



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

AUTOR/A: Ariza Cólera, Carlos

Tutor/a: Gutiérrez Rubert, Santiago Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

RESUMEN

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio detallado del escaneo de superficies 3D utilizando una sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas (CMM), empleando el software CAMIO de LK Metrology. Se compara esta técnica con otras técnicas de escaneo óptico, concretamente, luz estructurada con el dispositivo HP 3D Scan y EinScan, evidenciando los pros y contras del uso de estas herramientas.

Se comienza profundizando en las posibles formas de medida disponibles en la CMM (medida de puntos discretos y contacto continuo), y se lleva a cabo la reconstrucción mediante ingeniería inversa y programación paramétrica de una superficie perteneciente a una carrocería de coche.

Posteriormente, se escanea la misma superficie utilizando las técnicas ópticas mencionadas y se comparan las tolerancias obtenidas respecto al modelo de la máquina de medir por coordenadas.

Como parte de la verificación final, se realiza un análisis comparativo adicional utilizando una segunda pieza de referencia, un anillo patrón, para validar las tolerancias y la consistencia de las mediciones obtenidas con la CMM, HP 3D Scan y EinScan.

Palabras clave: Escaneo de superficies 3D, Máquina de Medir por Coordenadas (CMM), Software CAMIO, Ingeniería inversa, Escaneo óptico

RESUM

En aquest treball s'ha dut a terme un estudi detallat de l'escaneig de superfícies 3D utilitzant una sonda de palpació en una màquina de mesurar per coordenades (CMM), emprant el programari CAMIO de LK Metrology. Es compara aquesta tècnica amb altres tècniques d'escaneig òptic, concretament, llum estructurada amb els dispositius HP 3D Scan i EinScan, evidenciant els pros i contres de l'ús d'aquestes eines.

L'estudi comença aprofundint en les possibles formes de mesura disponibles en la CMM (mesura de punts discrets i contacte continu), i es du a terme la reconstrucció mitjançant enginyeria inversa i programació paramètrica d'una superfície pertanyent a una carrosseria de cotxe.

Posteriorment, s'escaneja la mateixa superfície utilitzant les tècniques òptiques esmentades i es comparen les toleràncies obtingudes respecte al model de la màquina de mesurar per coordenades.

Com a part de la verificació final, es realitza una anàlisi comparativa addicional utilitzant una segona peça de referència, un anell patró, per a validar les toleràncies i la consistència de les medicions obtingudes amb la CMM, HP 3D Scan i EinScan.

Paraules clau: Escaneig de superfícies 3D, Màquina de Mesurar per Coordenades (CMM), Programari CAMIO, Enginyeria inversa, Escaneig òptic

ABSTRACT

This work presents a detailed study of 3D surface scanning using a touch probe on a Coordinate Measuring Machine (CMM), utilizing the CAMIO software from LK Metrology. This technique is compared with other optical scanning techniques, specifically structured light using the HP 3D Scan and EinScan devices, highlighting the pros and cons of using these tools.

The study begins with an in-depth exploration of the possible measurement methods available on the CMM (discrete point measurement and continuous contact), followed by the reverse engineering reconstruction and parametric programming of a surface from a car body.

Subsequently, the same surface is scanned using the previously mentioned optical techniques, and the tolerances obtained are compared to those from the Coordinate Measuring Machine.

As part of the final verification, an additional comparative analysis is conducted using a second reference piece, a gauge ring, to validate the tolerances and consistency of the measurements obtained with the CMM, HP 3D Scan, and EinScan.

Keywords: 3D Surface Scanning, Coordinate Measuring Machine (CMM), CAMIO Software, Reverse Engineering, Optical Scanning

Índice de índices

Documentos contenidos en el TFM.....	iii
Índice de la memoria.....	iii
Índice del presupuesto	viii
Índice de planos	viii
Índice del pliego de condiciones	viii
Índice de Anexos	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xvi

Documentos contenidos en el TFM

MEMORIA.....	1
PRESUPUESTO	97
PLANOS.....	102
PLIEGO DE CONDICIONES.....	108
ANEXOS	117

Índice de la memoria

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Objetivo del trabajo.....	2
1.2. Introducción a las CMM	2
1.2.1. ¿Qué es una Máquina de Medición por Coordenadas?.....	2
1.2.2. Partes de una Máquina de Medición por Coordenadas.....	3
1.3. Introducción a CAMIO	4
1.3.1. ¿Qué es CAMIO?	4
1.3.2. Interfaz de CAMIO	4
1.3.3. Lenguaje de programación de CAMIO	5
1.3.4. Limitaciones del software.....	5
1.3.5. Manual básico de uso de CAMIO	6
1.4. Definiciones de tolerancias	6
1.4.1. Tolerancia de forma de superficie	6

