantes e innovadores, que empuja las posibilidades de la tecnología de impresión 3D y la arquitectura y en donde podemos ver el claro potencial de investigación de la impresión 3D es el proyecto llevado a cabo por *Wisun Decoration Design Engineering*, una constructora china con sede en Shangai que ha puesto en marcha un proyecto para la construcción masiva de casas producidas mediante la tecnología de impresión 3D.

El director ejecutivo Ma Yihe declaró en una entrevista que la principal ventaja de la construcción de casas con impresoras 3D es que el proceso se hace más rápido y asequible. Además el método de construcción de casas de un piso produce menos residuos, y algunos de ellos se pueden reutilizar.

Una enorme impresora 3D, de 32 metros de largo, 10 metros de ancho y 6,6 metros de altura se utiliza para imprimir cada uno de los elementos estructurales de las casas. Las casas de 200 m² se imprimen con tinta especial, residuos de la construcción y residuos industriales que se reciclan; lo mejor es que se construyen con muy poca mano de obra y son relativamente baratas.



Figura 3.31 Impresora 3D de impresión de casas



La impresora, tal y como vemos en la imagen, consta de dos brazos telescópicos, unidos por una viga transversal que aloja el cabezal de impresión. Estos brazos se mueven en horizontal mediante grúas y en vertical mediante la grúa de cada brazo.



Figura 3.32 Funcionamiento Impresora 3D para impresión de casas

Al cabezal llega directamente desde la impresora una mezcla especial de hormigón de secado rápido que se va depositando por capas en las zonas determinadas según el prototipo creado digitalmente. Una vez acabado el proceso se requiere el trabajo humano para la instalación de puertas y ventanas, así como de la instalación de electricidad y agua.



Figura 3.33 Método de extrusión para impresión de casas

La constructora china fue capaz de imprimir 10 casas como la de la que se muestra en la Figura 2.34, en poco menos de un día.



Figura 3.34. Casa obtenida mediante una impresora 3D de grandes dimensiones

Aún así se trata de un proyecto en desarrollo con lo que tardará algún tiempo en materializarse y salir al mercado ya como algo visto de forma normal para su uso cotidiano. Cuando lo haga la impresora 3D desbancará por completo al ladrillo, al abaratar los costes de producción y facilitar la posibilidad de personalizar nuestro hogar como nunca habríamos imaginado.

3.4. Obtención de pistones rotativos mediante escaneo láser en 3D

Un artículo publicado por *Word Pumps* (Mundo de las bombas) sobre nuevas tecnologías y productos [11], nos va a ser interesante y de ayuda para conocer un poco mejor las nuevas tecnologías que se están utilizando en el análisis de bombas en busca de la precisión estructural mediante análisis 3D.

Un fabricante universal de impresoras 3D, está usando un laser Micro-Epsilon y sensores de desplazamiento de laser para medir, en particular, la superficie y posición de pistones rotativos. Este método no solo se puede aplicar a pistones rotativos sino que tiene una amplia gama de aplicaciones en objetos de rotación simétrica, lo cual lo hace ser un artículo interesante a incluir en nuestra visión del mundo 3D. El estudio ha sido desarrollado debido a la necesidad de precisión estructural que deben de tener las bombas de dichos pistones rotativos, las cuales deben ser de clara exactitud para su mejor rendimiento y por tanto funcionamiento abaratando costes. La vida de la bomba de estos pistones rotativos depende de la exactitud existente entre la propia bomba y la carcasa que ajusta la superficie del pistón. Esto significa que el conjunto del pistón debe cumplir unas tolerancias muy precisas.

Qsigma GmbH con sede en Kassel, Alemania, es la responsable del desarrollo de una máquina de medición universal 3D para estos tipos de aplicaciones que consta de un perfil de laser escáner Micro-Epsilon 2700 con un rango de medición de 50 mm que se utiliza para registrar la forma o el perfil de la superficie del pistón (Figura 3.35)



Figura 3.35 Perfil del láser escáner Micro-Epsilons' 2700

Además dispone de un sensor laser en desplazamiento (opto NCDT2000) con un rango de medida de 200 mm, el cual está integrado en la máquina de medición Qsigma, con el objetivo de determinar la posición precisa de los componentes. Dicho sensor adquiere 10.000 valores de distancia cada segundo, operando con una resolución de 3 μm .

El pistón gira durante las mediciones. Se requieren sólo cinco segundos para una inspección automática del pistón. Después de escanear con éxito las geometrías de superficie, los datos se compararon con los del objeto de destino. Además de pistones rotativos, el sistema también se puede utilizar para medir otros objetos de rotación simétrica como ya hemos mencionado anteriormente.



3.5. Reconocimiento tridimensional del rostro humano con un láser escáner 3D

Las superficies que viven con el rostro humano no solo tienen un grado de complejidad, sino la influencia de otra serie de factores como los artefactos de movimiento. Dentro de este tema es importante establecer normas para el procedimiento de registro de datos, que permita optimizar los resultados y una mejor optimización y comparación.

El estudio publicado por Kovacs, y otros (2006) [12], se centra en el reconocimiento tridimensional del rostro humano con un láser scanner 3D, basándose fundamentalmente en las bases establecidas por Aung, Ngim y Lee (1995) [13], en el que se analizan los rostros de cinco personas masculinas en diferentes contextos experimentales utilizando digitalizadores 3D sin contacto.

Los principales parámetros que influyen en el método estudiado dependerán fundamentalmente del número de escaneos realizados, del ángulo de la grabación, la posición de la cabeza de la persona sometida a la prueba o de la precisión de los modelos 3D de caras generadas entre otros. Los modelos generados serán comparados con las correspondientes medidas de referencia tomadas sobre el rostro humano llevadas a cabo de forma manual mediante los puntos de referencia tomados en el rostro humano. Este estudio se ha llevado a cabo debido a la necesidad, en cirugía plástica y maxilofacial, de la medición exacta y visualización de los tejidos óseos y blandos faciales, con el objetivo de hacer reconstrucciones faciales de mínimo error y por tanto de la máxima exactitud posible. De hecho en los últimos años el aumento de informes publicados de escáneres de superficie en la medicina ha sido masivo. La exanimación del rostro humano lleva una serie de complicaciones especiales, que la tecnología del escáner no refleja en procesos industriales.

Este estudio establece como base varias publicaciones reflejadas en importantes artículos de análisis de antropometría como la de Enciso, Shaw, Newman y Mah (2003) [14]. El objetivo de este estudio es determinar en qué medida se confirman los hallazgos realizados en pruebas con seres humanos y poder investigar la influencia de factores adicionales asociados con la superficie del cuerpo humano. El escáner utilizado es un *Minolata Vivid 910* para explorar los rasgos faciales humanos. Para generar una imagen virtual completa de la cara deben ser realizadas varias tomas individuales para su posterior cálculo en una imagen compuesta. Por otra parte se utilizó un

ordenador guiado por mesa rotatoria (*Konika Minolta Sensing*). La posición de la cabeza en el experimento fue definida por el ángulo entre la línea imaginaria Frankfort (que conecta el margen superior del canal auditivo externo con el margen inferior de la cavidad orbital) y la horizontal. El grupo objeto de estudio consistió en 5 varones de una media de edad de 27 años. En los rostros de los voluntarios se identificaron 48 puntos de referencia que están bien establecidos en antropometría según los estudios realizados por Ferrario, Sforza, Schmitz, Miani y Serrao (1998) [15], y cuya localización en la cara de una persona de prueba se pueden ver en la siguiente figura:

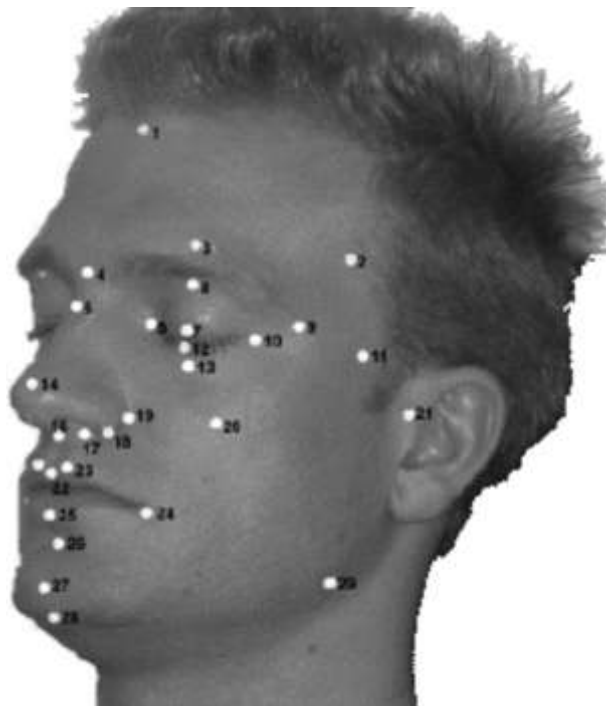


Figura 3.36 Puntos de referencia en la cara de una persona

Todos los modelos fueron creados a través de la fusión de dos tomas de cámara escáner tomadas desde ángulos oblicuos con un Angulo de 30° sobre el perfil de izquierdo y derecho de la cara respectivamente, por medio de un escáner o con dos escáneres vinculados.

En otro escenario estas dos tomas de cámara se complementan con una tercera capa tomada directamente frente a la cara. Por último, se usa la mesa giratoria, para calcular los modelos de seis conchas individuales tomadas en un sistema automatizado de rotación de 360 grados de la cara



alrededor de un escáner estacionario. Los modelos de cara tridimensionales virtuales, obtenidos en las pantallas de ordenador, fueron inspeccionados por los examinadores para localizar e identificar los puntos de referencia definidos previamente en el protocolo. Con el fin de captar la naturaleza compleja de la superficie tridimensional de la cara, se determinó un total de 345 distancias 322 ángulos.

Los resultados obtenidos por este estudio demostraron que la precisión de los modelos de cara virtuales podría mejorarse reduciendo al mínimo el tiempo de examen general así como el tiempo de exposición efectiva y también evitando el reposicionamiento de la posición de la persona en el examen. Además, los modelos virtuales obtenidos mediante el uso de dos escáneres unidos entre sí mostraron una mayor precisión que los generados con un solo escáner.

Por otro lado los ensayos realizados sobre las personas que se sentaban en una mesa giratoria para la toma de datos en rotación de 360 grados controlada por ordenador se concluyó que los modelos virtuales que se obtuvieron eran significativamente de menor precisión que los modelos llevados a cabo sin la mesa giratoria; además la precisión de las lecturas de distancia de los modelos virtuales eran mejores cuando la lectura se realizaba mediante dos cámaras, obteniendo modelos virtuales catalogados como muy fiables. Se adjunta la siguiente tabla donde se recogen los resultados de las pruebas llevadas a cabo:

Table 1 Reliability of distance readings between landmarks taken from the virtual models depending on the number of scanners used and shells recorded; given in four categories, as percentage of total

No. of scanners and no. of shells taken for one model	Highly reliable (%)	Reliable (%)	Moderately reliable (%)	Unreliable (%)
1 scanner, 2 shells	13.64	9.09	13.64	63.64
1 scanner, 3 shells	9.09	9.09	13.64	68.18
1 scanner – rotary table – 6 shells	14.25	4.55	4.55	76.64
2 scanners – SCSi, 2 shells	28.57	7.14	10.71	53.57

Figura 3.37 Precisión de las lecturas de distancia de los modelos virtuales

Fuente:[15]

En relación a esta tema de reconocimiento tridimensional del rostro humano se debe nombrar el programa *INTRAFACE* (IntraFace project, Human Sensing Laboratory-Robotics Institute-CMU and University of Pittsburgh) desarrollado por la Universidad de Pittsburgh y con colaboración de la Fundación Nacional de Ciencia Norteamericana. Se trata de un algoritmo que detecta rasgos faciales del rostro humano, detectando puntos característicos de diferentes partes de la cara como ojos, cejas, nariz o boca), el cual está disponible de forma pública en Matlab o C++.

3.6. Visual SfM

El software visual SfM (Structured from Motion) es un proceso de fotogrametría que se encarga del estudio de las propiedades y características geométricas de objetos reales a partir de fotografías. Su objetivo es la creación de una nube densa de puntos para a partir de ellos recrear las vistas 3D [16].



Figura 3.38 Nube de puntos a partir de una fotografía

Fuente: The Cambridge History of Science, Volume 3 Early Modern Science

Este programa por tanto trabaja con información tridimensional a partir de imágenes 2D solapadas; de esta forma los solapados creados van a poder garantizar puntos comunes con los que se crean las vistas 3D.

El éxito de este software reside en que en la mayoría de los procesos tradicionales hasta la irrupción del SfM las nubes de puntos comunes entre imágenes no estaban excesivamente pobladas, sin embargo con SfM dichas nubes pueden llegar a tener miles de puntos.

El Visual SFM se basa en el algoritmo de extracción de características (SFIT), publicado en 1999 por *David Lowe* [17], cuyo objetivo es la detección de puntos comunes o claves entre pares de imágenes para constatar un gran número de imágenes.

Este algoritmo a su vez se basa en la idea de *espacio de escala*, idea que opera realizando cuatro etapas esenciales para describir los puntos claves de una imagen:



- Detección del espacio de escala: Se basa en una reducción de imágenes gaussianas también llamada *suavizado*.
- Filtrado y Localización de puntos clave: se trata de realizar una comparación de puntos clave entre estos y sus adyacentes, con el objetivo de buscar el punto en el cual la diferencia gaussiana es máxima. En este apartado se necesita hacer un filtrado de puntos de bajo contraste y puntos de bordes, es decir, una eliminación de puntos no esenciales.
- Asignación de rotaciones: Este proceso se realiza para asignar a los puntos clave una independencia de rotación.
- Cálculo de descriptor: A cada punto clave se le calcula un descriptor que lo identifique como único y lo caracterice por ser invariante a características indeseables como la iluminación o la rotación.

Una vez aplicado el proceso anterior se obtiene una nube de puntos capaz de transmitir buena información sobre una geometría; sin embargo, son insuficientes para evaluar en detalle un objeto o escena.

Por todo lo anterior mencionado, el paso final de estos procesos de SfM suele ser una nube de puntos densos que describen de forma más detallada los objetos a analizar en cuestión.

Es conveniente señalar que el SfM, o también llamada estructura del movimiento, ha sido el problema central de la visión por computador por más de 15 años, con más artículos dedicados a él que a cualquier otra área, según narra John Olienses [18].

4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

4.1 Introducción concepto de luz estructurada

Asentados los conceptos básicos de modelación 3D, así como los tipos de modelación más destacados y las investigaciones y acontecimientos más relevantes ocurridos en el mundo de investigación y experimentación 3D que se han podido leer y ver en profundidad en los apartados anteriores, además de instaurado el objeto y justificación del TFG, es momento, antes de introducirse en el núcleo del análisis del problema, de definir y detallar en profundidad el concepto de *luz estructurada*, concepto básico para la realización y análisis de este TFG.

Para poder definir de forma clara y correcta el concepto de luz estructurada se deben establecer varios conceptos iniciales antes.

En primer lugar la clasificación de nivel más superior de un escáner 3D es que puede ser *de contacto* (o máquinas de medición de coordenadas), y *no contacto*.

Un escáner de contacto, como el de la figura 4.1, debe de tener forzosamente contacto directo o físico con el objeto o pieza objeto de estudio y medición, trayendo como inconvenientes la lentitud en la toma de datos para la medición así como el posible daño o deterioro sobre la superficie del objeto dependiendo de la composición de su material y de la fuerza que aplique el escáner, generalmente a partir de un brazo electromecánico.

No obstante este tipo de escáneres son los más utilizados en la industria, fabricados entre otros por la marca ZEISS [20]. Sin embargo, las investigaciones que se llevan a cabo y los escáneres 3D implementados hasta la fecha son en su mayoría de no contacto.

En los escáneres de no contacto se requiere de múltiples escaneos, (range images) desde diferentes ángulos, donde el trabajo principal es la alineación y registro de los datos obtenidos ya que normalmente el conjunto de datos esta desalineados, ver figura 4.2, es decir, realizar las operaciones correspondientes para que los datos tengan el mismo sistema coordenado 3D.



Figura 4.1 Escáner de contacto ZEISS

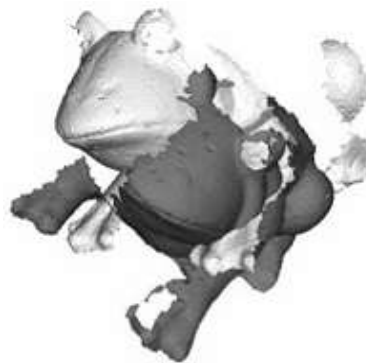


Figura 4.2 Range image sin alineación

Además uno de los principales inconvenientes en los escáneres de no contacto es la dificultad para reproducir ciertas zonas complejas del objeto a tratar como hoyos, oclusiones de ciertas partes... todo ello influenciado por la posición de la cámara.

Establecida esta primera clasificación, los digitalizadores 3D de no contacto se clasifican a su vez en *activos* y *pasivos* [21]. Los primeros emiten algún tipo de energía como por ejemplo un patrón de luz sobre el objeto de estudio detectando de esta manera su posición para llevar a cabo una correcta medición, mientras que los segundos simplemente se basan en la intensidad de luz de las imágenes para obtener de esta manera la

profundidad y dar una fidedigna reproducción del objeto de estudio a reproducir. Los siguientes apartados se centrarán únicamente en definir los digitalizadores 3D activos.

Dependiendo de las técnicas y tecnología utilizada la implementación de un escáner activo será de una manera u otra, dando lugar a escáneres de *luz estructurada*, *láser*, *radar* o *sonar*... Como se dijo en capítulos anteriores este trabajo se centrará en profundizar detalladamente en el tipo de *luz estructurada*.

4.2 Concepto de luz estructurada

Los escáneres de luz estructurada, método que será utilizado para el análisis y experimentación en el que se basa este TFG y que se verá en capítulos posteriores, se basan en la proyección de un patrón de luz sobre el objeto de estudio a tratar de tal forma que el objeto sea cubierto completamente, y una cámara web encargada de registrar los sucesos.

El patrón de luz utilizado ha sido investigado y tratado con el objetivo de obtener cada una de las ventajas que puedan tener unos con respecto a otros, siendo los más implementados los patrones de luz de cuadrícula binaria o de colores así como los patrones de líneas horizontales y verticales, patrón utilizado en este presente Trabajo Fin de Grado [22].

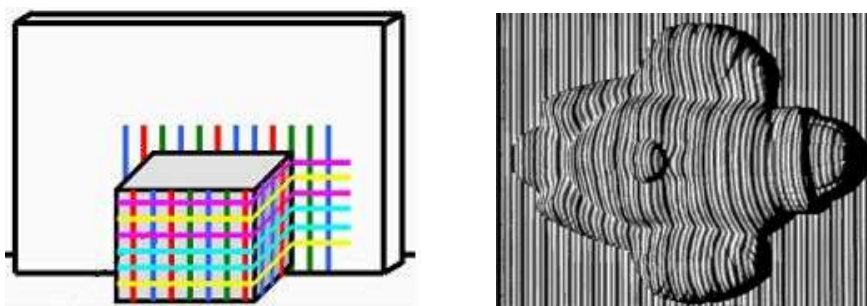


Figura 4.3 Patrón de luz de cuadrícula de colores (derecha), patrones de líneas horizontales y verticales (izquierda)



Por otro lado y con el objetivo de tratar las diferencias con otro tipo de tecnologías se definirán algunos de los métodos que compiten en el mercado junto con la luz estructurada como son el escáner 3D láser y los radares y sonares.

Los escáneres 3D láser son un subconjunto de los de luz estructurada ya que también emiten un patrón de luz, que puede ser una línea o un conjunto de varios puntos, y que por su gran versatilidad, utilización y experimentación se ha considerado una técnica totalmente independiente.