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	
1.4.2. Tolerancia de planitud	7
1.4.3. Tolerancia de cilindridad.....	7
1.4.4. Tolerancia de paralelismo entre superficies.....	7
1.5. Relación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	8
CAPÍTULO 2. PRIMERA TOMA DE CONTACTO (ESCA NEO EN CMM CON MODELO CAD)	9
2.1. Objetivo de la primera toma de contacto	9
2.2. Modelo CAD de la pieza	9
2.3. Diseño y fabricación del soporte	10
2.3.1. Necesidad de un soporte	10
2.3.2. Diseño del soporte	10
2.3.3. Fabricación del soporte	11
2.3.4. Primeros pasos para la verificación de la geometría.....	13
2.3.5. Externalización del sistema de coordenadas “cero pieza”	14
2.4. Medida final de los puntos.....	16
CAPÍTULO 3. ESCA NEO EN CMM DE CURVAS Y SUPERFICIES (CON MODELO CAD).....	17
3.1. Escaneo de curvas	17
3.1.1. Escaneo de curvas por puntos.....	17
3.1.2. Escaneo de curvas por barrido	18
3.1.2.1. Escaneo por barrido “ <i>Online Teach</i> ”	18
3.1.2.2. Escaneo por barrido con línea prediseñada.....	19
3.1.2.3. Problemas detectados al escanear por barrido en la pieza de carrocería	19
3.2. Escaneo de superficies	20
3.2.1. Problema del escaneo por barrido de superficies en Camio	20
3.2.2. Método alternativo para el escaneo de superficies (palpado de puntos)	23
3.2.3. Alternativa para el escaneo por barrido de superficies empleando el escaneo por barrido de curvas múltiples veces.....	23
3.2.4. Factor “disponibilidad de modelo CAD” para el escaneo de superficies	24
CAPÍTULO 4. ESCA NEO EN CMM POR PUNTOS (SIN MODELO CAD)	26
4.1. Planteamiento del problema.....	26
4.2. Procedimiento del método.....	26
4.2.1. Paso 1. Construcción del sistema de coordenadas “cero pieza”	26
4.2.2. Paso 2. Palpado de puntos de forma manual sobre la superficie	27

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	
4.2.3. Paso 3. Reconstrucción de una superficie de “baja calidad” para disponer de un modelo CAD inicial	28
4.2.4. Paso 4. Importación de la superficie de “baja calidad” en Camio para usarla como modelo CAD.....	29
4.2.5. Paso 5 Generación de puntos sobre la superficie para el palpado automático	29
4.2.6. Paso 6. Reconstrucción de la superficie de “alta calidad”	30
CAPÍTULO 5. ESCANEO EN CMM MEDIANTE ALGORITMO DE BARRIDO POR LÍNEAS (SIN MODELO CAD).....	31
5.1. Necesidad del algoritmo de escaneo	31
5.2. Pasos previos para el desarrollo del algoritmo	31
5.3. Algoritmo de barrido	31
5.3.1. Funcionamiento del algoritmo	31
5.3.2. Limitaciones del algoritmo	37
5.4. Combinación de diferentes escaneos realizados con el algoritmo	38
5.4.1. Reconstrucción de la superficie.....	38
5.4.2. Reconstrucción de la pieza del sistema de coordenadas	39
CAPÍTULO 6. ESCANEO MEDIANTE EINSCAN PRO 2X	40
6.1. ¿Qué es EinScan Pro 2X?	40
6.2. Escaneo de la pieza de carrocería con Einscan.....	41
6.2.1. Procedimiento de escaneo	41
6.2.2. Parámetros, interfaz y resultados de escaneo	42
6.3. Pros y Contras de EinScan Pro 2X	43
CAPÍTULO 7. ESCANEO MEDIANTE HP 3D Scan.....	44
7.1. ¿Qué es HP 3D Scan?.....	44
7.2. Escaneo de la pieza de carrocería mediante HP 3D Scan	45
7.2.1. Proceso de calibración y escaneo.....	45
7.2.2. Resultado del escaneo.....	46
7.3. Pros y contras de HP 3D Scan	47
CAPÍTULO 8. ANILLO PATRÓN (SEGUNDO SISTEMA)	48
8.1. Introducción	48
8.2. Escaneo del anillo patrón en la CMM.....	49
8.2.1. Problema de alineamiento del anillo patrón en la CMM	49
8.2.2. Tolerancias del anillo patrón de la CMM	50