Estos escáneres se pueden dividir en dos grupos claramente diferenciados, por un lado los conocidos como *time-of-light*, en este caso se emite un haz de laser sobre el objeto a estudiar, el cual será reflejado por el objeto, y se calcula la distancia a partir de la velocidad-tiempo que tarde el haz en rebotar. Este tipo de escáneres tienen gran aplicación en toma de datos de objetos de tamaño considerable y largas distancias así como en escenas de una complejidad alta (ver figura 4.4).

Y por otro lado el escáner 3D láser por *triangulación* que también hace uso de un haz de laser para proyectarlo sobre el objeto y una cámara web que analiza la ubicación del propio láser sobre el objeto. Este tipo de tecnología recibe el nombre de triangulación porque la fuente de luz, el objeto a estudiar y la cámara web representan los tres vértices de un triángulo, sin embargo la distancia de trabajo deberá de ser considerablemente inferior que en la tecnología láser *time-of-light* (ver figura 4.5).

Es importante recalcar que dicho método de triangulación también puede llevarse a cabo con luz estructurada, de hecho en capítulos posteriores, concretamente en instalación y equipo de trabajo, se podrá apreciar dicha tecnología, donde frecuentemente se utiliza una superficie giratoria que sirve de apoyo a la pieza objeto de escaneo y que permite a la cámara web tomar imágenes durante los 360° y procesar la información para finalmente obtener la geometría completa del objeto. (Ver figura 4.14 correspondiente al método de experimentación y toma de datos de este TFG y que es análogo a la teoría vista en este apartado de concepto de luz estructurada).

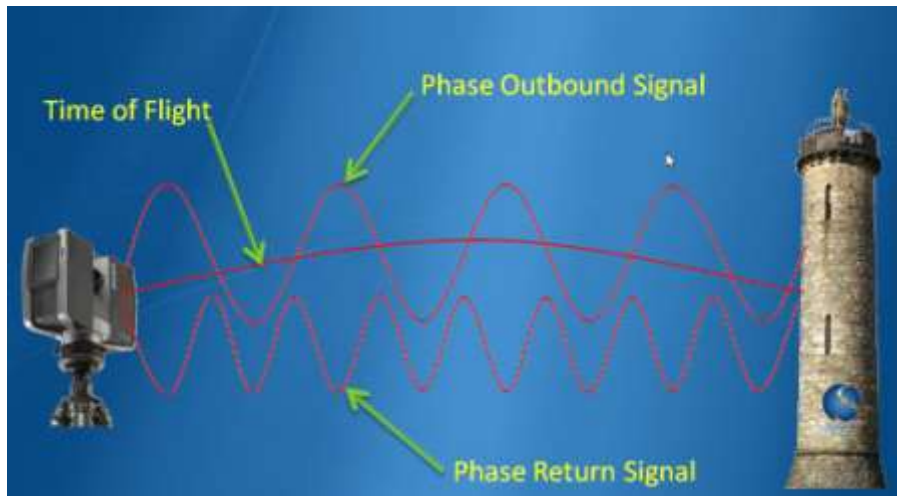


Figura 4.4 Técnica tecnología escáner time-of-flight

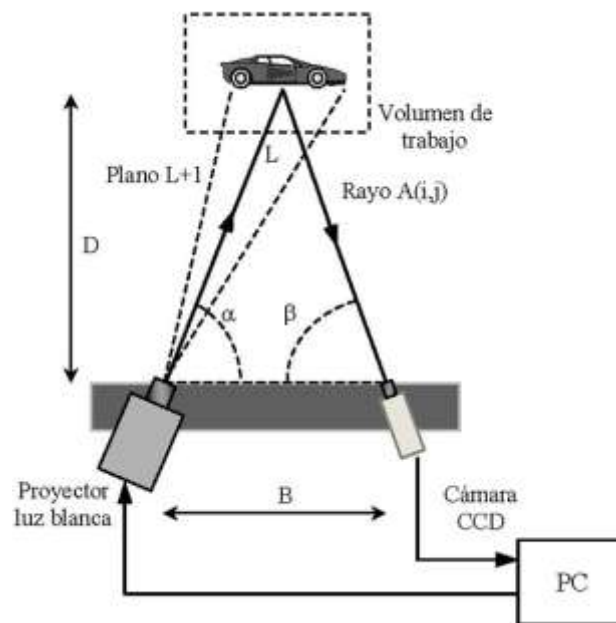


Figura 4.5 Esquema de escáner láser por triangulación

Por último los *radars* y *sonares* (Figura 4.6), son sensores que emiten una onda electromagnética corta o bien un pulso, siendo capaces de detectar la onda que rebota sobre la superficie, para que de esta forma la distancia puede calcularse como una función del tiempo.

Además por el esquema de funcionamiento y adquisición de datos que siguen estos dispositivos se pueden considerar un escáner tipo time-of-flight e incluso también puede lanzar un pulso o patrón de luz.

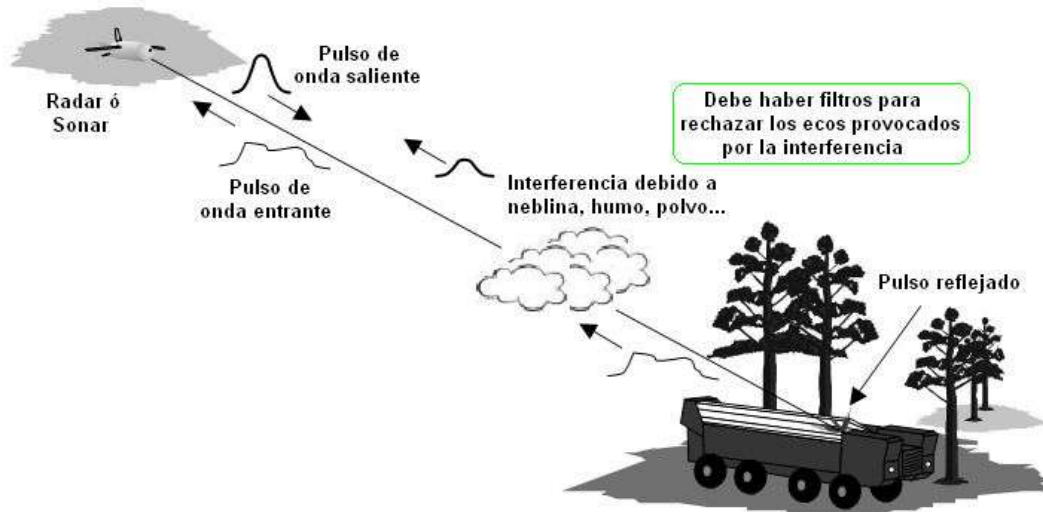


Figura 4.6 Esquema de un radar o sonar

4.3 Instalación y equipo de trabajo

En primer lugar el kit de trabajo utilizado, como se ha comentado anteriormente, puede tener dos variantes de uso más destacados, por un lado utilizar un digitalizador láser 3D (por ejemplo de puntero rojo), cuyo barrido de la pieza se realiza de forma manual (además se ha comentado en el estado del arte uno de los proyectos internacionales más relevantes llevados a cabo, (Chen, 1992)) o bien, la aplicación de una luz estructural sobre la pieza real mediante un proyector, y cuyo análisis técnico ha sido explicado con profundidad en el capítulo anterior [17].

La técnica de obtención de la imagen 3D se puede dividir en varias etapas claramente diferenciadas. Inicialmente se va a comentar cuales son los pasos a seguir para un buen manejo del software y así obtener los modelos 3D finales de forma precisa, enumerando los aspectos básicos a seguir para el buen funcionamiento del programa para, de esta manera, concluir con los ensayos experimentales de los que hablaremos en apartados posteriores.

El primer paso será colocar el equipo y los dispositivos que va a intervenir en el proceso de forma adecuada. Estos elementos son:

- ✓ *Pieza a modelar.* Como pieza real se va a modelar una peonza (Figura 4.7) de madera de pequeñas dimensiones. Los ensayos experimentales sobre dicho modelo se trataran en apartados posteriores.



Figura 4.7 Pieza a modelar

Además se incluirá el análisis de un tarro de barro (Figura 4.8), para garantizar que todas las piezas de revolución salen fiables con el software David Laser Scanner. Su forma la vemos en la siguiente imagen:



Figura 4.8 Tarro de barro

- ✓ *Un ordenador personal*, donde se instalará el software de análisis tridimensional por medio de un pen drive de instalación del producto que hemos adquirido del kit de compra del David Laser Scanner.



Figura 4.9 Pen drive David Laser Scanner

- ✓ *Cámara web*. La cámara web utilizada (Figura 4.10) ha sido el modelo Logitech pro C900, requerida para filmar imágenes de alta calidad.



Figura 4.10 Cámara web Logitech-pro C615

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

- Grabación full HD 1080p (1920 x 1080 píxeles)
 - Enfoque automático de alta agama y corrección automática de iluminación escasa
 - Diseño giratorio
 - Tecnología fluid Cristal, imágenes más nítidas y colores más vivos.
- ✓ *Un proyector* (Figura 4.11) el cual estará conectado a nuestro ordenador y mediante el software David Laser Scanner podrá aplicar una luz estructurada sobre la pieza real a modelar, es decir, se encargará de realizar los diferentes escaneos de la pieza para obtener nuestro modelo tridimensional dentro del programa.



Figura 4.11 Proyector Acer

- ✓ *Córner de calibración*, servirá de estructura de fondo durante el escaneo. Se trata de un sistema diédrico formado por dos paneles planos formando un ángulo perfecto de 90° (Figura



4.12). Sobre estos paneles planos se pegarán el patrón de calibración que nos marca el software David laser Scanner y que servirá para la correcta calibración de la cámara web.

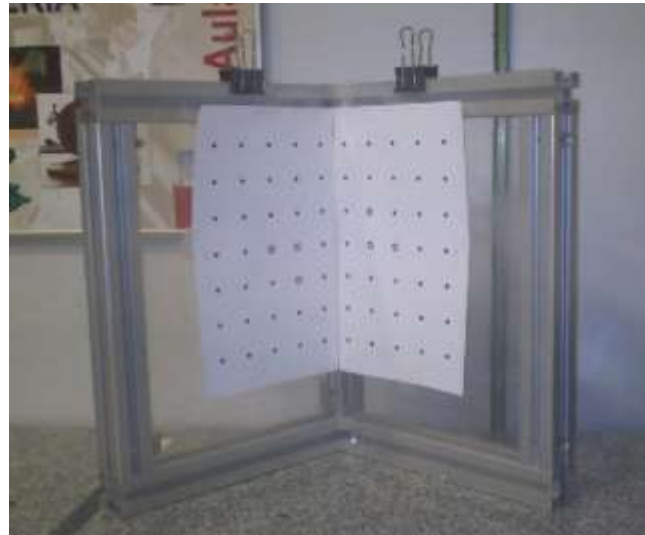


Figura 4.12 Córner de calibración

- ✓ *Apoyo de rotación.* La base donde apoyará la pieza real para su preciso escaneo permitirá girar la pieza 360°. Se trata de una base hecha a mano (Figura 4.13) y dividida en 360° que nos servirá de guía para saber cuánto hay que girar la pieza en cada uno de los escaneos realizados sobre nuestra peonza, con el fin de que cada escaneo se realice de la misma manera y sobre toda la superficie de revolución de la peonza. El apoyo de rotación se sustenta en una base sólida.



Figura 4.13 Apoyo de rotación

Una vez se tienen todos los dispositivos que van a formar el conjunto total de nuestros ensayos experimentales, se ubicarán en su correspondiente lugar para el posterior escaneo tal y como se muestra en la figura 4.14.

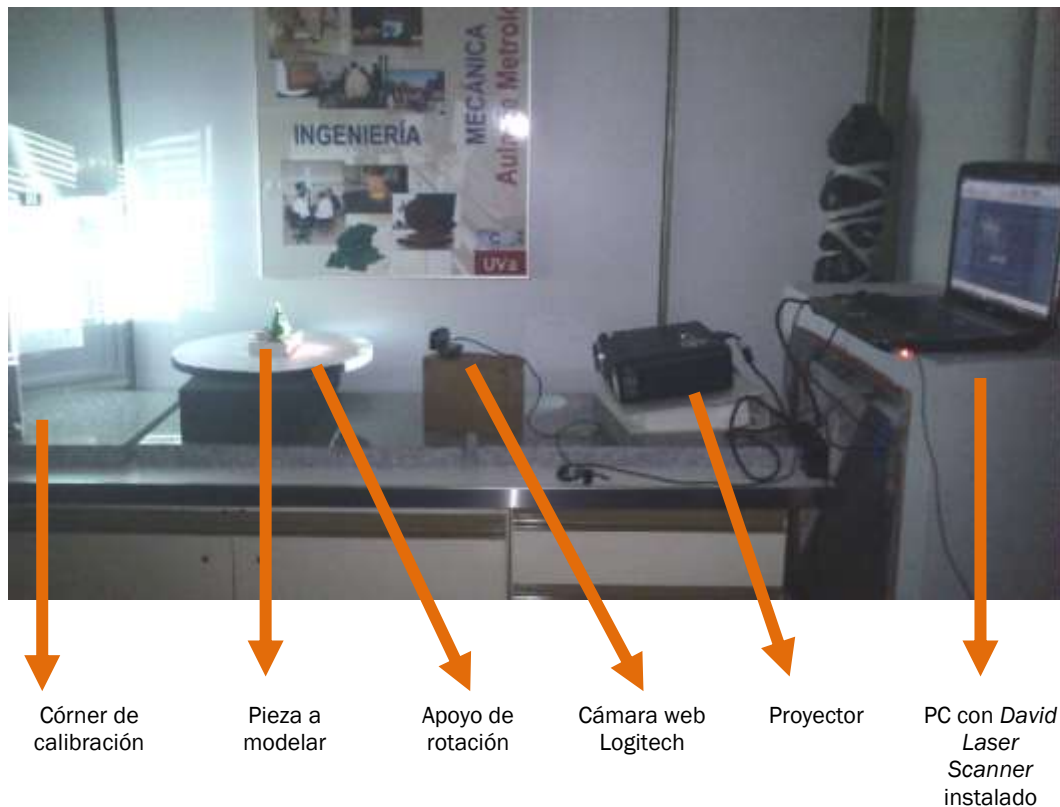


Figura 4.14 Instalación completa para escaneado

Teniendo todos los elementos participantes bien situados se procederá en primer lugar a la calibración de la cámara (Figura 4.15). Debemos tener en cuenta que en esta calibración todavía no hemos colocado nuestra pieza real a modelar sobre el apoyo giratorio, es decir, para los escaneos de la pieza primero debemos calibrar nuestra cámara mediante la malla de calibración situada sobre las paredes planas a 90° , para después retirar dicho córner de calibración y ya montar sobre la base nuestra pieza real objeto de estudio, la peonza.



Figura 4.15 Instalación para calibración de la cámara

4.4 Obtención del modelo tridimensional

En este apartado se desarrollará uno de los principales objetivos que este Trabajo Fin de Grado persigue, que no es otro que el prototipado 3D de figuras mediante un software de aplicación de luz estructurada, poniendo especial atención a los pasos a seguir para conseguir el modelo tridimensional a partir del software citado. Se debe recalcar que en este apartado simplemente se hará una referencia a los pasos a seguir para obtener el modelo 3D en el espacio de trabajo del *David Laser Scanner*, sin detenernos en la experimentación, ya que el análisis experimental será objeto del siguiente punto a desarrollar.

El primer paso será arrancar el software *David Laser Scanner*, de esta forma aparecerá un espacio de trabajo como el de la siguiente figura:

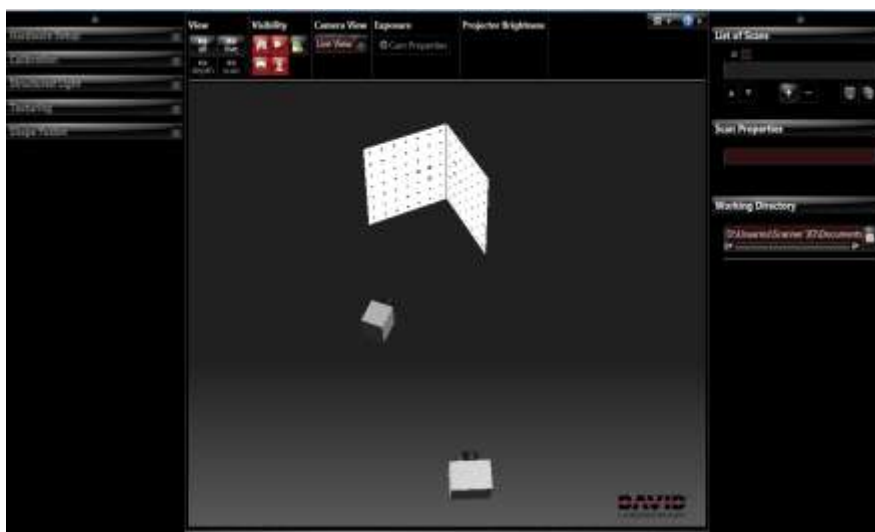


Figura 4.16 Espacio de trabajo *David Laser Scanner*

A la izquierda de nuestro espacio de trabajo, vemos los cinco divisiones de trabajo que debemos seguir para el escaneo de piezas: *Hardware Setup*, *Calibration*, *Structured Light*, *texturing* y *Shape fusión*. A la derecha tendremos la lista de nuestros escaneos junto con sus propiedades, y un pequeño cuadro de diálogo de directorio para cargar y guardar escaneos en nuestro ordenador. Por último en la parte superior tendremos diferentes parámetros para la visibilidad, brillo y manejo de nuestros escaneos con el objetivo de poder ver mejor el modelo en el interior de nuestro espacio de trabajo.

4.4.1 Hardware Setup

Es la primera casilla que se debe ajustar para comenzar con nuestro análisis y experimentación. A continuación se ve el correspondiente cuadro de diálogo (Figura 4.17)

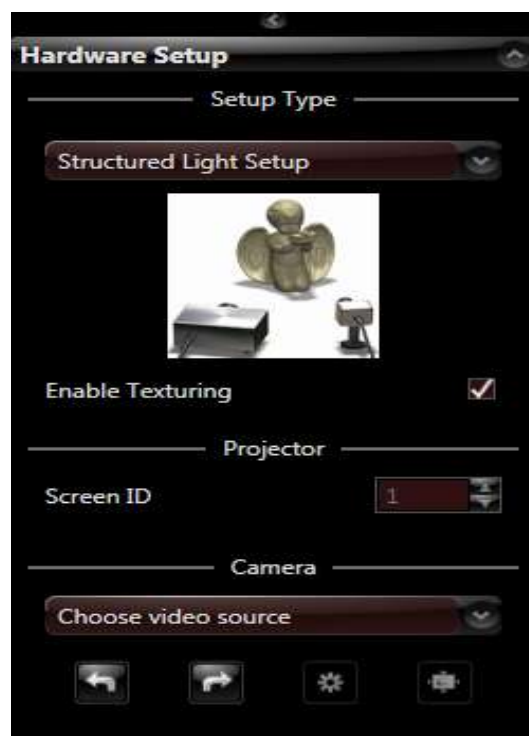


Figura 4.17 Cuadro diálogo Hardware setup *David Laser Scanner*

En el primer desplegable o menú deslizante, se elegirá la luz estructurada (*Structured light Setup*), mientras que en el segundo se va a elegir la cámara web que tenemos conectada al ordenador. El proyector será el encargado de aplicar la luz estructurada sobre la peonza real. En el método de experimentación será necesario hacer

unos pequeños ajustes en la elección de la cámara web para conseguir un resultado más preciso.