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

8.2.2.1. Análisis de Repetibilidad	51
8.2.2.2. Conclusión	51
8.3. Posiciones de escaneo del anillo patrón para HP 3D Scan y EinScan Pro.....	51
8.3.1. Posición 1 Medida de cilindridad.....	51
8.3.2. Posición 2 Medida de planitud y paralelismo	52
CAPÍTULO 9. Verificación de la precisión de los diferentes sistemas de escaneo	53
9.1. Introducción	53
9.2. Modificación del sistema de coordenadas de los escaneos de HP 3D Scan y EinScan para la pieza de carrocería	54
9.2.1. Procedimiento para la modificación del sistema de coordenadas de los escaneos de HP 3D Scan y EinScan.....	54
9.2.2. Error en la reconstrucción de la pieza para la ubicación del sistema de coordenadas	56
9.3. Anillo Patrón	59
9.3.1. Verificación de la consistencia dimensional de la CMM en el anillo patrón	59
9.3.2. Tolerancias de la CMM en el escaneo del anillo patrón	60
9.3.3. Tolerancias de HP 3D Scan en el escaneo del anillo patrón	60
9.3.3.1. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad	61
9.3.3.2. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	62
9.3.3.3. Escaneo 2, posición 1 (2.1.). Tolerancia de cilindridad	63
9.3.3.4. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	64
9.3.3.5. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad	66
9.3.3.6. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	67
9.3.3.7. Resumen de tolerancias obtenidas con el escáner HP 3D Scan para el anillo patrón	68
9.3.3.8. Evaluación de la tolerancia de cilindridad	69
9.3.3.9. Evaluación de la tolerancia de planitud de la cara 1	69
9.3.3.10. Evaluación de la tolerancia de paralelismo	69
9.3.4. Tolerancias de EinScan Pro 2X en el escaneo del anillo patrón.....	69
9.3.4.1. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad	70
9.3.4.2. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	70
9.3.4.3. Escaneo 2, posición 1 (2.1.). Tolerancia de cilindridad	72
9.3.4.4. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	73
9.3.4.5. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad	75

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

9.3.4.6. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	76
9.3.4.7. Resumen de tolerancias obtenidas con el escáner EinScan para el anillo patrón	77
9.3.4.8. Evaluación de la tolerancia de cilíndricidad	78
9.3.4.9. Evaluación de la tolerancia de planitud de la cara 1	78
9.3.4.10. Evaluación de la tolerancia de paralelismo	78
9.3.5. Comparación de las tolerancias de HP 3D Scan, EinScan y CMM en el escaneo del anillo patrón	79
9.4. Pieza de carrocería	80
9.4.1. Medida de puntos con la CMM en la superficie de la pieza de carrocería	80
9.4.2. Reconstrucción de la superficie para comparación con otros sistemas.....	80
9.4.3. Tolerancias de HP 3D Scan en el escaneo de la pieza de carrocería.....	81
9.4.3.1. Escaneo 1 de la pieza de carrocería con HP 3D Scan	83
9.4.3.2. Escaneo 2 de la pieza de carrocería con HP 3D Scan	84
9.4.3.3. Escaneo 3 de la pieza de carrocería con HP 3D Scan	86
9.4.3.4. Evaluación del escáner HP 3D Scan con el método de las diferencias puntuales	87
9.4.3.5. Evaluación del escáner HP 3D Scan a partir de la tolerancia de forma de superficie	88
9.4.4. Tolerancias de EinScan Pro 2X en el escaneo de la pieza de carrocería	88
9.4.4.1. Condiciones de mallado	88
9.4.4.2. Escaneo 1 de la pieza de carrocería con EinScan	89
9.4.4.3. Escaneo 2 de la pieza de carrocería con EinScan	90
9.4.4.4. Escaneo 3 de la pieza de carrocería con EinScan	91
9.4.4.5. Evaluación del escáner EinScan con el método de las diferencias puntuales	92
9.4.4.6. Evaluación del escáner EinScan a partir de la tolerancia de forma de superficie	93
9.4.5. Comparación de las tolerancias de HP 3D Scan, EinScan en el escaneo de la pieza de carrocería	93
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES	95
CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA.....	96