4.4.2 Calibration

En este apartado se realizarán los ajustes pertinentes para posteriormente proceder al escaneado con una mayor precisión. El cuadro de diálogo para la calibración es el siguiente (Figura 4.18). Simplemente se elegirá la opción de V3 Pattern, que se corresponde con el patrón de calibración que marca nuestro software David Laser Scanner.



Figura 4.18 Cuadro de diálogo Calibration *David Laser Scanner*

Antes de pulsar el botón de calibrar en el espacio de trabajo del David saldrán unas rallas horizontales y verticales blancas y negras y unas cruces pequeñas de color verde que nos indicarán que los puntos de calibración captados por la cámara web son correctos (Figura 4.19).

A continuación se pulsará el botón de calibrar.

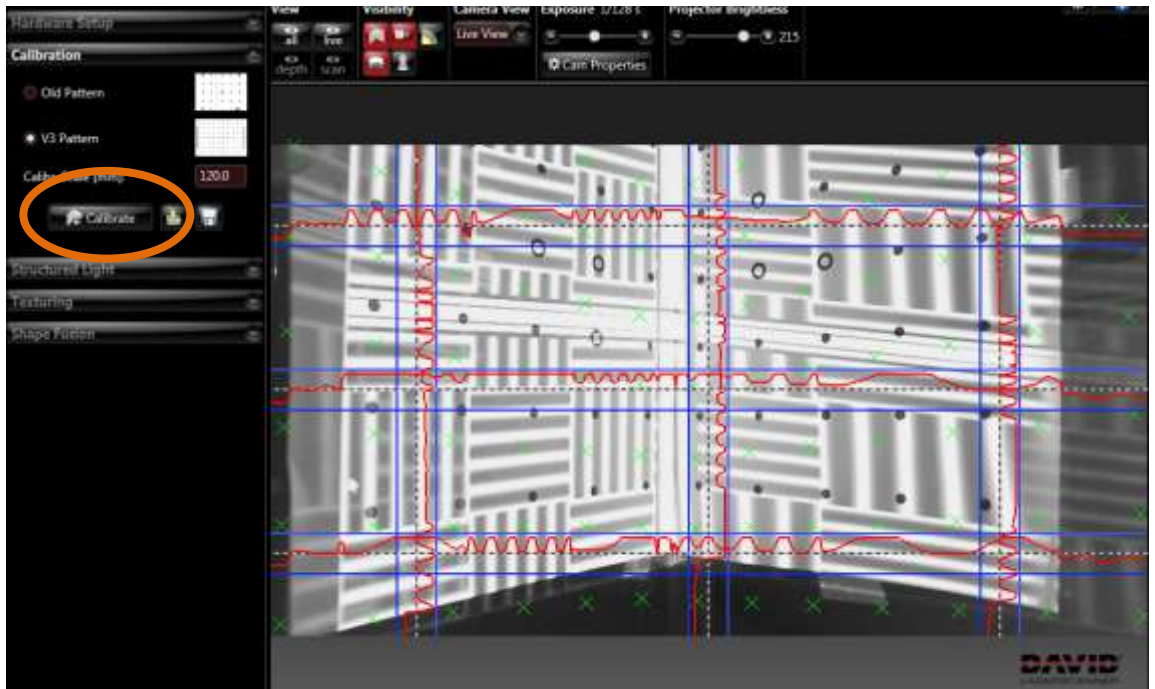


Figura 4.19 Calibración David Laser Scanner

En el análisis experimental posterior se va a ver el proceso más detenidamente y que variables cambiar para una correcta calibración, sin duda es el paso más problemático ya que todo tiene que ser muy preciso y con una serie de parámetros concretos claves.

4.4.3 Structured light

Una vez calibrada la cámara ya se podrán realizar cada uno de los escaneos de la peonza para obtener el modelo 3D. Para ello se debe marcar el número de escaneos que se quieren realizar los cuales estarán relacionados con el ángulo que se debe de mover la base rotante en cada escaneo, por tanto si se quieren realizar 6 escaneos se deberá girar 60° la peonza cada vez que se vaya a realizar un escaneo. El espacio de trabajo se muestra en la Figura 4.20.

En este apartado es importante alinear la luz estructurada con el eje de rotación de la pieza lo mejor posible, con el objetivo de que la luz incida sobre la mayor superficie de la pieza y el escaneo sea de mayor calidad.

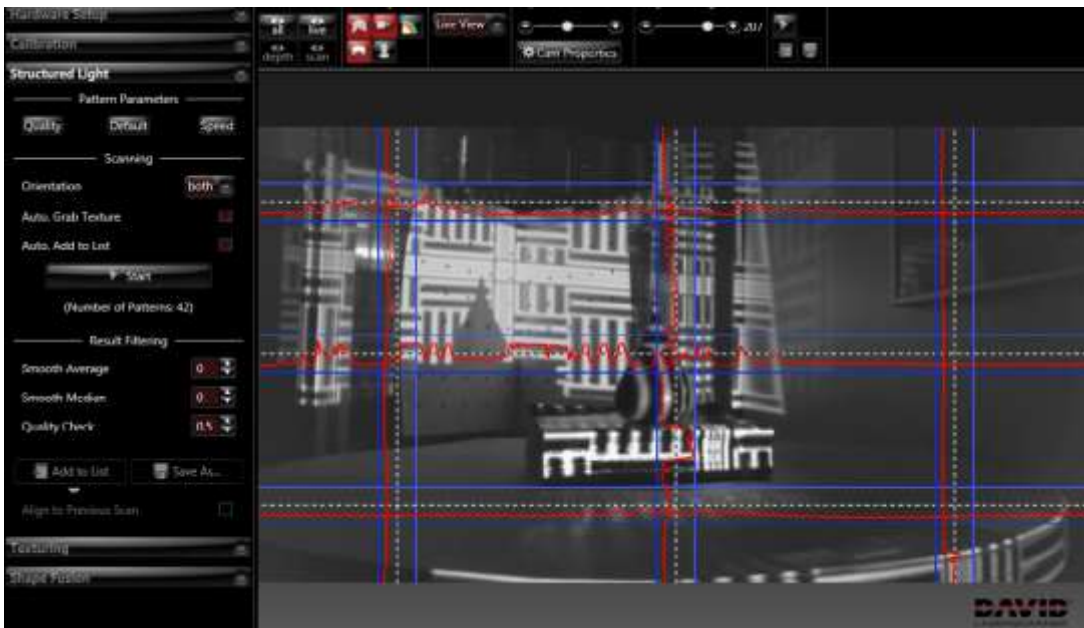


Figura 4.20 Espacio de trabajo Structured Light *David Laser Scanner*

Cada vez que se gire la peonza se pulsará el botón *start* y el programa, a través del proyector, nos dará el escaneado correspondiente. (Figura 4.21)

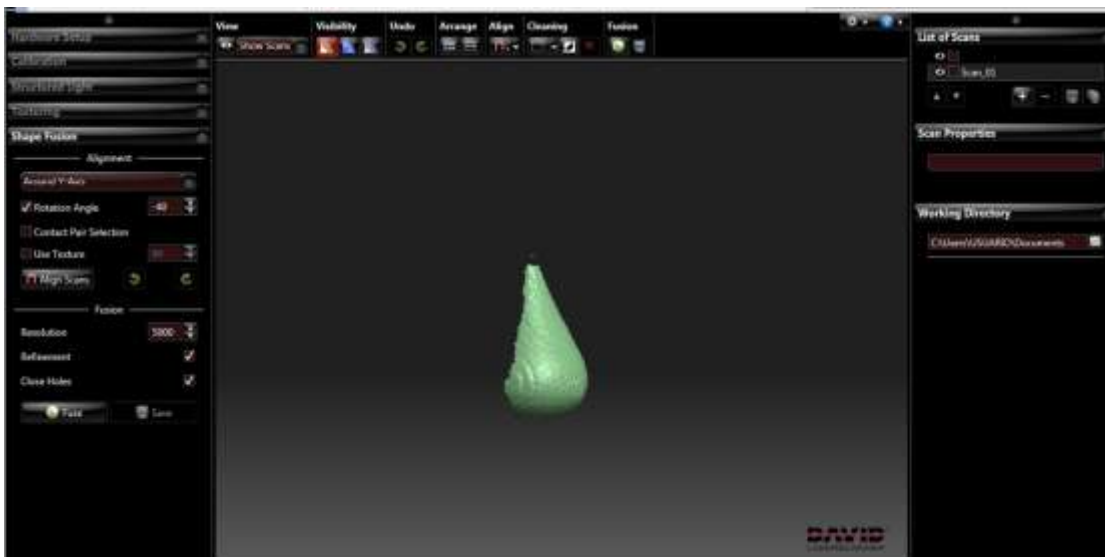


Figura 4.21 Ejemplo de escaneado *David Laser Scanner*

Como se ve en la parte superior a la derecha de la imagen anterior cada vez que se realice un escaneado nos aparecerá el número de escaneado realizado, lo cual nos servirá para la posterior fusión de escaneos. La explicación del análisis completo se verá en la parte experimental.

4.4.4. Shape Fusion

Como se ve en el cuadro de diálogo (Figura 4.22) se tiene un menú desplegable donde se indicará la rotación de la pieza con respecto al eje Y de coordenadas y se irá uniendo uno por uno cada uno de los escaneos mediante el botón *Align Scans*, habiendo previamente marcado el ángulo de rotación de la pieza en el menú desplegable.

El resultado obtenido de la fusión de escaneos de la peonza real nos dará un modelo escaneado como el de la figura 4.23.

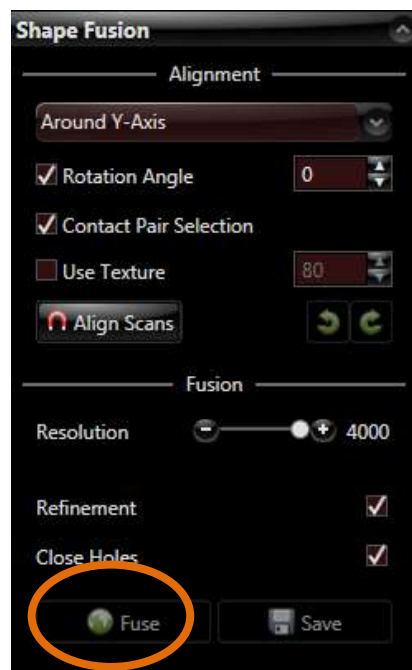


Figura 4.22 Cuadro de diálogo Shape Fusion *David Laser Scanner*

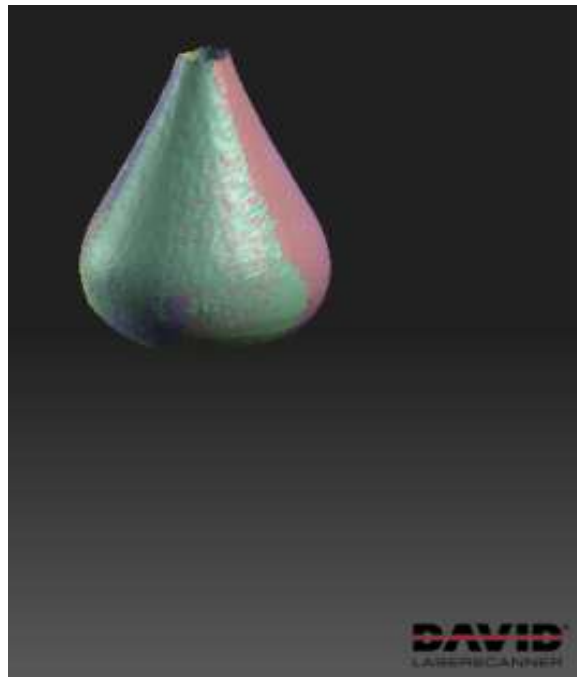


Figura 4.23 Modelo completo escaneado a partir de la fusión de escaneos

Por último para que el modelo quede completamente homogéneo y uniforme y no haya problemas en una futura impresión 3D, se tendrá que fusionar. Para ello se pulsará el botón *fuse* (fusionar) (Figura 4.22). Además se va a tener la opción de regular la resolución de la fusión que siempre será la más alta para obtener un modelo fusionado lo más preciso posible. (Figura 4.24).

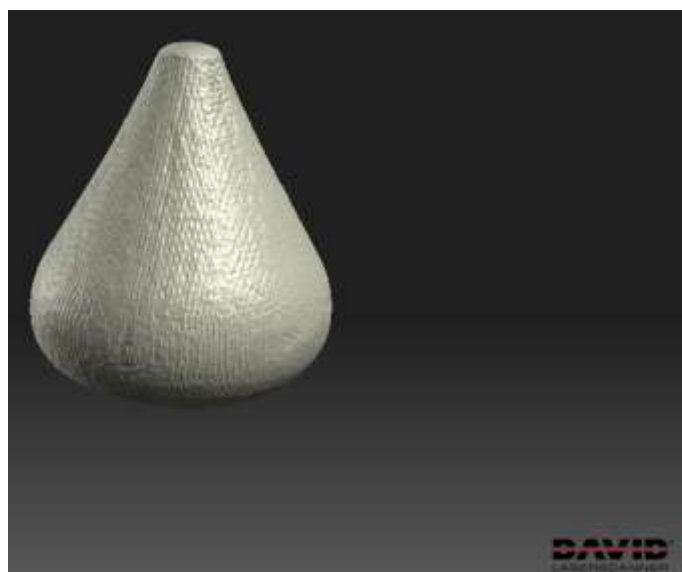


Figura 4.24 Modelo fusionado

4.5. Método de impresión 3D

4.5.1 Software NETFABB y SLIC3R

Una vez obtenido el modelo virtual por medio del software David Laser Scanner el siguiente paso es introducirlo en un software que permita orientarlo de la mejor manera posible para su futura impresión y que además nos dé la opción de reparar el modelo obtenido y de una mejor visualización. El software en cuestión es el *Netfabb*.

Por otro lado para trabajar con Netfabb debemos tener el modelo en formato *.stl*, el cual se puede obtener de forma directa a través de una opción marcada dentro del software David Laser Scanner.

En este apartado el objetivo es hacer una comparación al medir las discrepancias entre la impresión del modelo de la peonza final obtenido de David Laser Scanner sin sufrir ningún tipo de modificación, y un modelo, también obtenido de David Laser Scanner, escalado, que por tanto va a sufrir modificaciones de características básicas y forma estructural a través de dicho software Netfabb Basic. De esta forma se va a hacer una comparativa del grado final de aproximación que va a tener cada modelo 3D con respecto a la pieza real además de incluir valores de mediciones de los propios modelos.

Además se ha tenido como referencias proyectos previos en la Universidad de Valladolid que se han basado en cálculos de errores tanto del David Laser Scanner como de la impresora 3D utilizada.

Dicho esto, y haciendo hincapié en el segundo objetivo que es la impresión de la pieza virtual obtenida, se va a tener el modelo virtual colocado según la posición más idónea para la impresión. El siguiente paso será la utilización de un software capaz de generar un código abierto G-code que pueda ser entendido por la impresora 3D para su correcta impresión. Dicho software es el *slic3r* a través del cual se pueden seleccionar todos los parámetros de impresión, tales como: altura de capa, temperatura de la cama, forma de relleno... El Slic3r está compuesto por una serie de instrucciones que indican las velocidades y posiciones a las que debe moverse cada uno de los ejes, así como la temperatura de la cama y del extrusor de nuestra impresora.



4.5.2 Impresora 3D

Una vez creado el archivo G-code se introduce en la impresora (Figura 4.25) por medio de una tarjeta de lectura SD, de esta forma la impresora puede leer dicho lenguaje informático y desarrollar las acciones indicadas.

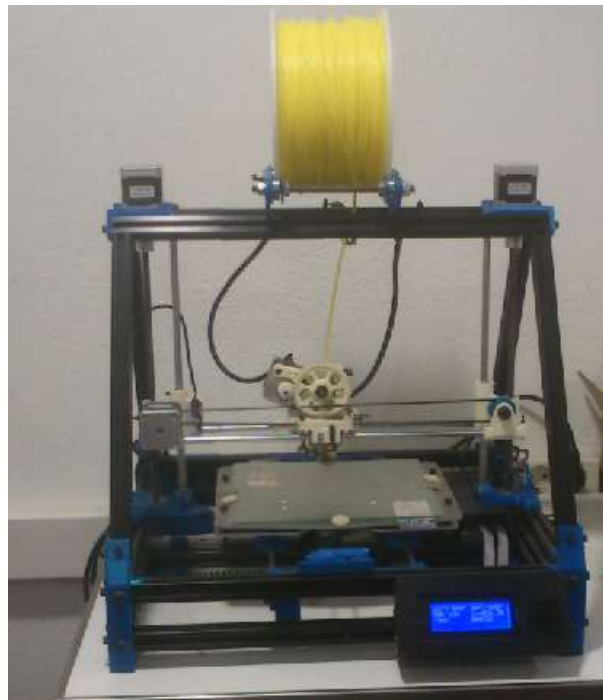


Figura 4.25 Impresora 3D del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Valladolid

Esta impresora se mueve en un plano horizontal en el eje X, y en el eje Y para la extrusión del material de la bobina que se haya colocado en la parte superior del extrusor. El material extrusionado alcanza temperaturas próximas a su punto de fusión para que fluya correctamente y posteriormente se enfriará y solidificará rápidamente. El material utilizado es un ácido poliláctico (PLA), se trata de un polímero con altas propiedades mecánicas, permanente e inodoro y resistente a la humedad y la grasa. Todo lo comentado anteriormente se lleva a analizar de forma profunda en el siguiente apartado de análisis experimental, apartado que engloba detalladamente todos los ensayos y objetivos a realizar en este Trabajo Fin de Grado.

4.6 Desarrollo experimental

4.6.1 Introducción previa

En este apartado se profundizará de forma detallada en la obtención de el modelo virtual 3D a través del Software David Laser Scanner. En la experimentación siguiente se hablará sobre los parámetros a definir detalladamente para conseguir una correcta calibración de nuestra instalación y que el proceso sea lo más preciso posible.

Los ensayos que se han llevado a cabo siempre han sido sobre piezas de revolución y más concretamente sobre una peonza de madera (Figura 3.7) siendo el objeto clave en torno al que gira esta experimentación; no obstante se incluirán imágenes y escaneados de un tarro de barro (Figura 3.8) para constatar que dichos ensayos pueden extrapolarse sobre otros objetos de revolución simples aunque estos sean de mayores dimensiones que la peonza en cuestión.

Por otro lado se va a ver qué modificaciones tendrán que llevarse a cabo sobre el modelo 3D, en los software *Netfabb* y *Slic3r* para que su forma sea idónea y pueda ser comprendida en lenguaje informático por nuestra impresora 3D.

Por último haremos una comparación entre dos modelos 3D de nuestra peonza obtenida de David Laser Scanner, con y sin modificaciones estructurales, para poder ver las discrepancias que se generan en el modelado de piezas por medio del software en cuestión.



4.6.2 Parámetros de modelación tridimensional. Software David Laser Scanner

El mayor problema encontrado al trabajar con este software de modelación no ha sido el escaneo digital en sí, sino la calibración de la cámara web al inicio de los ensayos. El problema residía en la complejidad de colocación de nuestro proyector encargado de radiar la luz estructurada y la dificultad por parte de la cámara web de reconocer los puntos de calibración de la plantilla instaurada por el creador del software la cual es pegada sobre el córner de calibración. Para que el programa diese el visto bueno de una precisa calibración de nuestra cámara web, ésta debía ser capaz de reconocer de forma nítida los puntos clave de calibración (Figura 4.26)



Figura 4.26 Puntos clave de calibración

En la anterior imagen se puede ver que los puntos clave son puntos de mayores dimensiones situados justo en el centro del córner de calibración.

Después de varios ensayos y un amplio conocimiento sobre las técnicas del programa se descubrió que la llave para evitar estos problemas de calibración era la modificación de una serie de parámetros de control de la cámara web instalada. Manteniendo siempre en el mismo estado los parámetros (Figura 4.27), todas las calibraciones resultaron ser satisfactorias.