Índice del presupuesto

P.1. Equipos utilizados, consumibles y energía.....	98
P.1.1. Amortización de Equipos	98
P.1.2. Consumibles.....	98
P.1.3. Uso de Software.....	99
P.1.3. Energía	100
P.2. Mano de Obra	100
P.3. Coste total del proyecto.....	101

Índice de planos

PLANO 1. Pieza de carrocería	103
PLANO 2. Plano de la parte superior del soporte.....	104
PLANO 3. Plano de la parte inferior del soporte	105
PLANO 4. Soporte del sistema de coordenadas.....	106
PLANO 5. Anillo Patrón.....	107

Índice del pliego de condiciones

PC.1. Objeto del pliego de condiciones.....	109
PC.2. Documentos que definen el proyecto.....	109
PC.3. Condiciones Generales.....	109
PC.3.1. Ejecución del proyecto	109
PC.3.2. Condiciones facultativas.....	110
PC.3.2.1. Obligaciones y derechos de la empresa ejecutora.....	110
PC.3.2.2. Obligaciones y derechos de la empresa cliente	110
PC.3.2.3. Plazos de Ejecución del Proyecto	111
PC.3.3. Condiciones económicas.....	111
PC.3.3.1. Garantía de Cumplimiento	111
PC.3.3.2. Ajustes de Precios	111
PC.3.3.3. Mejoras y Cambios.....	111
PC.3.3.4. Pago del Proyecto.....	111
PC.3.4. Condiciones Legales	111

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	
PC.3.4.1. Tipo de Contrato	111
PC.3.4.2. Resolución de Conflictos y Jurisdicción Competente	112
PC.3.4.3. Responsabilidades de la Empresa Desarrolladora	112
PC.3.4.4. Terminación del Contrato	112
PC.4. Condiciones Técnicas	113
PC.4.1. Especificaciones informáticas	113
PC.4.1.1. Especificaciones de Hardware	113
PC.4.1.2. Software empleado	113
PC.4.2 Aspectos Técnicos y Operativos	113
PC.4.2.1. Gestión y manejo de archivos CAD	114
PC.4.2.2. Equipos empleados	114
PC.4.2.3. Características de los Escaneos	114
PC.4.2.4. Material del Soporte	114
PC.5. Relación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	115
PC.5.1. ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura	115
PC.5.2. ODS 12: Producción y Consumo Responsables	115
PC.5.3. ODS 13: Acción por el Clima	115

Índice de Anexos

ANEXO A. MANUAL BÁSICO DE USO DE CAMIO	118
A.1. Aspectos generales y puesta en marcha	118
A.1.1. Procedimiento de trabajo	118
A.1.2. Recomendaciones para hacer copias de programas	118
A.1.3. Establecer una ubicación de una pieza en la máquina	118
A.1.4. Importación de los palpadores calibrados	119
A.1.5. Cargar el palpador adecuado	120
A.1.6. Definición de origen de la pieza (“cero pieza”). Método <i>Plane-Line-Point Alignment</i>	121
A.2. Medición de geometría mediante “Canned Cycles”	126
A.2.1. Medición de un círculo (modo automático)	126
A.3. Verificación de tolerancias	128
A.3.1. Verificación de tolerancia de paralelismo	128

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

A.3.2. Tolerancia de distancia entre 2 caras	133
A.3.3. Tolerancia de concentricidad (coaxialidad) entre 2 cilindros.....	135
A.3.4. Tolerancia de forma de superficie.....	140
A.3.5. Medición de una superficie mediante generación de puntos por rejilla	142
A.4. Escaneo por barrido	145
A.4.1. Escaneo por el método “Online Teach”	145
A.4.2. Escaneo por selección de línea prediseñada	146
A.5. Editar el Report	151
A.6. Exportación de nube de puntos	152
A.7. Programación Avanzada.....	153
A.7.1. Declaración de variables (DECLARE)	153
A.7.2. Asignación de valor a variables (ASSIGN).....	153
A.7.3. Asignación de valor a variables a partir de la obtención del valor de otro sitio (OBTAIN)	154
A.7.4. Monitorizar el valor de variables (WATCH)	157
A.7.5. Bucle for (DO).....	158
A.7.6. Utilización del Prompt para pedir valores al usuario	160
A.7.7. Texto de output para la terminal	161
ANEXO B. PROCEDIMIENTO DE ESCANEO POR PUNTOS (SIN MODELO CAD).....	163
B.1. Paso 1. Establecer el origen de coordenadas de la pieza.....	163
B.2. Paso 2. Realizar toques de forma manual por la superficie a medir y exportar la nube de puntos.....	165
B.3. Paso 3. Reconstruir en Catia la superficie en bruto que contiene los puntos para poder importarla en Camio como un modelo CAD	167
B.4. Paso 4. Importar en Camio la superficie reconstruida en bruto	169
B.5. Paso 5. Generar toques de palpado sobre la superficie importada para que la máquina mida los puntos.	170
B.6. Paso 6. Reconstruir en Catia una segunda superficie más precisa.....	172
ANEXO C. CÓDIGOS DEFINITIVOS DE CAMIO	173
C.1. Código del algoritmo para el barrido por líneas (sin modelo CAD).....	173
C.2. Código para el escaneo del anillo patrón	182
ANEXO D. CÓDIGO DE MATLAB PARA LA APLICACIÓN DEL CRITERIO DE RECHAZO DE CHAUVENET EN EL ESPACIO TRIDIMENSIONAL (ORTOEDRO DE CHAUVENET).....	195
ANEXO E. VERIFICACIÓN DE CONSISTENCIA DIMENSIONAL DE LA CMM	198

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

E.1. Verificación de la consistencia dimensional de la CMM en el anillo patrón	198
E.1.1. Criterio de rechazo de Chauvenet	200
E.1.2. Resumen de las mediciones	201
E.2. Medida de puntos con la CMM en la superficie de la pieza de carrocería.....	203
ANEXO F. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE DIFERENCIAS ENTRE CAD Y ESCANEO EN GOM INSPECT	205
F.1. Paso 1. Conocer el valor de las coordenadas de los puntos a evaluar.....	205
F.2. Paso 2. Ubicar los puntos deseados en el fichero “CAD” de GOM-Inspect	206
F.3. Paso 3. Crear las distancias	207
F.4. Paso 4. Visualización de las distancias en el modelo	208

Índice de figuras

Figura 1. Máquina de Medir por Coordenadas. Fuente: (Keyence, Máquinas de Medición por Coordenadas, n.d.)	3
Figura 2. Máquina de medir por coordenadas del laboratorio de la UPV.....	3
Figura 3. Interfaz de CAMIO	4
Figura 4. Escaneo de superficies mediante barrido que debería hacer CAMIO.....	6
Figura 5. Ejemplo de tolerancia de forma de superficie. Fuente: (GD&T Basics , 2014).....	6
Figura 6. Ejemplo de tolerancia de planitud. Fuente: (Keyence, Fundamentos de GD&T, n.d.) ...	7
Figura 7. Ejemplo de tolerancia de cilindridad. Fuente: (Keyence, Fundamentos de GD&T, n.d.)	7
Figura 8. Ejemplo de tolerancia de paralelismo entre superficies. Fuente: (Machine MFG, 2023)	7
Figura 9. Pieza de la carrocería de un automóvil Ford	9
Figura 10. Modelo CAD de la pieza de carrocería de un automóvil Ford	10
Figura 11. Zona de apoyo de la pieza	10
Figura 12. Modelo CAD del soporte de la pieza	11
Figura 13. Impresora 3D Creality (izquierda) y Blackbelt (derecha) en ángulo de 45º	11
Figura 14. Procedimiento de impresión a 45º.....	12
Figura 15. Problema de impresión en vacío al soltarse la primera línea de material	12
Figura 16. Creación del <i>Brim</i>	12
Figura 17. Soporte para la pieza impreso en PLA.....	13
Figura 18. Primera propuesta de sistema de coordenadas “cero pieza”	14