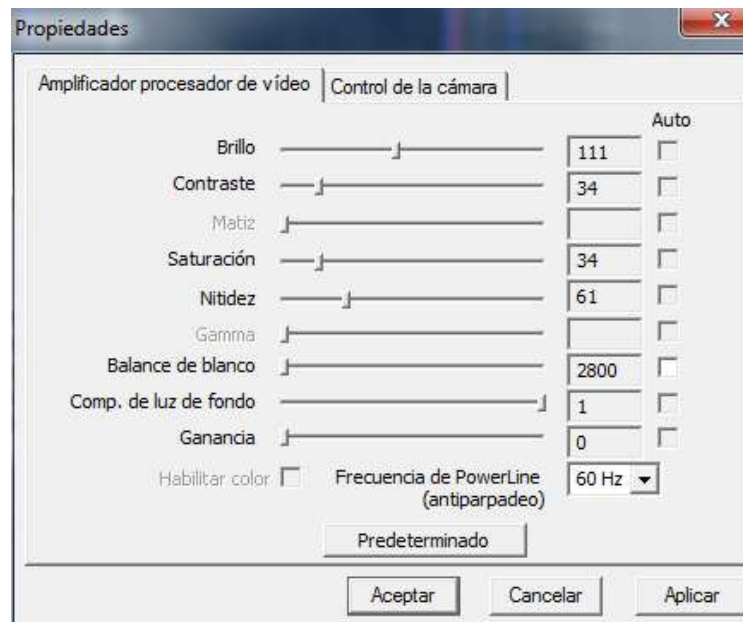


Figura 4.27 Cuadro de diálogo cámara web Logitech

Por otro lado, a la hora de realizar la calibración de la cámara web, la luz del lugar de trabajo donde se encuentra la instalación debe ser lo más tenue posible, de esta forma los resultados obtenidos en la modelación son mejores y están más definidos estructuralmente. Por último es aconsejable poner un tamaño de salida de la imagen por nuestro espacio de trabajo de 800x448.

Una vez definidos y ejecutados los pasos anteriores el software nos dará por satisfecha nuestra calibración y en el espacio de trabajo nos saldrá un cuadro de diálogo (Figura 4.28).

Se pueden ver las cruces verdes en nuestro espacio de trabajo del software, indicativas de la correcta calibración.

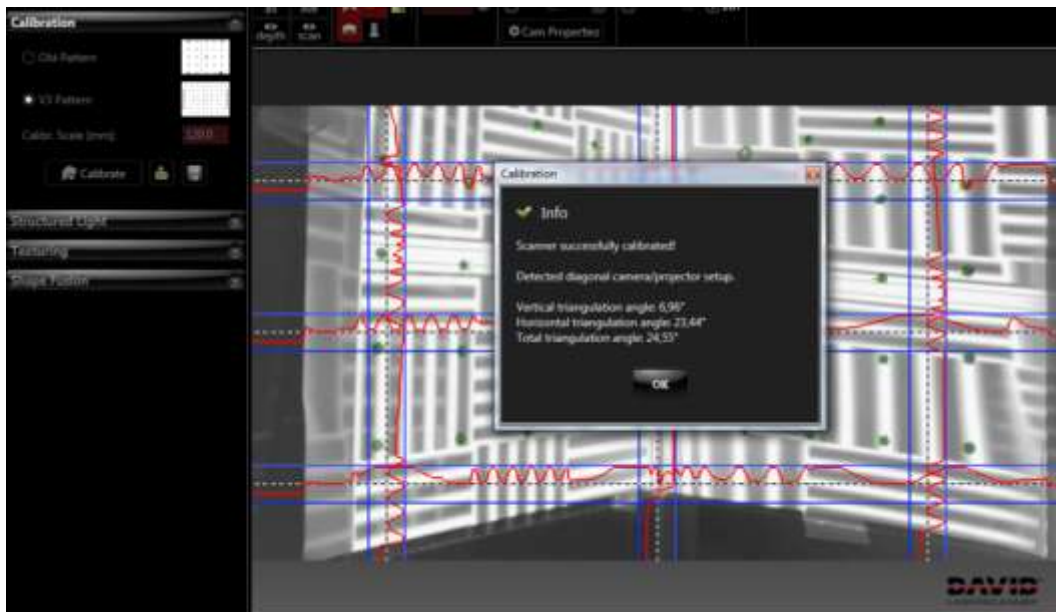


Figura 4.28 Cuadro de diálogo calibración correcta

A continuación ya se puede proseguir con nuestro ensayo experimental realizando cada uno de los escaneos (Figura 4.29) a través de la aplicación de luz estructurada, siempre asegurándose de que la alineación de la luz sobre la superficie de la pieza sea correcta para un resultado óptimo. El número de escaneos más recomendado sobre la peonza es de 6, es decir, realizar un escaneado cada 60 grados de rotación de nuestra base giratoria donde apoya la peonza.



Figura 4.29 Escaneos de la peonza a través de la aplicación de luz estructurada

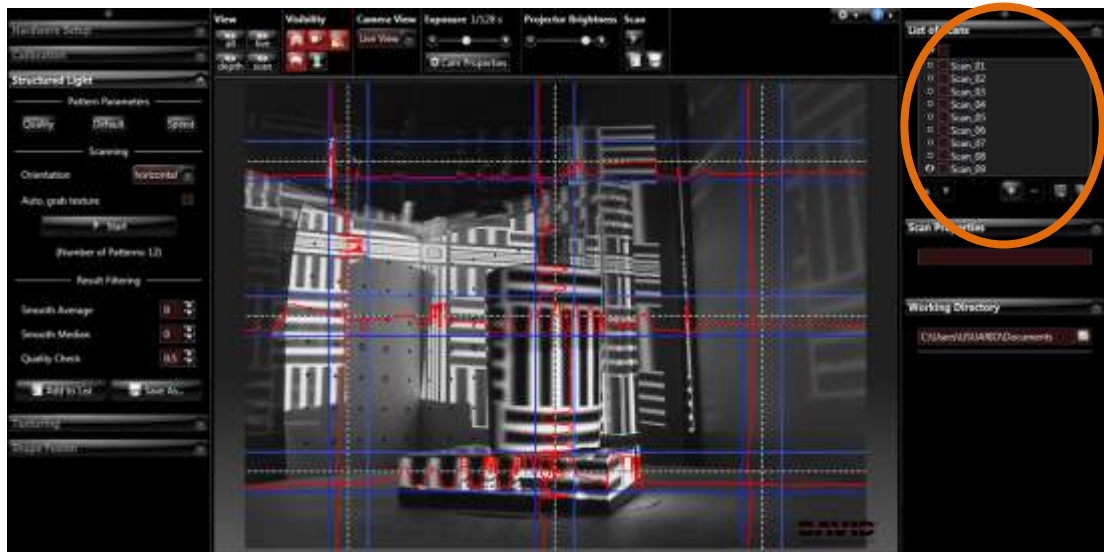


Figura 4.30. Escaneos a través de *David Laser Scanner*

Lo único que se debe hacer es dar al botón de *start* de escaneado e ir girando la pieza a medida que se ve que acaba la luz estructurada proyectada sobre cada ángulo de rotación de la pieza.

En el ordenador se verá el espacio de trabajo (Figura 4.30) donde además se obtendrá una lista de escaneos para su unificación. En dicho espacio de trabajo se generarán los escaneos, en este caso, del tarro de mármol que se mencionaba en párrafos anteriores. Como se ve en la parte izquierda superior, aparecen el número de escaneos realizados, que en este caso es de 9.

Sin embargo para una mejor definición estructural se realizarán 6 escaneos a 60° siendo la opción que mejor definición otorga, tanto del tarro de mármol (Figura 4.31), como de la peonza de madera (Figura 4.32), principal objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado.



Figura 4.31 Sucesión de escaneos a 60° del tarro de mármol



Figura 4.32 Sucesión de escaneos a 60° de la peonza de madera

A continuación para unificar e integrar cada uno de los escaneos anteriores se utilizará la zona de trabajo *Shape Fusión*, donde se puede ver un cuadro de diálogo para asignar el ángulo de rotación de la pieza por cada escaneo (Figura 4.33) y un listado de escaneos realizados para editarlos (Figura 4.34).



Figura 4.33 Cuadro de diálogo Shape Fusion *David Laser Scanner*

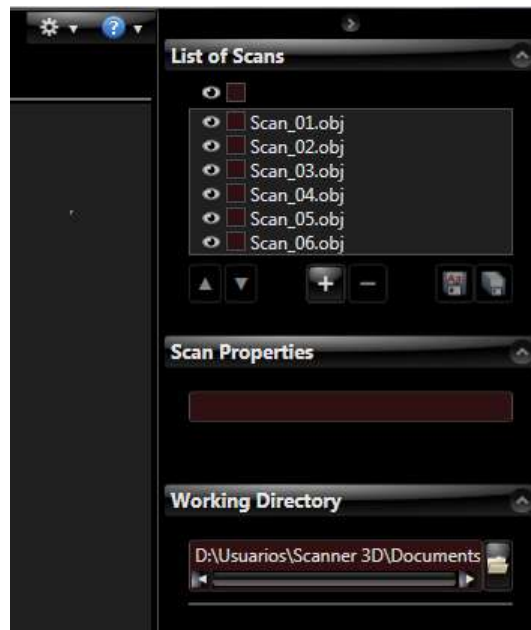


Figura 4.34 Lista de escaneos realizados sobre el modelo real

Como ya se dijo anteriormente el ángulo clave de los ensayos donde los modelos obtenidos son más precisos corresponde a un ángulo de 60° con respecto al eje Y de ordenadas. (Figura 4.31 y 4.32). Instaurado esto en los menús deslizantes, se debe utilizar el comando *Align Scan*. (*Adherir escaneos, unificar*) (Figura 4.33).

El proceso a seguir es fusionar mediante el comando anterior todos los escaneos realizados siempre de dos en dos, de la siguiente manera: se pulsa *Align Scans* y se marcan los dos Scans que se van a fusionar, por ejemplo: se pulsa *Align Scans* y se marcan Scan2 y Scan1, de esta forma se une 1 con 2

Sin embargo el escaneo obtenido de esta forma no queda del todo homogéneo y uniforme. Tras varios ensayos se descubrió que para dar un mejor acabado estructural a la superficie de todos los escaneados es totalmente imprescindible pulsar en el menú desplegable de propiedades de los escaneos la opción *Shrink Scan Border* (reducir frontera de exploración) (Figura 4.35). Con este método los resultados obtenidos son mucho más precisos y se obtiene una fusión de escaneos más exacta (Figura 4.36).

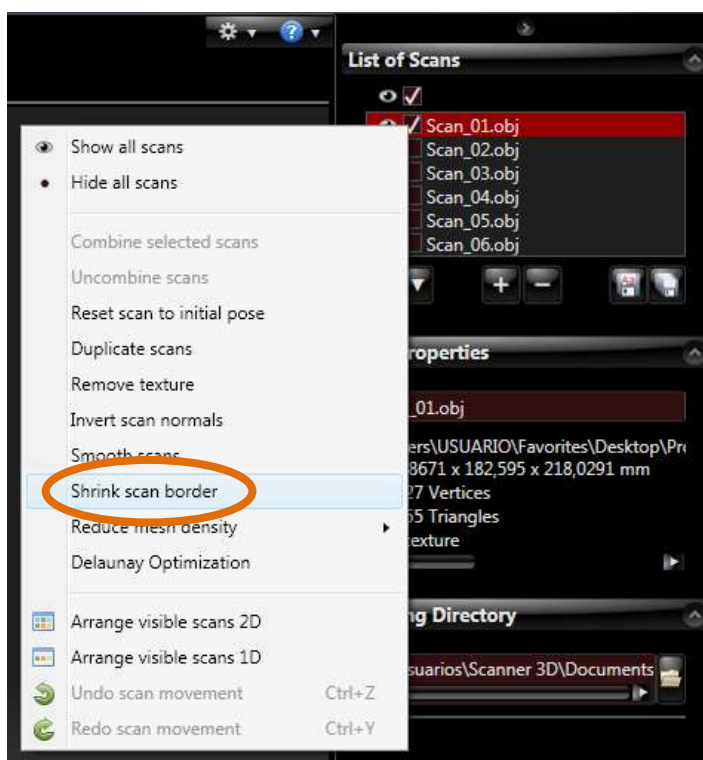


Figura 4.35 Cuadro de propiedades de los escaneos

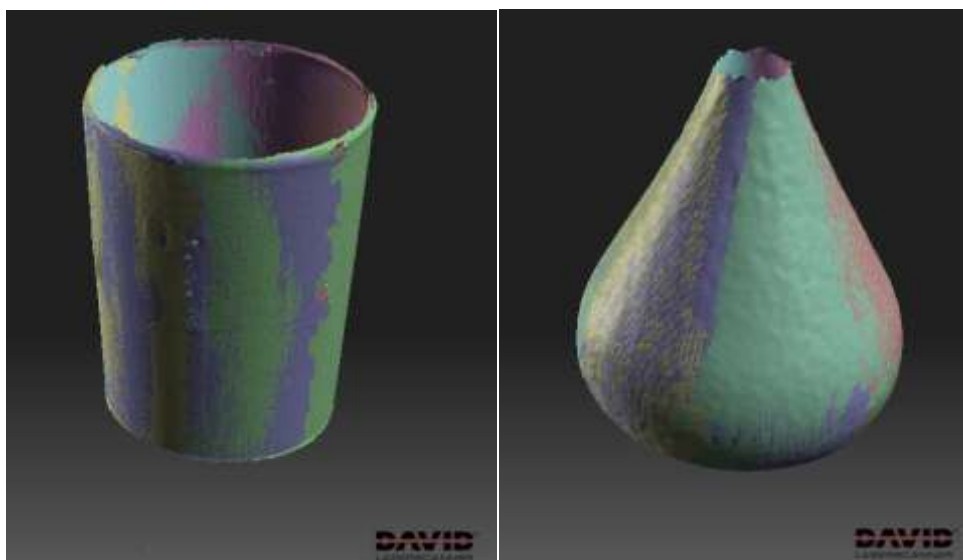


Figura 4.36 Shape fusión escaneos tarro de mármol y peonza de madera, respectivamente.

Como se ve en las figuras anteriores los escaneos obtenidos reproducen a la perfección nuestras piezas reales; por tanto si se

siguen correctamente las técnicas mencionadas en los párrafos anteriores el resultado que se obtiene es excelente.

No obstante, queda un último paso, ya que lo que se ha obtenido hasta ahora solo son los modelos escaneados, los cuales no tienen la uniformidad y precisión estructural que requiere un modelo virtual 3D. Para ello se utilizará la opción *Fuse* (*fusionar*) (Figura 4.33).

En este último punto de experimentación se debe tener en consideración un último parámetro, el cual es la resolución. Tras varios ensayos, se llegó a la conclusión de que se debe mantener la resolución en un valor exacto de 3000. Además se deben de mantener fijas las casillas de *Refinement* (Refinamiento) y *Close Holes* (Eliminación de oquedades).

Siguiendo estrictamente lo comentado anteriormente se obtendrá un modelo virtual 3D (Figura 4.37) mediante la utilización del software David Laser Scanner.

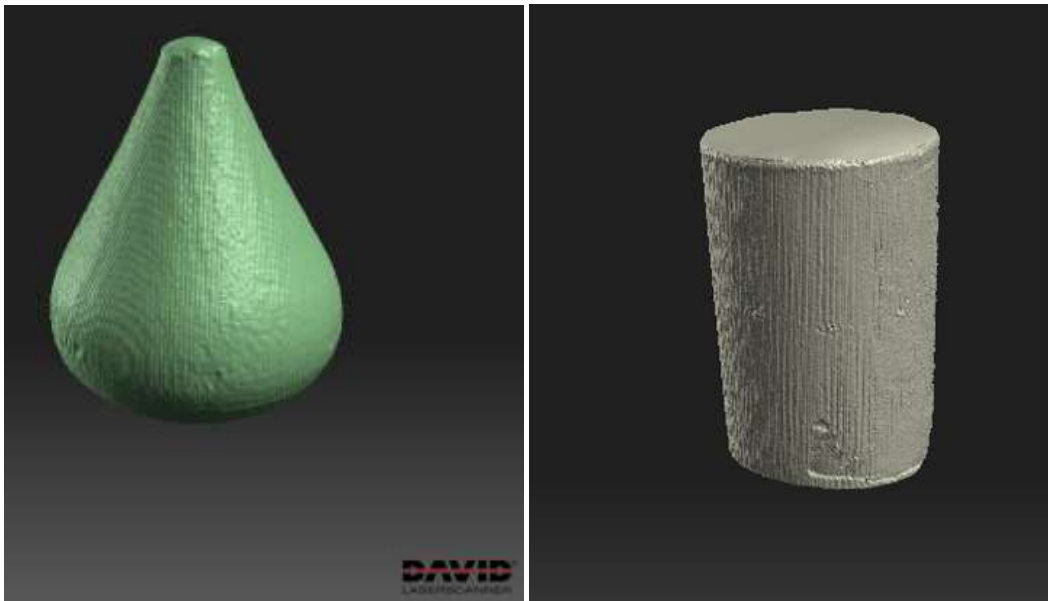


Figura 4.37 Modelos virtuales 3D del tarro de porcelana y de la peonza de madera mediante *David Laser Scanner*



4.6.3 Conclusiones modelación 3D mediante luz estructurada

Es posible crear un modelo virtual 3D de piezas de revolución a partir del software de luz estructurada David Laser Scanner.

Una ambiente de trabajo de la instalación tenue y una calibración precisa y detallada de la cámara web es fundamental para obtener un modelo final adecuado. Además es muy aconsejable mantener constantes los parámetros esenciales de modelización comentados anteriormente.

La obtención de modelos 3D de piezas metálicas esta fuera del alcance de un software de luz estructurada; Con los pasos mencionados anteriormente no se ha podido lograr un modelado de piezas metálicas ya que el reflejo de la luz estructurada es un obstáculo insalvable para su modelación.

En caso de que la pieza metálica fuera mate o estuviera bañada con un recubrimiento específico que impida dicho reflejo, entonces si se podrá realizar la modelación 3D mediante la luz estructurada, ya que el reflejo de la luz sobre la pieza será sensiblemente inferior, justamente como en el caso de la pieza objeto de estudio que esta fabricada en madera.

La modelación/reproducción del vaciado interior de piezas, como la del tarro de barro objeto de estudio, no se ha podido lograr con los pasos indicados en este trabajo, ya que la luz estructurada solo ha incidido en la superficie exterior de la pieza de revolución debido a la colocación del proyector a la misma altura de la pieza.

5. IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL. SOFTWARE NETFABB Y SLIC3R



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

5. IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL. SOFTWARE NETFABB Y SLIC3R

5.1. Netfabb

Obtenido el modelo virtual 3D de la peonza se debe realizar una serie de ajustes sobre el modelo si se quiere que el resultado final de impresión sea de mayor calidad.

Como mi tercer objetivo es hacer una comparación entre un modelo obtenido de David Laser Scanner y ejecutado directamente en la impresora sin sufrir ninguna modificación, y un modelo estructuralmente modificado, he elegido el software Netfabb que me permita escalar el tamaño de mi modelo peonza virtual y realizar una serie de ajustes de parametrización.

Los pasos a seguir dentro del espacio de trabajo de este software son relativamente sencillos, ya que es de fácil manejo y comprensión. El único requisito que pide este software es tener un modelo de extensión *.stl* para poder ser introducido en su espacio de trabajo.