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Figura 19. Caras a palpar para la creación de la primera propuesta de sistema de coordenadas “cero pieza”	14
Figura 20. Representación del conjunto con la pieza adicional (en amarillo) para ubicar externamente un sistema de coordenadas.....	15
Figura 21. Conjunto soporte-pieza con elemento adicional para ubicar el sistema de coordenadas	15
Figura 22. Puntos a palpar en la primera toma de contacto	16
Figura 23. Pieza empleada para el estudio del escaneo de curvas	17
Figura 24. Escaneo de curvas por puntos.....	18
Figura 25. Curva generada mediante un corte con plano	19
Figura 26. Toques generados para el escaneo por barrido de una curva.....	19
Figura 27. Trayectoria de la sonda para el escaneo por barrido de una curva prediseñada.....	19
Figura 28. Escaneo por barrido ascendente vs descendente	20
Figura 29. Trayectoria de escaneo para barrido de superficie (flechas rojas).....	21
Figura 30. Planos de escaneo con normal +Y	21
Figura 31. Camino seguido (morado) vs camino deseado (amarillo) al barrer una superficie ...	22
Figura 32. Plano de escaneo con normal +Z.....	22
Figura 33. Medida de una superficie mediante palpado de puntos por rejilla	23
Figura 34. Cortes realizados de forma manual sobre una pieza para realizar el escaneo por barrido de curvas	24
Figura 35. Generación de toques para el barrido de una curva individual	24
Figura 36. Palpado de puntos por rejilla con modelo CAD para escaneo de superficies	26
Figura 37. Sistema de coordenadas “cero pieza”	27
Figura 38. Ubicación propuesta para los puntos a palpar de forma manual	27
Figura 39. Visualización de los puntos palpados en Camio sin modelo CAD	27
Figura 40. Eliminación de los puntos del sistema de coordenadas.....	28
Figura 41. Superficie de “baja calidad” creada a partir de la malla	28
Figura 42. Importación de la superficie de “baja calidad” como modelo CAD en Camio	29
Figura 43. Generación de puntos mediante rejilla para el palpado automático.....	29
Figura 44. Superficie de “alta calidad” reconstruida	30
Figura 45. Definición de la sección de superficie por 9 puntos para el algoritmo de escaneo ...	32
Figura 46. Mensaje de alerta para palpar los puntos en el orden correcto	32
Figura 47. Variables extraídas de los puntos 1, 2 y 3.....	32

Figura 48. Mensaje de aviso para invitar al operario a que lleve la sonda a una posición segura	33
Figura 49. Ventana emergente en la que se solicita al operario la separación entre líneas para el barrido	33
Figura 50. Ventana emergente en la que se pide el valor de la distancia de seguridad	33
Figura 51. Definición de los puntos de iteración para el algoritmo	34
Figura 52. Tramos para la consideración de la coordenada Z	34
Figura 53. Aproximación lineal para el cálculo de la coordenada Z del punto de iteración de comienzo.	35
Figura 54. Obtención de la ecuación que define los valores de Z_{I1}	35
Figura 55. Nube de puntos de barridos con separación de 1mm	37
Figura 56. Zoom a una de las esquinas de la nube de puntos de barridos con separación de 1mm	37
Figura 57. Nube de puntos individuales parte izquierda y parte derecha	38
Figura 58. Nube de puntos del contorno	38
Figura 59. Nubes de puntos de diferentes escaneos realizados con el mismo sistema de coordenadas	39
Figura 60. Malla de la superficie obtenida con diferentes nubes de puntos	39
Figura 61. Geometría del prisma para ubicar el sistema de coordenadas	39
Figura 62. Escáner EinScan Pro 2X (Top3DShop, 2020)	40
Figura 63. Complementos de EinScan Pro (Top3DShop, 2020)	40
Figura 64. Pieza con la zona a escanear recubierta con polvos de quitamanchas	41
Figura 65. Escaneo manual con EinScan	41
Figura 66. Interfaz del programa de escaneo para el escáner EinScan	42
Figura 67. Patrones proyectados en la pieza en el escáner de luz estructurada mediante HP 3D Scan	44
Figura 68. Estructura del escáner HP 3D Scan	45
Figura 69. Patrones de calibración del escáner HP 3D Scan	45
Figura 70. Proceso de fusión de los escaneos	46
Figura 71. Resultado de escaneo de la pieza de carrocería en el escáner HP 3D Scan	46
Figura 72. Anillo Patrón	48
Figura 73. Posición del anillo patrón en la CMM	49
Figura 74. Problema de alineamiento del anillo patrón en la máquina	49
Figura 75. Escuadras utilizadas para alinear correctamente el anillo patrón	50