Una vez arrancado el software libre y cargado el modelo 3D obtenido de David Laser Scanner aparecerá en el siguiente espacio de trabajo (Figura 5.1)

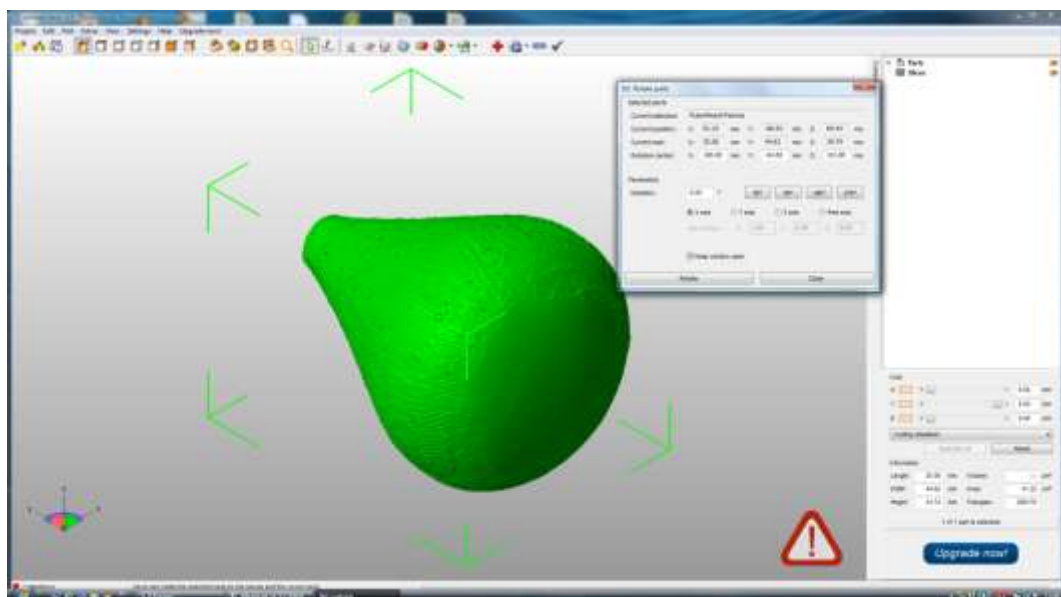


Figura 5.1. Espacio de trabajo Software Netfabb Basic



En primer lugar, como se puede ver en la imagen anterior, el modelo no está en una posición óptima para su correcta colocación en la cama de la impresora. Por ello se debe girar la pieza 180° con el objetivo de que el modelo peonza comienza a imprimirse por la parte de la punta, la cual es una zona de menos importancia geométrica (Figura 5.2)

De esta forma la colocación del modelo nos queda:

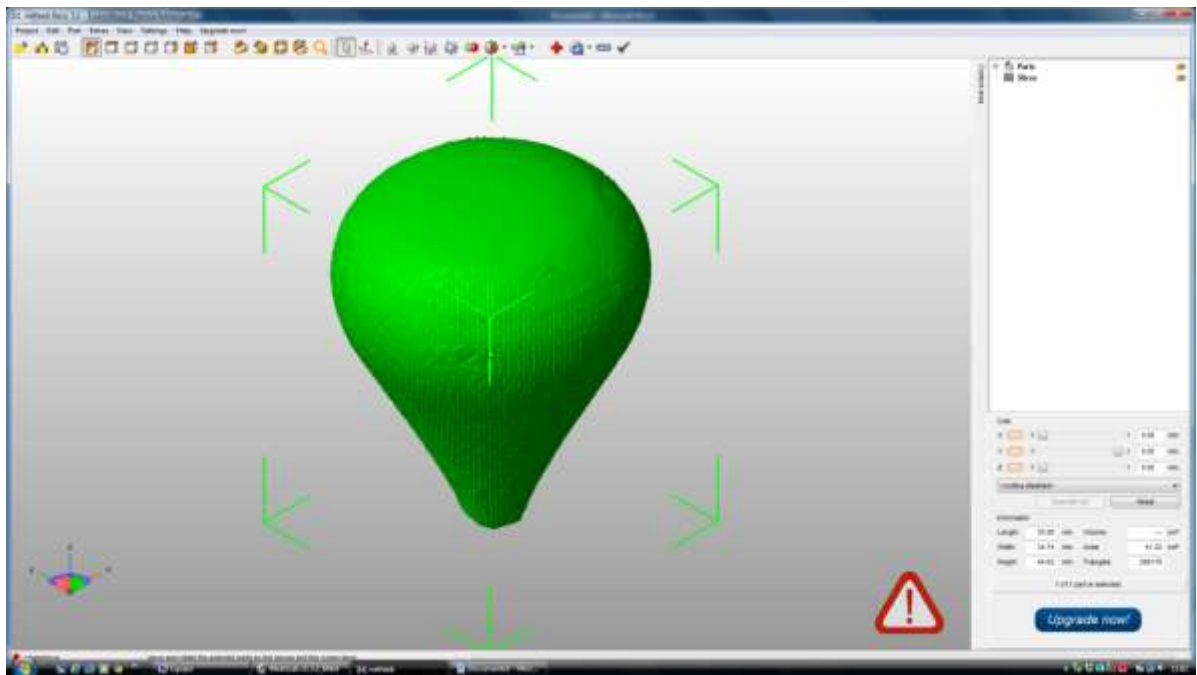


Figura 5.2 Colocación del modelo 3D

Como se mencionó anteriormente, la punta de la peonza marca el inicio por donde comenzará la impresión.

5.2. Slic3r

Una vez conseguido el modelo 3D en Netfabb; el siguiente paso es cargarlo en el software Slic3r, encargado de crear el lenguaje informático que pueda ser leído por la impresora 3D. Sin embargo el modelo aún no está preparado para su correcta impresión.

El problema a continuación, reside en que es necesario disponer de una cara completamente plana que sirva de apoyo a la impresora para el comienzo de la impresión. Como ya se ha comentado la punta de la peonza es de menor importancia estructural, por lo que aquí se puede dar un corte mediante la opción de *cut* de la barra de herramientas de Slic3r, (Figura 5.3)

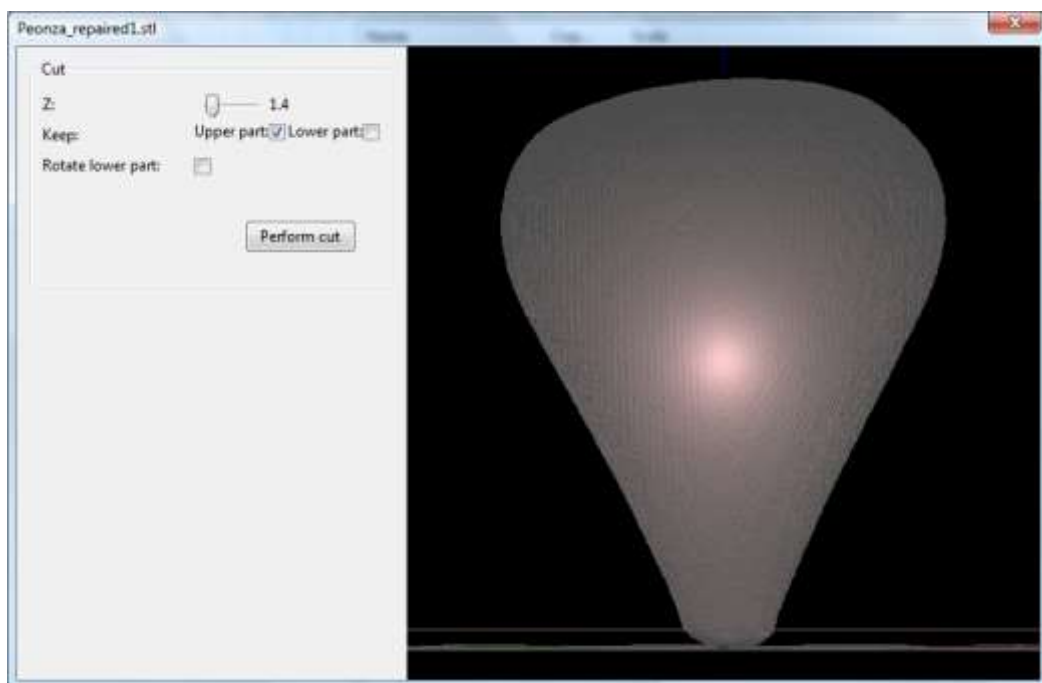


Figura 5.3 Corte punta de la peonza modelo sin escalar

Como se muestra en la anterior imagen, se ha cortado una dimensión de 1,4 mm con respecto al eje Z. De esta forma el modelo está totalmente ajustado para su correcta impresión.

Una vez realizados todos estos pasos, se tendrá toda la información geométrica de las dimensiones del modelo obtenido por el David Laser Scanner. Es momento de sacar las conclusiones más importantes:



- ✓ Utilizando un pie de rey se ha medido el diámetro exterior máximo de la peonza real, siendo la media de este de 44,424 mm.
- ✓ El modelo 3D creado por el David Laser Scanner tiene un diámetro exterior máximo de 34,74 mm medido por el software Netfabb (Figura 5.4).

Length:	35.06	mm	Volume:	21.47	cm ³
Width:	34.74	mm	Area:	41.22	cm ²
Height:	44.62	mm	Triangles:	288178	

1 of 1 part is selected.

Figura 5.4 Medidas peonza Netfabb Basic

Por tanto la conclusión más importante que se obtiene, es que mediante el software de modelación David Laser Scanner se ha perdido la escala de la peonza real.

Es aquí donde se abre el abanico de posibilidades, de poder hacer una comparación entre el modelo obtenido por el David Laser Scanner sin escalar, es decir, manteniendo la medida obtenida del modelo aunque se desajuste de forma exagerada de las dimensiones de la pieza real, y el modelo escalado a las dimensiones de la peonza real.

El factor de escala de corrección para obtener el modelo real es de 1,28 (Figura 5.5), factor de escala preciso para obtener las medidas de la pieza real, no obstante, seguirá existiendo *error accidental o aleatorio*, *error de paralaje* del sistema de obtención del modelo por parte del David laser scanner o *error de cero* del aparato de medición sobre los modelos obtenidos.

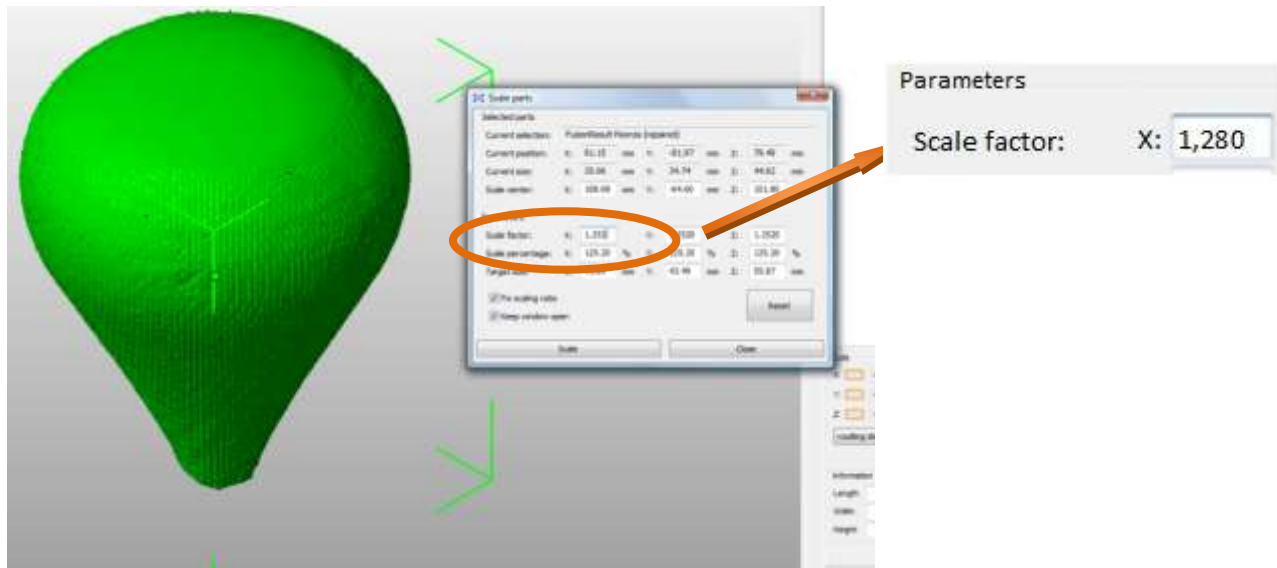


Figura 5.5 Factor de escala de corrección

Del mismo modo que en el modelo no escalado, se debe hacer un corte a la punta de la peonza para obtener una cara plana y que así, el modelo escalado pueda ser ejecutado por la impresora 3D (Figura 5.6)

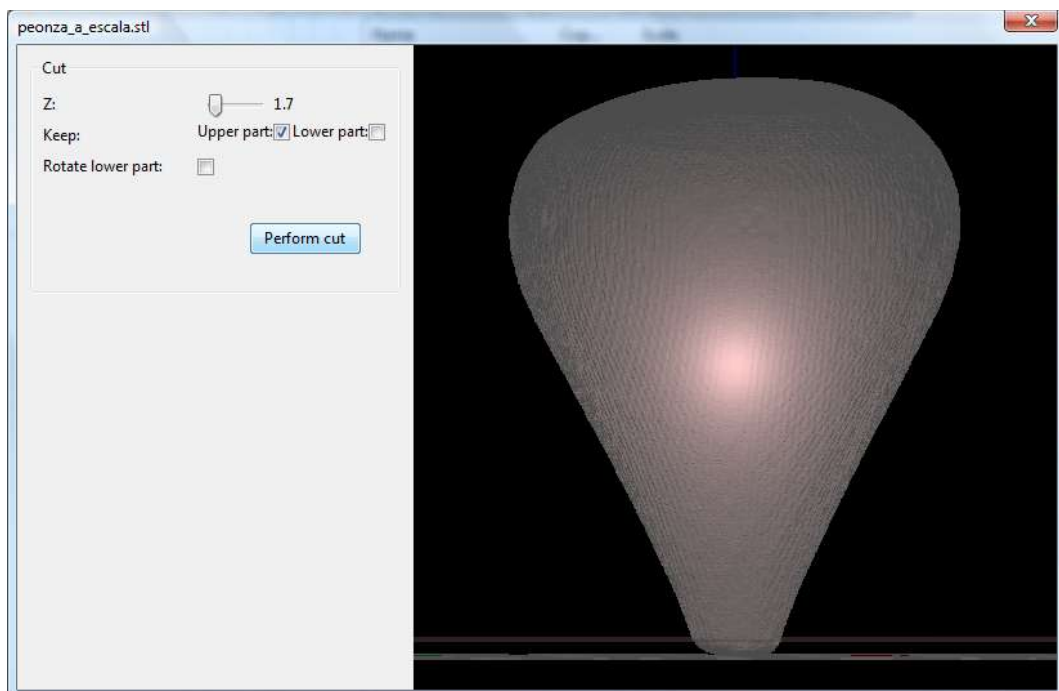


Figura 5.6 Corte punta de la peonza modelo escalado



Comentada la problemática anterior y resuelto el análisis de su desarrollo ya tenemos los dos modelos 3D completamente definidos y esta vez sí para ser guardados en la tarjeta de lectura SD, la cual contendrá las instrucciones a seguir por la impresora para la correcta impresión.

5.3 Método de impresión

A continuación se debe definir y/o ajustar las propiedades y parámetros de impresión de la impresora 3D por medio del software Slic3r. Se definirán una serie de opciones (Figura 5.7) para la impresión de los modelos.

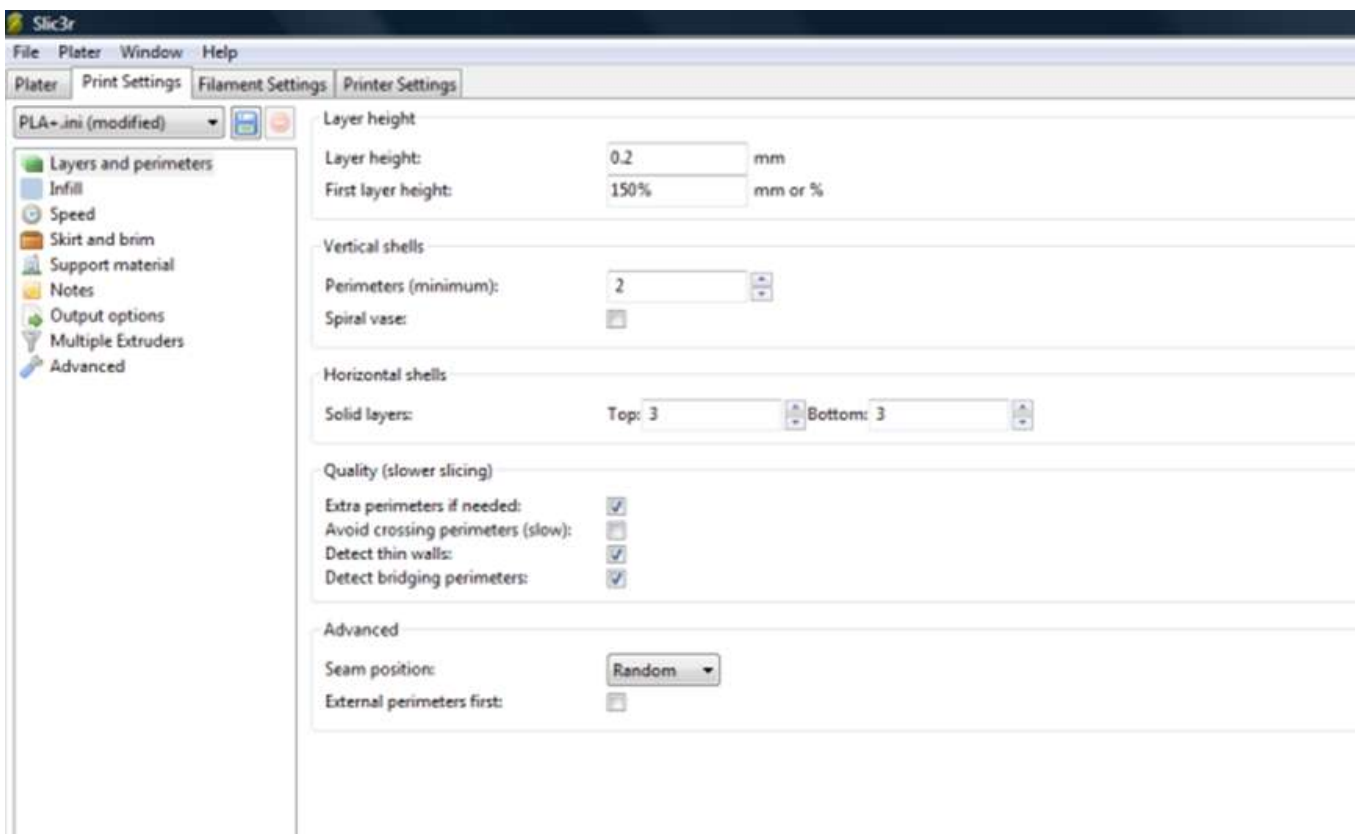


Figura 5.7 Parámetros de capa y perímetros

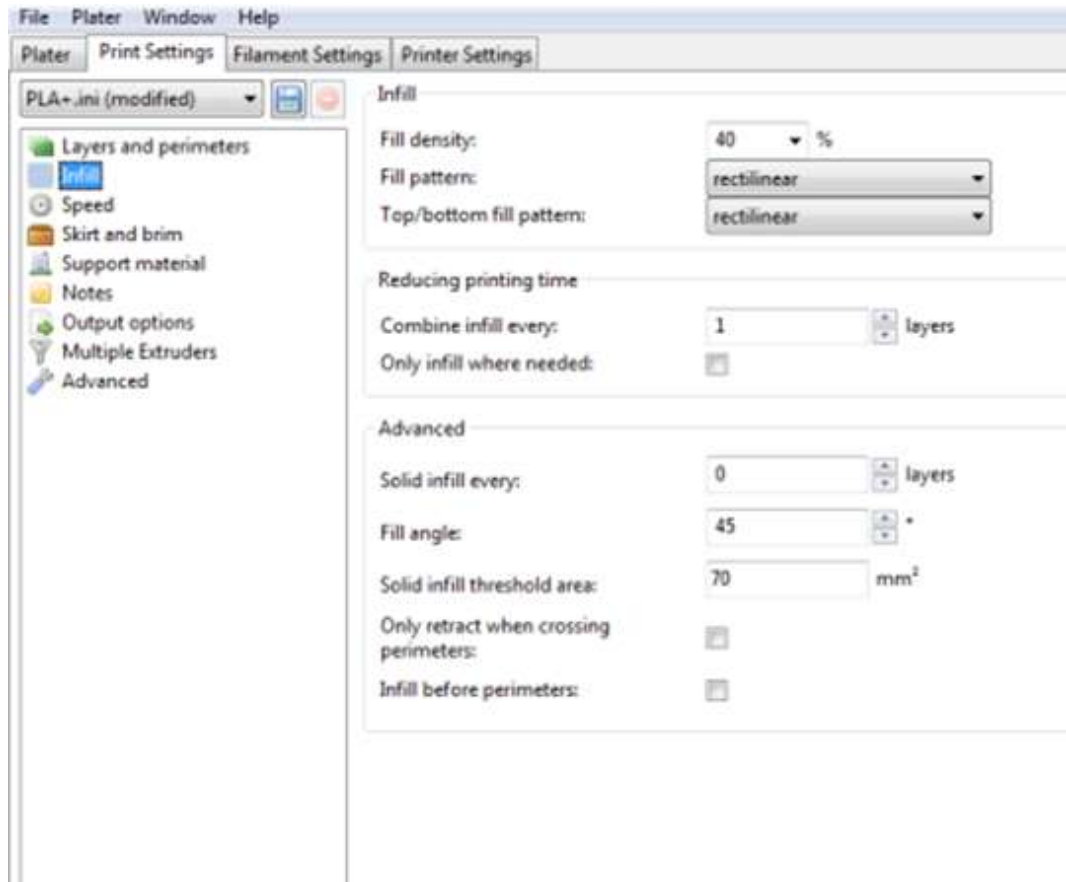


Figura 5.8 Parámetros de relleno

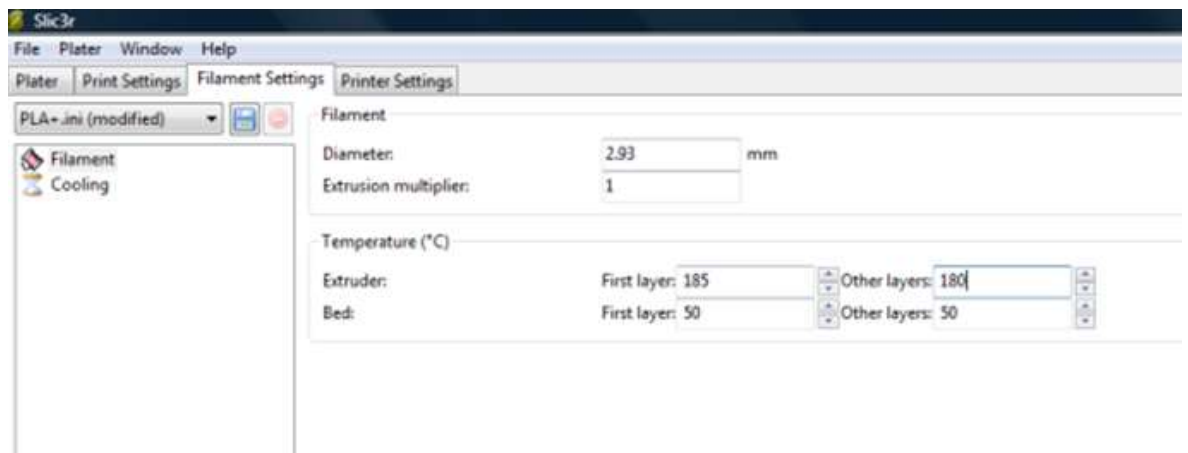


Figura 5.9 Parámetros de filamento

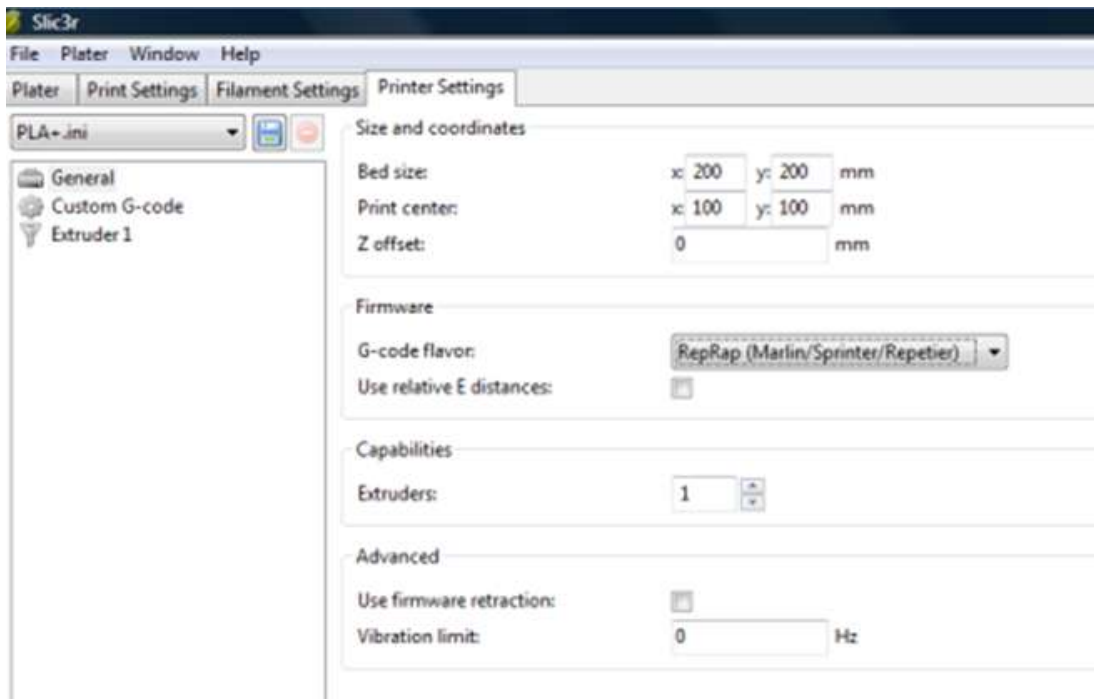


Figura 5.10 Parámetros generales de la impresora

Los parámetros más importantes a imponer en los modelos de peonza definidos se recogen en la siguiente tabla (Tabla 5.1)

Tabla 5.1 Parámetros de impresión de la peonza

Altura de capa	0,2 mm	
Primera altura de capa	150%	
Capas sólidas	Capas superiores	3
	Capas inferiores	3
Densidad del relleno	40%	
Umbral de área a partir del cual se hace relleno sólido	70 mm ²	
Brimm	0 mm	
Díámetro de Filamento	2,93 mm	
Temperatura del extrusor	Primera capa	185° C
	Resto de capas	180° C
Temperatura de la cama	Primera capa	50° C
	Resto de capas	50° C

Una vez instaurados los parámetros de impresión solo queda crear el G-Code que pueda entender la máquina 3D, (Figura 5.11). El espacio de trabajo para su generación es el siguiente:

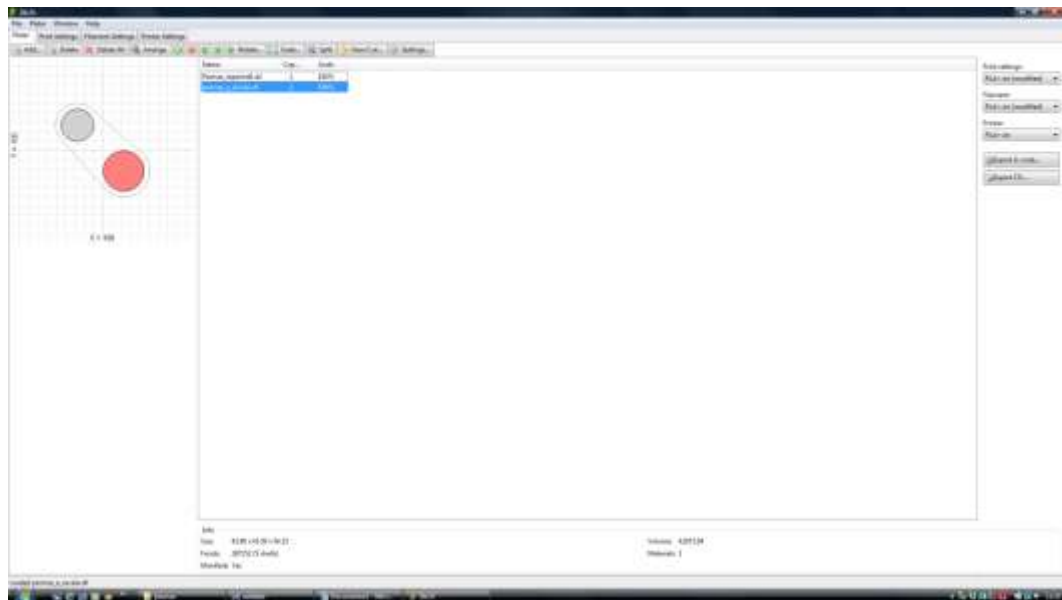


Figura 5.11. Espacio de trabajo para la generación del G-Code

El proceso de impresión se llevo a cabo con la realización de los dos modelos 3D al mismo tiempo y el material utilizado fue PLA cuyas características se comentaron en el apartado 4.5.2 impresora 3D.



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

6. RESULTADOS OBTENIDOS



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Tras el estudio realizado de forma completa y detallada sobre la modelación 3D vista anteriormente, y las acciones llevadas a cabo a través del software de luz estructurada sobre la pieza real para su digitalización, se ponen de manifiesto los modelos obtenidos en la impresión 3D.

Por un lado, el modelo escalado con factor de escala 1,28 (Figura 6.1), y por otro lado, el modelo obtenido directamente del software de luz estructurada sin sufrir ningún tipo de alteración geométrica (Figura 6.2); así como una comparación entre ambas (Figura 6.3).



Figura 6.1 Peonza escalada



Figura 6.2 Peonza sin escalar



Figura 6.3 Peonza escalada y sin escalar

Obtenidos los modelos impresos se procede a su medición por medio de un pie de rey centesimal, puesto a disposición por parte del Laboratorio de Metrología y Calibración Dimensional de la Universidad de Valladolid, con el objetivo de determinar de forma clara y detallada el grado de aproximación final de ambos modelos con respecto a la peonza real. Para ello, también se realizaron las correspondientes mediciones de la pieza real.

Se han realizado 10 mediciones de cada una de las dos dimensiones básicas de que constan las piezas de revolución, el diámetro exterior y la altura (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Medidas comparativas modelos

	Peonza real	Peonza sin escalar	Peonza escalada
Diámetro exterior	44,60 mm	34,51 mm	42,94 mm
	44,42 mm	34,41 mm	42,80 mm
	44,31 mm	34,42 mm	42,73 mm
	44,36 mm	34,43 mm	42,97 mm
	44,41 mm	34,50 mm	42,95 mm
	44,65 mm	34,41 mm	42,89 mm
	44,37 mm	34,60 mm	42,96 mm
	44,46 mm	34,51 mm	42,92 mm
	44,39 mm	34,41 mm	42,81 mm
	44,27 mm	34,40 mm	42,91 mm
Altura	55,68 mm	42,95 mm	53,46 mm
	55,53 mm	43,04 mm	53,62 mm
	55,63 mm	43,13 mm	53,65 mm
	55,64 mm	43,16 mm	53,61 mm
	55,58 mm	43,09 mm	53,45 mm
	55,51 mm	43,11 mm	53,50 mm
	55,56 mm	43,05 mm	53,40 mm
	55,54 mm	43,13 mm	53,47 mm
	55,57 mm	43,10 mm	53,44 mm
	55,60 mm	43,12 mm	53,45 mm

En los siguientes gráficos se puede observar de forma detallada una comparativa entre las medidas realizadas del diámetro exterior (Gráfico 1), y de la altura del modelo (Gráfico 2),



Gráfico 1. Comparación de toma de medidas del diámetro exterior

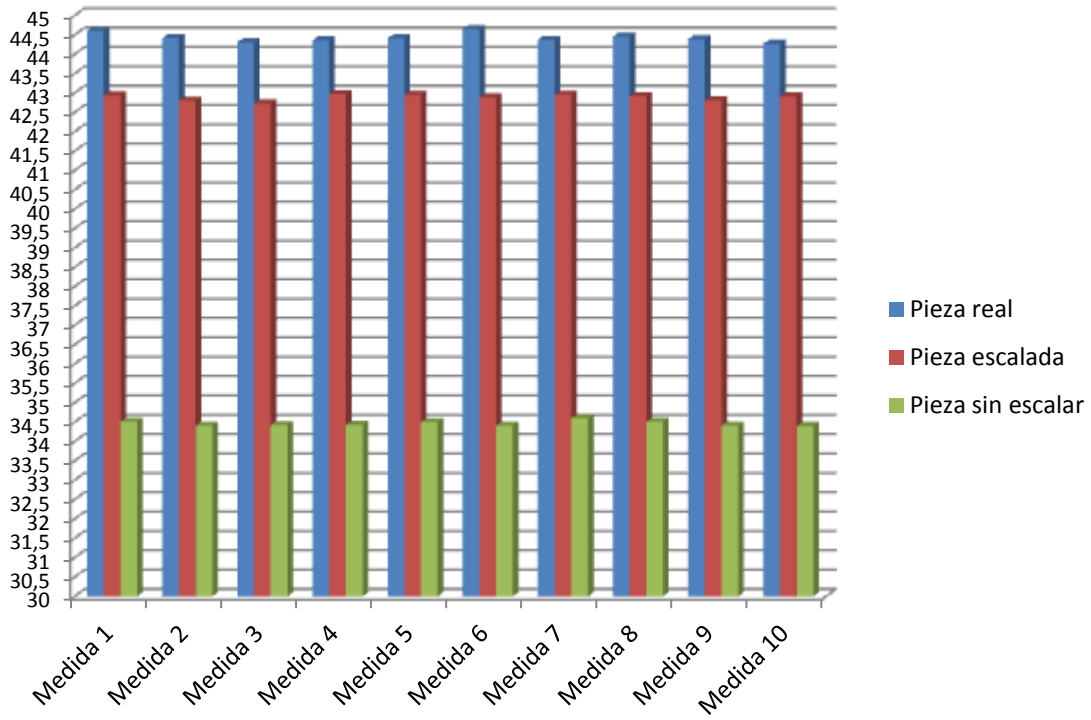
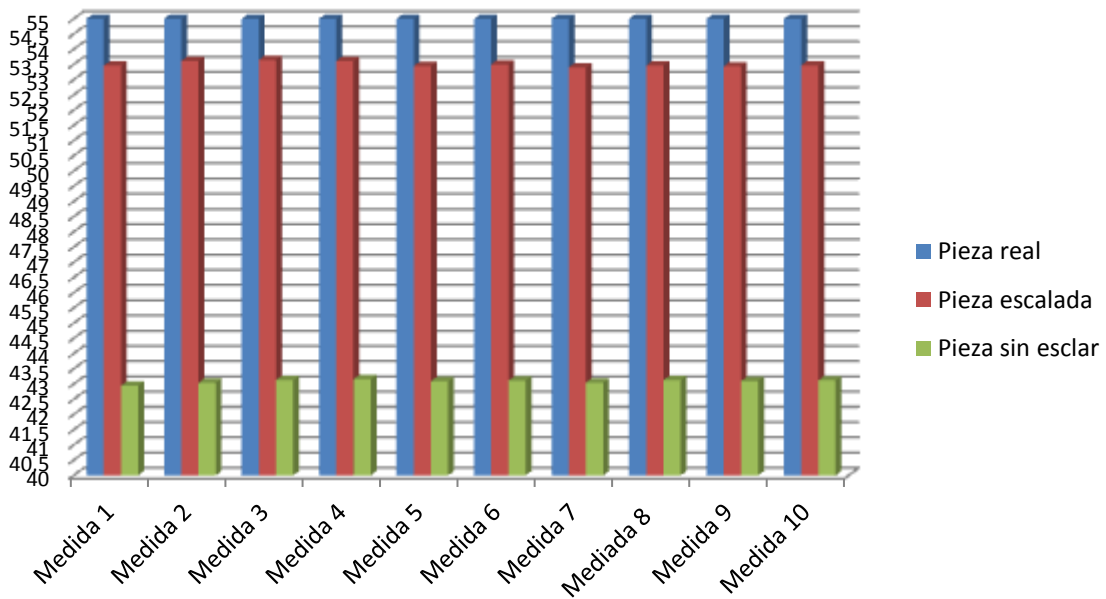


Gráfico 2. Comparación de toma de medidas de la altura



A continuación se calcularán las medias y desviaciones típicas de cada uno de los tres casos mostrados anteriormente y se recogerán los datos en su correspondiente tabla de medidas.

En primer lugar hallamos la media de las diez medidas tomadas, como hay muchos valores, tanto por exceso como por defecto, se compensarán mutuamente, y el valor medio obtenido tendrá seguramente un error menor que el de cualquier valor individual, de esta forma conseguimos un valor que se aproxime más a la realidad de nuestra pieza real de medida. Es importante recordar que en una toma de datos siempre habrá los conocidos errores accidentales o aleatorios.

El *valor medio* del conjunto de 10 medidas tomadas sobre cada uno de los modelos se calculará a través de la ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Es decir, la suma de todos los valores dividida por el número de medidas.

En segundo lugar, se empleará un valor que nos indique la dispersión que hay en los valores medidos con respecto al valor promedio, para ello emplearemos la ecuación de la *desviación típica muestral*, ya que se ha realizado un muestreo y por lo tanto se han obtenido medidas muestrales:

$$\Delta X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

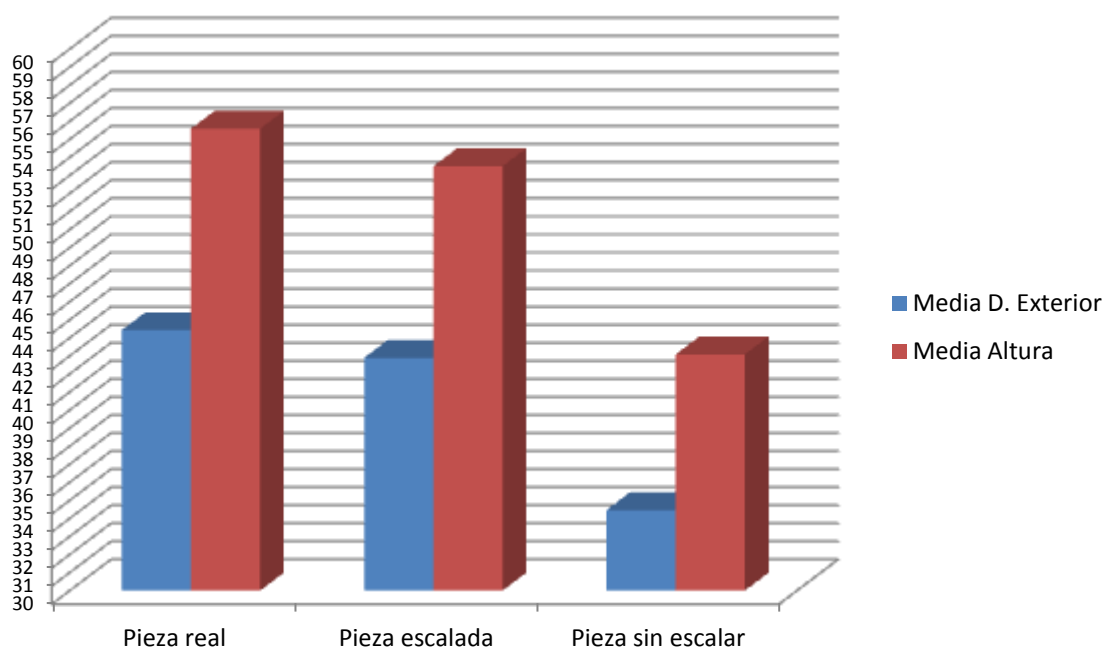
Es decir, la raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de las desviaciones que hay entre cada medida y el valor medio calculado en la ecuación 6.1, divididas por el número de medidas tomado.