Figura 76. Posición del anillo patrón para la medida de cilindridad.....	52
Figura 77. Posición del anillo patrón para la medida de planitud y paralelismo.....	52
Figura 78. Diferencia entre precisión y exactitud.....	54
Figura 79. Reconocimiento de planos en Catia	55
Figura 80. Extensión y recorte de los planos en Catia.....	55
Figura 81. Cambio del origen de coordenadas al lugar deseado mediante PTC Creo.....	56
Figura 82. Comparación del sistema de coordenadas nuevo con el original	56
Figura 83. Ángulos entre los planos reconocidos.....	57
Figura 84. Sistemas de coordenadas a alinear del modelo referencia y el escaneo	57
Figura 85. <i>Offset</i> angular debido a la incorrecta reconstrucción	58
Figura 86. Error de posición de la superficie	58
Figura 87. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner HP 3D Scan	61
Figura 88. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 1.1. HP 3D Scan	61
Figura 89. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	62
Figura 90. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 1.2. HP 3D Scan	62
Figura 91. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 1.2. HP 3D Scan	63
Figura 92. Escaneo 2, posición 1 (2.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner HP 3D Scan	63
Figura 93. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 2.1. HP 3D Scan	64
Figura 94. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	64
Figura 95. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 2.2. HP 3D Scan	65
Figura 96. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 2.2. HP 3D Scan	65
Figura 97. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner HP 3D Scan	66
Figura 98. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 3.1. HP 3D Scan	66
Figura 99. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	67
Figura 100. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 3.2. HP 3D Scan	67
Figura 101. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 3.2. HP 3D Scan	68

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Figura 102. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner EinScan	70
Figura 103. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 1.1. EinScan	70
Figura 104. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	71
Figura 105. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 1.2. EinScan	71
Figura 106. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 1.2. EinScan	72
Figura 107. Escaneo 2, posición 1 (2.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner EinScan	72
Figura 108. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 2.1. EinScan	73
Figura 109. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	73
Figura 110. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 2.2. EinScan	74
Figura 111. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 2.2. EinScan	74
Figura 112. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner EinScan	75
Figura 113. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 3.1. EinScan	75
Figura 114. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo	76
Figura 115. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 3.2. EinScan	76
Figura 116. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 3.2. EinScan	77
Figura 117. Superficie reconstruida a partir de la nube de puntos.....	80
Figura 118. Problema de alineación por sistemas de coordenadas.....	81
Figura 119. Problema de alineación por sistemas de coordenadas. Visualización de distancias	82
Figura 120. Ajuste de superficies en GOM-Inspect con <i>best-fit</i>	82
Figura 121. Ubicación de los puntos seleccionados del escaneo de la CMM para comparación	83
Figura 122. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 1 realizado mediante HP 3D Scan.....	83
Figura 123. Distancias entre el escaneo 1 de la pieza de carrocería realizado mediante HP 3D Scan y la superficie de referencia	84
Figura 124. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 2 realizado mediante HP 3D Scan.....	85
Figura 125. Distancias entre el escaneo 2 de la pieza de carrocería realizado mediante HP 3D Scan y la superficie de referencia	85
Figura 126. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 3 realizado mediante HP 3D Scan.....	86

Figura 127. Distancias entre el escaneo 3 de la pieza de carrocería realizado mediante HP 3D Scan y la superficie de referencia	86
Figura 128. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 1 realizado mediante EinScan	89
Figura 129. Distancias entre el escaneo 1 de la pieza de carrocería realizado mediante EinScan y la superficie de referencia	89
Figura 130. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 2 realizado mediante EinScan	90
Figura 131. Distancias entre el escaneo 2 de la pieza de carrocería realizado mediante EinScan y la superficie de referencia	90
Figura 132. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 3 realizado mediante EinScan	91
Figura 133. Distancias entre el escaneo 3 de la pieza de carrocería realizado mediante EinScan y la superficie de referencia	91

Índice de tablas

Tabla 1. Tolerancias del anillo patrón calculadas con las mediciones en CMM	50
Tabla 2. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto en el anillo patrón	59
Tabla 3. Intervalos de aceptación de Chauvenet para las medidas del anillo patrón en CMM ..	59
Tabla 4. Verificación del criterio de Chauvenet para cada medida de cada punto. Anillo Patrón	60
Tabla 5. Valores máximos de las tolerancias de cilindridad, planitud y paralelismo obtenidas con la CMM en el anillo patrón	60
Tabla 6. Resumen de tolerancias de los escaneos realizados con HP 3D Scan para el anillo patrón	68
Tabla 7. Resumen de tolerancias de los escaneos realizados con EinScan para el anillo patrón	77
Tabla 8. Comparación de las tolerancias utilizando la CMM, el escáner HP 3D Scan y el escáner EinScan	79
Tabla 9. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto	80
Tabla 10. Coordenadas de los puntos palpados en la CMM que se van a buscar en los escaneos realizados con el escáner HP	82
Tabla 11. Desviaciones para cada punto en cada escaneo en el escáner HP	87
Tabla 12. Medias y desviaciones típicas del valor de la desviación de cada punto	87
Tabla 13. Resumen de las tolerancias de forma de superficie obtenidas con el escáner HP 3D Scan para la pieza de carrocería	88
Tabla 14. Desviaciones para cada punto en cada escaneo en el escáner EinScan	92