Por último en la siguiente tabla (Tabla 6.2), se recogen de forma detallada los valores de las medias y desviaciones típicas de cada uno de los casos tratados según la aplicación de las correspondientes ecuaciones 6.1 y 6.2, así como su comparativa (Gráfico 3):

Tabla 6.2 Media y desviación típica de modelos.

		Media	Desviación típica
Peonza real	D. Exterior	44,424 mm	0,121 mm
	Altura	55,584 mm	0,054 mm
Peonza sin escalar	D. Exterior	34,461 mm	0,069 mm
	Altura	43,088 mm	0,061 mm
Peonza escalada	D. Exterior	42,888 mm	0,080 mm
	Altura	53,505 mm	0,087 mm

Gráfico 3. Comparación de medias



Para el cálculo de la desviación típica de cada uno de los casos observados anteriormente se ha utilizado la ecuación 6.2 con el apoyo de una tabla de cálculo Excel para mayor rapidez y precisión, tal y como se aprecia en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Hoja de cálculo Excel para desviación típica

	PEONZA REAL		MODELO SIN ESCALAR		MODELO ESCALADO	
	44,61	55,68	34,51	42,95	42,94	53,46
	44,42	55,53	34,41	43,04	42,81	53,62
	44,31	55,63	34,42	43,13	42,73	53,65
	44,36	55,64	34,43	43,16	42,97	53,61
	44,41	55,58	34,51	43,09	42,95	53,45
	44,65	55,51	34,41	43,11	42,89	53,51
	44,37	55,56	34,61	43,05	42,96	53,41
	44,46	55,54	34,51	43,13	42,92	53,47
	44,39	55,57	34,41	43,11	42,81	53,44
	44,27	55,61	34,41	43,12	42,91	53,45
DESV. TIPICA	0,121	0,054	0,069	0,061	0,080	0,087

Una vez calculadas la media y desviación típica muestral de cada uno de los tres casos, se procederá a realizar un estudio más detallado de los resultados obtenidos en la medición a través del cálculo de la incertidumbre, en un proceso de medida directo como el que se está tratando en este trabajo fin de grado, del modelo sin escalar y del modelo escalado.

6.1. Proceso de medición del modelo 3D sin escalar

El primer paso será la obtención de la función modelo, seguido del cálculo de la incertidumbre típica combinada y el factor de cobertura, para por último obtener la incertidumbre expandida. Los pasos a realizar serán los siguientes:

Para el *modelo 3D sin escalar* se tomaron como medidas esenciales el diámetro exterior y la altura. El cálculo del procedimiento para cada una de dichas medidas se observa a continuación:

6.1.1. Función Modelo

La función modelo (L), viene definida por la ecuación 6.3:

$$L = \bar{X} + \sum_{i=1}^{n=1} (Efectos)_i \quad (\text{Ec. 6.3})$$

donde se aprecia que es la suma de la media de las medidas tomadas más el sumatorio de los efectos que intervienen en la toma de dicha medida y que generalmente son: efecto de Temperatura (C_{T^a}), efecto de instrumento (C_{Inst}), efecto de operario (C_{Oper}) y efecto de escala o redondeo (C_E).

Para la toma de medidas del diámetro exterior, se ha establecido que el diámetro exterior de referencia sea $34,42 \text{ mm} \pm 120 \text{ }\mu\text{m}$. Por lo tanto se establece como límite de tolerancia superior $L_s = 34,42 \text{ mm} + 120 \text{ }\mu\text{m}$; y como límite de tolerancia inferior $L_i = 34,42 \text{ mm} - 120 \text{ }\mu\text{m}$. En el caso de la altura, se ha establecido como referencia la medida de $43,10 \text{ mm} \pm 120 \text{ }\mu\text{m}$; y como límite de tolerancia superior $L_s = 43,10 \text{ mm} + 120 \text{ }\mu\text{m}$, e inferior $L_i = 43,10 \text{ mm} - 120 \text{ }\mu\text{m}$.

Los cálculos que a continuación se exponen, tienen como objetivo determinar si la pieza obtenida se encuentra dentro de las exigencias metrológicas, definidas por la tolerancia supuesta en el estudio de este trabajo fin de grado.

Para la medida del diámetro exterior $\bar{X} = 34,461 \text{ mm}$ y por tanto:

$$L_{\text{Diámetro exterior}} = \bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

A continuación se procederá a calcular la estimación de la función modelo \hat{L} a través de la ecuación 6.5, donde E nos muestra el operador de esperanza matemática lineal:

$$\hat{L} = E(\bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper}) = \bar{X} + E(C_E) + E(C_{Inst}) + E(C_{T^a}) + E(C_{Oper}) = 34,462 + 0 + 0 + 0 = 34,461 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Como se ha visto en la ecuación anterior $E(C_E) = 0$ al suponer una distribución simétrica y estar centrado en cero.

Por otro lado se ha supuesto $C_{calibración} = 0$ por tanto $E(C_{Inst}) = 0$.

Por último para cualquier otro efecto como la temperatura y el operario, si solo conocemos su incertidumbre y no su calibración $E(C_{T^a}) = 0$ y $E(C_{Oper}) = 0$. Por tanto, $L_{\text{Diámetro exterior}} = 34,461 \text{ mm}$

Para la medida de la altura $\bar{X} = 43,088 \text{ mm}$ y siguiendo los mismos pasos realizados anteriormente para el cálculo del diámetro exterior, ya que no se sufre ninguna alteración en los parámetros que intervienen en el proceso del cálculo; la función modelo será:

$$L_{\text{Altura}} = \bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

A continuación se procederá a calcular la estimación de la función modelo \hat{L} a través de la ecuación 6.7, donde E nos muestra el operador de esperanza matemática lineal:

$$\hat{L} = E(\bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper}) = \bar{X} + E(C_E) + E(C_{Inst}) + E(C_{T^a}) + E(C_{Oper}) = 43,088 + 0 + 0 + 0 = 43,088 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Como se ha visto en la ecuación anterior $E(C_E) = 0$ al suponer una distribución simétrica y estar centrado en cero.

Por otro lado se ha supuesto $C_{calibración} = 0$ por tanto $E(C_{Inst}) = 0$.

Por último para cualquier otro efecto como la temperatura y el operario, si solo conocemos su incertidumbre y no su calibración $E(C_{T^a}) = 0$ y $E(C_{Oper}) = 0$. Por tanto, $L_{\text{Altura}} = 43,088 \text{ mm}$.

6.1.2. Cálculo de la incertidumbre

Se parte de la ecuación:

$$U(L) = K \cdot u(L) \quad (\text{Ec. 6.8})$$

donde $U(L)$ es la incertidumbre expandida, K es el factor de cobertura y $u(L)$ es la incertidumbre típica combinada, para llegar a la expresión final de nuestra medición, es decir, del diámetro exterior ($L_{\text{Diámetro exterior}}$) y de la altura (L_{Altura}):

$$L \pm U(L) \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Por tanto, lo primero será calcular $u(L)$, para el diámetro exterior ($u(L_{\text{Diámetro exterior}})$), para lo cual se utiliza la ecuación 6. 10:

$$u(L_{\text{Diámetro exterior}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^u u_i^2} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

donde la incertidumbre típica combinada de la media ($u(\bar{X})$) es:

$$u(\bar{X}) = \frac{s_i}{\sqrt{n}} = \frac{0,069}{\sqrt{10}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.11})$$

Tipo A

siendo s_i la desviación típica y n el número de medidas realizadas.

La incertidumbre típica combinada de la escala ($u(c_E)$) es:

$$u(c_E) = \frac{E}{\sqrt{12}} = \frac{0,010}{\sqrt{12}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.12})$$

Tipo B

La incertidumbre típica del instrumento ($u(C_{instr})$), suponiendo que se toma como incertidumbre expandida del instrumento de medida $U=30\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{instr}) = \frac{U}{k} = \frac{0,030}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

Tipo B

La incertidumbre típica de la temperatura ($u(C_{T^a})$), suponiendo que se toma como incertidumbre debida a la temperatura del taller $U=10\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{T^a}) = \frac{U}{k} = \frac{0,010}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.14})$$

Tipo B

Volviendo a la ecuación 6.10:

$$u(L_{\text{Diámetro exterior}}) = \sqrt{\left(\frac{0,069}{\sqrt{10}}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{0,030}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{2}\right)^2} = 0,027100 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.15})$$

Por tanto, a través de la ecuación 6.8:

$$U(L_{\text{Diámetro exterior}}) = K \cdot u(L) = 2 \cdot 0,027100 = 0,054200 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.16})$$

donde se ha tomado el factor de cobertura $K = 2$ debido a que se tienen como componentes de la incertidumbre, vistos en las ecuaciones 6.11, 6.12, 6.13 y 6.14, un tipo A con $n \geq 10$ y 3 tipo B, con $gdl = \infty$.

Por tanto la expresión final del diámetro exterior (Ec. 6.9) es:

$$L_{\text{Diámetro exterior}} \pm U(L_{\text{Diámetro exterior}}) = 34,461 \pm 0,054 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.17})$$

Para el caso de la altura ($u(L_{\text{Altura}})$), se realizará el mismo procedimiento de cálculo que para el diámetro exterior, por tanto:

$$u(L_{\text{Altura}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (\text{Ec. 6.18})$$

donde la incertidumbre típica combinada de la media ($u(\bar{X})$) es:

$$u(\bar{X}) = \frac{s_i}{\sqrt{n}} = \frac{0,061}{\sqrt{10}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.19})$$

Tipo A

siendo s_i la desviación típica y n el número de medidas realizadas.

La incertidumbre típica combinada de la escala ($u(c_E)$) es:

$$u(C_E) = \frac{E}{\sqrt{12}} = \frac{0,010}{\sqrt{12}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.20})$$

Tipo B

La incertidumbre típica del instrumento ($u(C_{instr})$), suponiendo que se toma como incertidumbre expandida del instrumento de medida $U=30\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{instr}) = \frac{U}{k} = \frac{0,030}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.21})$$

Tipo B

La incertidumbre típica de la temperatura ($u(C_{T^a})$), suponiendo que se toma como incertidumbre debida a la temperatura del taller $U=10\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{T^a}) = \frac{U}{k} = \frac{0,010}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.22})$$

Tipo B

Volviendo a la ecuación 6.18:

$$u(L_{Altura}) = \sqrt{\left(\frac{0,061}{\sqrt{10}}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{0,030}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{2}\right)^2} = 0,025108 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.23})$$

Por tanto, a través de la ecuación 6.8:

$$U(L_{Altura}) = K \cdot u(L) = 2 \cdot 0,025108 = 0,050216 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.24})$$

donde se ha tomado el factor de cobertura $K = 2$ debido a que se tienen como componentes de la incertidumbre, vistos en las ecuaciones 6.19, 6.20, 6.21 y 6.22, un tipo A con $n \geq 10$ y 3 tipo B, con $gdf = \infty$.

La expresión final de la altura (Ec. 6.9) es:

$$L_{Altura} \pm U(L_{Altura}) = 43,088 \pm 0,050 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.25})$$

En resumen, las expresiones finales obtenidas para el diámetro exterior y para la altura son:

$$L_{\text{Diámetro exterior}} \pm U (L_{\text{Diámetro exterior}}) = 34,461 \pm 0,054 \text{ mm} \text{ (Ec. 6.17)}$$

$$L_{\text{Altura}} \pm U (L_{\text{Altura}}) = 43,088 \pm 0,050 \text{ mm} \quad \text{(Ec. 6.25)}$$

las cuales quedan dentro del rango de tolerancia establecido anteriormente a través de los límites de tolerancia L_s y L_i .

6.2. Proceso de medición del modelo 3D escalado

Al igual que para el modelo sin escalar, se seguirán los mismos pasos descritos en el apartado 6.1., obteniendo de este modo las expresiones finales tanto para el diámetro exterior, como para la altura del modelo escalado, así como el cálculo de si las medidas de dicha pieza se encuentran dentro de las exigencias metrológicas definidas según una tolerancia supuesta en este trabajo fin de grado.

6.2.1. Función Modelo

La función modelo (L), viene definida por la ecuación 6.3:

$$L = \bar{X} + \sum_{i=1}^{n=1} (Efectos)_i \quad \text{(Ec. 6.3)}$$

donde se aprecia que es la suma de la media de las medidas tomadas más el sumatorio de los efectos que intervienen en la toma de dicha medida y que generalmente son: efecto de Temperatura (C_{T^a}), efecto de instrumento (C_{Inst}), efecto de operario (C_{Oper}) y efecto de escala o redondeo (C_E).

Para la toma de medidas del diámetro exterior, se ha establecido que el diámetro exterior de referencia sea $42,90 \text{ mm} \pm 120 \mu\text{m}$. Por lo tanto se establece como límite de tolerancia superior $L_s = 42,90 \text{ mm} + 120 \mu\text{m}$; y como límite de tolerancia inferior $L_i = 42,90 \text{ mm} - 120 \mu\text{m}$. En el caso de la altura, se ha establecido como referencia la medida de $53,50 \text{ mm} \pm 120 \mu\text{m}$; y como límite de tolerancia superior $L_s = 53,50 \text{ mm} + 120 \mu\text{m}$, e inferior $L_i = 53,50 \text{ mm} - 120 \mu\text{m}$.

Como ya se dijo en párrafos anteriores, y para comprobar si la pieza escalada se encuentra dentro de las exigencias metrológicas definidas por la tolerancia, se deben realizar los siguientes cálculos:

Para la medida del diámetro exterior $\bar{X} = 42,888 \text{ mmy}$ por tanto:



$$L_{\text{Diámetro exterior}} = \bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

A continuación se procederá a calcular la estimación de la función modelo \hat{L} a través de la ecuación 6.26, donde E nos muestra el operador de esperanza matemática lineal:

$$\hat{L} = E(\bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper}) = \bar{X} + E(C_E) + E(C_{Inst}) + E(C_{T^a}) + E(C_{Oper}) = 42,888 + 0 + 0 + 0 = 42,888 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.26})$$

Como se ha visto en la ecuación anterior $E(C_E) = 0$ al suponer una distribución simétrica y estar centrado en cero.

Por otro lado se ha supuesto $C_{\text{calibración}} = 0$ por tanto $E(C_{Inst}) = 0$.

Por último para cualquier otro efecto como la temperatura y el operario, si solo conocemos su incertidumbre y no su calibración $E(C_{T^a}) = 0$ y $E(C_{Oper}) = 0$. Por tanto, $L_{\text{Diámetro exterior}} = 42,888 \text{ mm}$.

Para la medida de la altura $\bar{X} = 53,505 \text{ mm}$ y siguiendo los mismos pasos realizados anteriormente para el cálculo del diámetro exterior, ya que no se sufre ninguna alteración en los parámetros que intervienen en el proceso del cálculo; la función modelo será:

$$L_{\text{Altura}} = \bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

A continuación se procederá a calcular la estimación de la función modelo \hat{L} a través de la ecuación 6.27, donde E nos muestra el operador de esperanza matemática lineal:

$$\hat{L} = E(\bar{X} + C_E + C_{Inst} + C_{T^a} + C_{Oper}) = \bar{X} + E(C_E) + E(C_{Inst}) + E(C_{T^a}) + E(C_{Oper}) = 53,505 + 0 + 0 + 0 = 53,505 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.27})$$

Como se ha visto en la ecuación anterior $E(C_E) = 0$ al suponer una distribución simétrica y estar centrado en cero.

Por otro lado se ha supuesto $C_{\text{calibración}} = 0$ por tanto $E(C_{Inst}) = 0$.

Por último para cualquier otro efecto como la temperatura y el operario, si solo conocemos su incertidumbre y no su calibración $E(C_{T^a}) = 0$ y $E(C_{Oper}) = 0$. Por tanto, $L_{\text{Altura}} = 53,505$ mm.

6.2.2. Cálculo de la incertidumbre

Se parte de la ecuación:

$$U(L) = K \cdot u(L) \quad (\text{Ec. 6.8})$$

donde $U(L)$ es la incertidumbre expandida, K es el factor de cobertura y $u(L)$ es la incertidumbre típica combinada, para llegar a la expresión final de nuestra medición, es decir, del diámetro exterior ($L_{\text{Diámetro exterior}}$) y de la altura (L_{Altura}):

$$L \pm U(L) \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Por tanto, lo primero será calcular $u(L)$, para el diámetro exterior ($u(L_{\text{Diámetro exterior}})$), para lo cual se utiliza la ecuación 6. 10:

$$u(L_{\text{Diámetro exterior}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^u u_i^2} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

donde la incertidumbre típica combinada de la media ($u(\bar{X})$) es:

$$u(\bar{X}) = \frac{s_i}{\sqrt{n}} = \frac{0,080}{\sqrt{10}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.28})$$

Tipo A

siendo s_i la desviación típica y n el número de medidas realizadas.

La incertidumbre típica combinada de la escala ($u(c_E)$) es:

$$u(c_E) = \frac{E}{\sqrt{12}} = \frac{0,010}{\sqrt{12}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.29})$$

Tipo B

La incertidumbre típica del instrumento ($u(C_{instr.})$), suponiendo que se toma como incertidumbre expandida del instrumento de medida $U=30 \mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{instr}) = \frac{U}{k} = \frac{0,030}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.30})$$

Tipo B

La incertidumbre típica de la temperatura ($u(C_{T^a})$), suponiendo que se toma como incertidumbre debida a la temperatura del taller $U=10\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{T^a}) = \frac{U}{k} = \frac{0,010}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.31})$$

Tipo B

Volviendo a la ecuación 6.10:

$$u(L_{\text{Diámetro exterior}}) = \sqrt{\left(\frac{0,080}{\sqrt{10}}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{0,030}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{2}\right)^2} = 0,029972 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.32})$$

Por tanto, a través de la ecuación 6.8:

$$U(L_{\text{Diámetro exterior}}) = K \cdot u(L) = 2 \cdot 0,029972 = 0,059944 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.33})$$

donde se ha tomado el factor de cobertura $K = 2$ debido a que se tienen como componentes de la incertidumbre, vistos en las ecuaciones 6.28, 6.29, 6.30 y 6.31, un tipo A con $n \geq 10$ y 3 tipo B, con $gdf = \infty$.

Por tanto la expresión final del diámetro exterior (Ec. 6.9) es:

$$L_{\text{Diámetro exterior}} \pm U(L_{\text{Diámetro exterior}}) = 42,888 \pm 0,059 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.34})$$

Para el caso de la altura ($u(L_{\text{Altura}})$), se realizará el mismo procedimiento de cálculo que para el diámetro exterior, por tanto:

$$u(L_{\text{Altura}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^u u_i^2} \quad (\text{Ec. 6.18})$$

donde la incertidumbre típica combinada de la media ($u(\bar{X})$) es:

$$u(\bar{X}) = \frac{s_i}{\sqrt{n}} = \frac{0,087}{\sqrt{10}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.35})$$

Tipo A

siendo s_i la desviación típica y n el número de medidas realizadas.

La incertidumbre típica combinada de la escala ($u(c_E)$) es:

$$u(c_E) = \frac{E}{\sqrt{12}} = \frac{0,010}{\sqrt{12}} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.36})$$

Tipo B

La incertidumbre típica del instrumento ($u(C_{instr})$), suponiendo que se toma como incertidumbre expandida del instrumento de medida $U=30\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{instr}) = \frac{U}{k} = \frac{0,030}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.37})$$

Tipo B

La incertidumbre típica de la temperatura ($u(C_{T^a})$), suponiendo que se toma como incertidumbre debida a la temperatura del taller $U=10\mu\text{m}$ y factor de cobertura $k=2$, es:

$$u(C_{T^a}) = \frac{U}{k} = \frac{0,010}{2} \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.38})$$

Tipo B

Volviendo a la ecuación 6.18:

$$u(L_{Altura}) = \sqrt{\left(\frac{0,087}{\sqrt{10}}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{0,030}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,010}{2}\right)^2} = 0,031863 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.39})$$

Por tanto, a través de la ecuación 6.8:

$$U(L_{Altura}) = K \cdot u(L) = 2 \cdot 0,031863 = 0,063726 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.40})$$

donde se ha tomado el factor de cobertura $K = 2$ debido a que se tienen como componentes de la incertidumbre, vistos en las ecuaciones 6.35, 6.36, 6.37 y 6.38, un tipo A con $n \geq 10$ y 3 tipo B, con $gdl = \infty$.

Por tanto la expresión final de la altura (Ec. 6.9) es:

$$L_{\text{Altura}} \pm U (L_{\text{Altura}}) = 53,505 \pm 0,064 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.41})$$

En resumen, las expresiones finales obtenidas para el diámetro exterior y para la altura son:

$$L_{\text{Diámetro exterior}} \pm U (L_{\text{Diámetro exterior}}) = 42,888 \pm 0,059 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.34})$$

$$L_{\text{Altura}} \pm U (L_{\text{Altura}}) = 53,505 \pm 0,064 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 6.41})$$

las cuales quedan dentro del rango de tolerancia establecido anteriormente a través de los límites de tolerancia L_s y L_i .

En síntesis se ha comprobado que ambas piezas evaluadas se encuentran dentro de las exigencias metrológicas establecidas por la tolerancia supuesta, tanto en diámetro exterior, como en altura.

El siguiente paso será calcular los errores relativos y absolutos de ambas medidas esenciales, y realizar una comparación entre modelo escalada y el modelo sin escalar, constatado en el siguiente capítulo.

7. CONCLUSIONES



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

7. CONCLUSIONES

La principal conclusión obtenida, tras realizar los ensayos experimentales pertinentes, es que con el software de luz estructurada utilizado en este trabajo se pierde la escala de la pieza objeto de estudio, es decir, las dimensiones finales obtenidas no corresponden con la pieza real, siendo las dimensiones de la pieza real mucho mayores, como se puede comprobar en las mediciones realizadas sobre los modelos y que se pueden observar en la tabla 6.1 de medidas comparativas entre modelos.

Numéricamente hablando, el modelo 3D obtenido del software de luz estructurada, posee un diámetro exterior exacto dado por Netfabb de 34,740 mm, mientras que la pieza real medida por un instrumento de medida, su diámetro exterior posee un valor medio de 44,424 mm. Se define el error absoluto (*Error abs.*) y el error relativo (*Error Rela.*) mediante las ecuaciones 7.1 y 7.2:

$$Error\ Abs. = X_{medido} - X_{exacto} = 44,424\ mm - 34,740\ mm = 9,684\ mm \quad (Ec. 7.1)$$

$$Error\ Rela. = \frac{Error}{X_{exacto}} = \frac{X_{medido} - X_{exacto}}{X_{exacto}} = 0,278 \quad (Ec. 7.2)$$

Dicho error relativo nos marca la mayor o menor importancia del error cometido siendo este de 27,8 %, error de gran magnitud que reitera el hecho de la pérdida de escala de diámetro exterior.

Del mismo modo, referido a altura, el Netfabb proporciona un valor exacto en altura de 35,060 mm, mientras que el instrumento de medida otorga un valor medio de 55,584 mm. El error absoluto (*Error Abs.*) y relativo (*Error Rela.*) en este caso serán el calculado mediante las ecuaciones 7.3 y 7.4:

$$Error\ Abs. = X_{medido} - X_{exacto} = 55,584\ mm - 35,060\ mm = 20,524\ mm \quad (Ec. 7.3)$$

$$Error\ Rela. = \frac{Error}{X_{exacto}} = \frac{X_{medido} - X_{exacto}}{X_{exacto}} = 0,585 \quad (Ec. 7.4)$$

Es decir, el error asciende al 58,5 %, por lo que la escala se pierde en la otra medida fundamental de las piezas de revolución, como era previsto.

En resumen, el software de luz estructurada nos lleva a la obtención de un modelo con una pérdida de escala total según el análisis experimental realizado en este trabajo fin de grado.

En segundo lugar, como se comentó en párrafos anteriores, con el objetivo de recuperar la escala, se introducirá un factor de escala de corrección para obtener el modelo escalado correspondiente con las dimensiones finales reales de la pieza objeto de estudio.

Dicho factor de corrección tendrá un valor de 1,28, es decir, se debe de multiplicar las dimensiones de la pieza obtenida por el David Laser Scanner por el valor de 1,28.

Para constatarlo numéricamente se tiene que el modelo 3D escalado posee un diámetro exterior de valor medio de 42,888 mm como ha quedado recogido en la tabla 5.2, mientras que la pieza real tiene un valor medio de diámetro exterior de 44,424 mm. El error absoluto (*Error Abs.*) y el error relativo (*Error Rela.*) serán calculados mediante las ecuaciones 7.5 y 7.6:

$$Error\ Abs. = X_{medido} - X_{exacto} = 44,424\ mm - 42,888\ mm = 1,536\ mm \quad (Ec. 7.5)$$

$$Error\ Rela. = \frac{Error}{X_{exacto}} = \frac{X_{medido} - X_{exacto}}{X_{exacto}} = 0,0358 \quad (Ec. 7.6)$$

Es decir, el error es de un 3,58 %.

Del mismo modo referido a la altura, el modelo 3D escalado posee una altura de valor medio 53,505 mm (Tabla 6.2), mientras que la pieza real tiene un valor de altura medio de 55,584 mm. El error absoluto (*Error Abs.*) y el error relativo (*Error Rela.*) serán calculados mediante las ecuaciones 7.7 y 7.8:

$$Error\ Abs. = X_{real} - X_{modelo\ 3D} = 55,584\ mm - 53,505\ mm = 2,079\ mm \quad (Ec. 7.7)$$

$$Error\ Rela. = \frac{Error}{X_{exacto}} = \frac{X_{real} - X_{modelo\ 3D}}{X_{modelo\ 3D}} = 0,0388 \quad (Ec. 7.8)$$

Es decir, el error es de 3,88 %.

Por tanto, el porcentaje de error obtenido anteriormente en ambas mediadas esenciales de una pieza de revolución nos indica que el modelo escalado obtenido está muy próximo a la realidad y ha sufrido variación debido a *errores accidentales o aleatorios, errores de paralaje* del sistema de obtención del modelo por parte del David laser scanner o *errores de cero* del aparato de medición sobre los modelos obtenidos, es decir, errores que están de forma constante y dentro de un margen de tolerancia; como bien se ha puesto en conocimiento al calcular la función modelo, desarrollada en el apartado 6, donde tras las comprobaciones oportunas, se constataba que las medidas se encontraban dentro de los límites de tolerancia establecidos con anterioridad.

En tercer lugar se ha podido apreciar según los cálculos constatados en la segunda conclusión, que ambos errores relativos del modelo 3D escalado son muy similares, siendo el del diámetro exterior de un 3,58 % y el de la altura de un 3,88 %, indicios que nos hacen sospechar que insaturado el factor de escala de 1,28 los resultados obtenidos contienen un nuevo factor de escala real muy próximo a la unidad, y por tanto a la exactitud; y además se mantiene casi constante en ambas medidas esenciales de la pieza de revolución objeto de estudio.

El factor de escala real en *diámetro exterior* será calculado mediante la ecuación 7.9:

$$\frac{\text{Valor medio pieza real}}{\text{Valor medio pieza escala}} = \frac{44,424 \text{ mm}}{42,888 \text{ mm}} = 1,0358 \quad (\text{Ec 7.9})$$

El factor de escala real en *altura* será calculado mediante la ecuación 7.10:

$$\frac{\text{Valor medio pieza real}}{\text{Valor medio pieza escala}} = \frac{55,584 \text{ mm}}{53,505 \text{ mm}} = 1,0388 \quad (\text{Ec 7.10})$$

En efecto, se mantiene prácticamente el factor de corrección, tanto del diámetro exterior como de la altura en el modelo 3D escalado obtenido, siendo el valor de dicho factor de 1,0388 y 1,03588 respectivamente.



Se observa que dicho factor de corrección no se corresponde con el factor de corrección real utilizado en el software Netfabb para escalar el modelo cuyo valor es de 1,28.

Esta desviación, como ya se dijo en párrafos anteriores, se puede achacar a los propios errores internos de los programas utilizados para la conversión del modelo, en el adecuado lenguaje informático así como al propio error de la impresión llevada a cabo por la impresora 3D, el cual es debido a la existencia de contracciones en el material que provocan que la pieza siempre quede por debajo de las medidas dimensionales que se impusieron al diseñarla debido a que al salir del extrusor el material está a una alta temperatura y después de depositarse se enfría y se contrae.

En cuarto lugar, aparte de la pérdida de escala, tal y como se aprecia en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3, existe una carencia de uniformidad y perfecta concentricidad de los modelos finales obtenidos. Dichos problemas se relacionan con la media calidad del equipo de la instalación utilizado para realizar los ensayos experimentales. No obstante, el resultado final obtenido es de una notable relevancia.

Además, al realizar la impresión con una impresora 3D el posicionamiento de la pieza cuando se genera el G-Code debe ser el adecuado, para que de esta manera la ejecución de los comandos cuando se realice la impresión sea la más precisa y adecuada. Con un correcto posicionamiento se pueden evitar o conseguir mejores acabados. En este trabajo el posicionamiento ha sido realizado con el software Netfabb Basic.

Las conclusiones correspondientes a la utilización del propio software de luz estructurada se pueden ver en el apartado 4.6.3.

8. ESTUDIO ECONÓMICO



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

8. ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se realizará una valoración de los costes totales relacionados con la elaboración del presente trabajo fin de grado, subdividiéndose dichos costes en dos grandes grupos:

- Costes Directos: Relacionados directamente con la elaboración del Trabajo Fin de Grado
 - ✓ Coste de Personal: se considera el salario del personal implicado.
 - ✓ Coste de material amortizable: se incluyen todos los materiales amortizables empleados a lo largo del proyecto.
 - ✓ Coste de material no amortizable: costes asociados a los recursos consumibles.
- Costes Indirectos: se incluirán todos los gastos derivados de la elaboración y realización del trabajo fin de grado, pero no directamente relacionados con el mismo.

Por un lado para el cálculo de los costes de personal y amortización, se obtienen las tasas por hora de los salarios y de las amortizaciones del material; para ello se deben de conocer los días efectivos de trabajo anual los cuales se hallan en base a datos históricos. De esta forma se pueden establecer el número de horas por año que trabajan los profesionales involucrados en la realización del trabajo fin de grado, y con ello, poder calcular, en función del número de horas utilizadas, el coste laboral generado.

En la tabla 8.1 se observan los días efectivos de trabajo anual, así como las horas efectivas trabajadas al año, considerando ocho horas trabajadas por día.

Tabla 8.1 Cálculo del número total de horas anuales

CONCEPTO	DÍAS
Año Medio	365
Sábados y Domingos	-104
Días efectivos de vacaciones	-22
Días efectivos reconocidos (festivos)	-14
Media de días perdidos por enfermedad	-10
Cursillos de formación, etc.	-5
Total días efectivos al año	210
Total horas anuales (8 horas al día)	1.680

8.1 COSTES DIRECTOS

8.1.1 Coste de Personal

Graduado en Ingeniería Mecánica. Responsable de las tareas y coordinación del trabajo fin de grado y de los temas implicados en cada una de las tareas a realizar. Es el encargado de guiar el análisis e investigación del trabajo para la consecución de los objetivos marcados y definidos en el mismo, además de auditar los trabajos realizados en el transcurso del trabajo fin de grado.

Tabla 8.2 Cálculo de costes de personal

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Sueldo Neto	35.000,00 €
Seg. Social + IRPF (35%)	12.250,00 €
Coste horario (1680horas)	28,13 €
Coste anual	47.250,00 €

8.1.2 Coste de material amortizable

Se considerará un proceso de amortización lineal con valor residual nulo, ya que al final de la amortización el bien ha quedado obsoleto. El coste anual sería el resultado de dividir el coste del producto entre el periodo de amortización total. Para concluir, se obtendrá el resultado del coste horario dividiendo el coste anual entre el número de horas trabajadas al año.

Tabla 8.3 Cálculo de coste de material amortizable

CONCEPTO	INVERSIÓN (€)	TIEMPO AMORTIZACIÓN (AÑOS)	COSTE ANUAL (€)
Ordenador Portátil Intel Core i5, 6Gb RAM, pantalla LED 15´´,400Gb HD	700,00	5	150,00
Microsoft XP	100,00	5	20,00
Microsoft Office 2007	480,00	5	96,00
Licencia David Laser Scanner	1.800,00	6	300,00
Proyector Acer	100,00	5	20,00
Cámara Web Logitech C615	90,00	6	15
Pieza objeto de estudio	1,00	1	1,00
Córner de Calibración	10,00	2	5,00
Apoyo de rotación	2,00	2	1,00
Impresora 3D Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación	400,00	4	100,00
Material de impresión 3D (PLA)	40,00	4	10,00
TOTAL			718,00
Coste horario material amortizable			0,43

En todos los valores anteriores se encuentra incluido el valor del IVA del 21%.



8.1.3 Coste de material no amortizable

Tabla 8.4 Cálculo de coste de material no amortizable

CONCEPTO	COSTE
Material Consumible	200,00 €
Papel	30,00 €
Material PLA para impresión 3D	30,00 €
Material Laboratorio	100,00 €
TOTAL	360,00 €
Coste Horario (1680 horas)	0,22 €

En este apartado se incluyen todos los consumibles necesarios en este trabajo fin de grado; en este caso el material consumible se refiere al consumo de brutos utilizados para la obtención del modelo.

8.2 COSTES INDIRECTOS

En este apartado se incluirán los costes derivados del proyecto pero no imputables al mismo, como serían los gastos en teléfono, energía o gestión.

Tabla 8.5 Cálculo de costes indirectos

CONCEPTO	COSTE (€)
Consumo Energético	200,00
Teléfono	10,00
TOTAL	210,00
Coste horario (1680horas)	0,125

8.3 COSTE TOTAL

Para lograr este coste total se deben de sumar todos los costes calculados anteriormente. En primer lugar se calculará el coste asociado al personal en función de la dedicación al proyecto.

Tabla 8.6. Cálculo del coste total asociado al personal en función de la dedicación

	HORAS	Coste Horario (€)	COSTE TOTAL (€)
GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	90	6	540,00
TOTAL			540,00

Por último se debe de calcular el coste relativo al material amortizable. La duración del trabajo fin de grado es de 5 meses por lo que el coste del material es de

El coste total del trabajo fin de grado se muestra a continuación:

Tabla 8.7 Cálculo de coste total

CONCEPTO	COSTE (€)
Coste Personal	540,00
Coste material amortizable	3.590,00
Coste material no amortizable	360,00
Costes indirectos	210,00
TOTAL	4.700

En resumen, el coste total del TFG elaborado es de 4.700 € en los 5 meses en los que se ha desarrollado.



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

9. BIBLIOGRAFÍA



Universidad de Valladolid

*ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS 3D
MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA*

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shalini Govil-Pai (2004): Principles of Computer Graphics: theory and practice using OpenGL and Maya.
- [2] Salomon David. (2006): Curves and Surfaces for Computer Graphics.
- [3] Chen, Jia; Wu, Xiaojun; Yu Wang, Michael; & Li, Xuanfu (2012): *3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser-scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm*. Optics and Laser Technology, Volume 45, p. 414-423.
- [4] Xu, J., Xi, N., Zhang, C., Shi, Q.A., & Gregory, J. (2001): *Real-time 3D shape inspection system of automotive parts based on structured light pattern*. Optics and Laser Technology; 43: 1–8.
- [5] Besl, P.J., Mckay, N.D. (1992): *A method for registration of 3-D shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI); 14: 239–56.
- [6] Peng Song, Zhongqi Fu, Ligang Liu, & Chi-Wing Fu (2015): *Computer Aided Geometric Design*, 35–36, 137–148.
- [7] Luo, L., Baran, I., Rusinkiewicz, S., Matusik, W., (2012). *Chopper: partitioning models into 3D-printable parts*. ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia) 31 (6), article 129.
- [8] Shapeways, (2014): *Gluing 3D printed parts*.
Recuperado desde: http://www.shapeways.com/tutorials/gluing_3d_printed_parts_tutorial [última visita: 29/07/2015]
- [9] Xin, S.-Q., Lai, C.-F., Fu, C.-W., Wong, T.-T., He, Y., Cohen-Or, D., (2011): *Making burr puzzles from 3D models*. ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH) 30 (4), article 97.
- [10] (2015). Revista Muy Interesante. Artículo 3:1-6.
- [11] (2001). Laser scanner provides 3D profiles of rotary pistons. *World Pumps*.
Recuperado desde: <http://www.worldpumps.com> [última visita: 29/07/2015]



- [12] L. Kovacs, A. Zimmermann, G. Brockmann, M. Gühring, H. Baurecht, N.A. Papadopoulos, K. Schwenzer-Zimmerer, R. Sader, E. Biemer, H.F. Zeilhofer. (2006). Three-dimensional recording of the human face with a 3D laser scanner. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 59, (p 1193-1202). Recuperado desde: http://www.researchgate.net/publication/6748353_Three-dimensional_recording_of_the_human_face_with_a_3D_laser_scanner [última visita: 29/07/2015].
- [13] Aung SC, Ngim RC, Lee ST. (1995): Evaluación del escáner láser como una herramienta de medición de superficie y su exactitud en comparación con las mediciones antropométricas faciales directas. *Br J Surg Plast* ; 48, (p 551-8).
- [14] Enciso R, Shaw A, Neumann U, Mah J. (2003): 3D Head Anthropometric Analysis.
- [15] Ferrario, V.F.; Sforza, C.; Schmitz, J.H.; Miani, J.A.; Serrao, G. (1998): A three-dimensional computerized mesh diagram analysis and its application in soft tissue facial morphometry. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*; 114: p. 404-13.
- [16] C. Wu, «VisualSfM: A Visual Structure from Motion System» (2010). Recuperado desde: <http://ccwu.me/vsfm/doc.html>. [última visita: 29/07/2015]
- [17] D. G., Lowe (2004). «Distinctive image features from scale-invariant keypoints» *Intl. Journal of Computer Vision*, pp. 60 (2):91-100.
- [18] John Oliensis (2000). A Critique of Structure-from-Motion Algorithms.
- [19] Forum Official David Laser Scanner (2015). Recuperado desde: <http://www.David-3d.com> [última visita: 29/07/2015]
- [20] ZEISS Corporation (2015). Recuperado desde: <http://www.zeiss.com/ct-services-3d>.
- [21] Levoy M., Pulli K., Fulk D. (2000) *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*.
- [22] Pages Jordi (2005). *Assisted Visual Servoing By Means of Structured Light*. PhD Thesis, Universitat de Girona.