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Tabla 15. Medias y desviaciones típicas del valor de la desviación de cada punto.....	92
Tabla 16. Resumen de las tolerancias de forma de superficie obtenidas con el escáner HP 3D Scan para la pieza de carrocería	93
Tabla 17. Tolerancias de forma de superficie de HP 3D Scan y EinScan en el escaneo de la pieza de carrocería	93
Tabla 18. Coste total de amortización de equipos	98
Tabla 19. Coste volumétrico del filamento.....	99
Tabla 20. Coste total del material para impresión del soporte	99
Tabla 21. Otros consumibles (VARIOS)	99
Tabla 22. Coste por uso de software	100
Tabla 23. Coste de energía asociado al uso de los equipos.....	100
Tabla 24. Coste de la mano de obra del proyecto	101
Tabla 25. Desglose de los gastos del proyecto	101
Tabla 26. Porcentaje de beneficio e IVA	101
Tabla 27. Coste total del proyecto	101
Tabla 28. Valores de la función OBTAIN con su significado	156
Tabla 29. Coordenadas de los puntos en la medida 1. Anillo Patrón	198
Tabla 30. Coordenadas de los puntos en la medida 2. Anillo Patrón	198
Tabla 31. Coordenadas de los puntos en la medida 3. Anillo Patrón	198
Tabla 32. Coordenadas de los puntos en la medida 4. Anillo Patrón	198
Tabla 33. Coordenadas de los puntos en la medida 5. Anillo Patrón	199
Tabla 34. Coordenadas de los puntos en la medida 6. Anillo Patrón	199
Tabla 35. Coordenadas de los puntos en la medida 7. Anillo Patrón	199
Tabla 36. Coordenadas de los puntos en la medida 8. Anillo Patrón	199
Tabla 37. Coordenadas de los puntos en la medida 9. Anillo Patrón	199
Tabla 38. Coordenadas de los puntos en la medida 10. Anillo Patrón	199
Tabla 39. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto en el anillo patrón	200
Tabla 40. Intervalos de aceptación de Chauvenet para las medidas del anillo patrón en CMM	201
Tabla 41. Verificación del criterio de Chauvenet para cada medida de cada punto. Anillo Patrón	201
Tabla 42. Valores de las medias y desviaciones típicas de los puntos tras aplicar el algoritmo del ortoedro de Chauvenet	202

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Tabla 43. Coordenadas de los puntos en la medida 1	203
Tabla 44. Coordenadas de los puntos en la medida 2	203
Tabla 45. Coordenadas de los puntos en la medida 3	203
Tabla 46. Coordenadas de los puntos en la medida 4	203
Tabla 47. Coordenadas de los puntos en la medida 5	203
Tabla 48. Coordenadas de los puntos en la medida 6	203
Tabla 49. Coordenadas de los puntos en la medida 7	204
Tabla 50. Coordenadas de los puntos en la medida 8	204
Tabla 51. Coordenadas de los puntos en la medida 9	204
Tabla 52. Coordenadas de los puntos en la medida 10	204
Tabla 53. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto.....	204

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo del trabajo

El primer objetivo de este trabajo consiste en desarrollar un programa en CAMIO que permita realizar el escaneo de superficies 3D mediante un algoritmo de medición por barrido en una máquina de medir por coordenadas (CMM) acotando el área de escaneo y utilizando mensajes de texto en pantalla para guiar el proceso. Se debe obtener la nube de puntos de la pieza escaneada y realizar un filtrado de la información procedente de CAMIO. Adicionalmente, se debe construir la superficie mediante ingeniería inversa, viendo los principales parámetros que influyen.

Se debe comparar tolerancias del escaneo por contacto en la CMM con dos piezas diferentes.

Para conseguir esto, es necesario estudiar las diferentes formas de utilizar la CMM para maximizar su potencial en el escaneo de superficies. Esto incluye la familiarización con el software de medición y la utilización del lenguaje de programación DMIS para un escaneo avanzado. Se redactará un pequeño manual de uso que puede servir en el futuro para replicar los ensayos. Este manual se ubicará en los anexos.

Posteriormente, se llevará a cabo una verificación de las tolerancias que ofrecen otros sistemas de escaneo óptico, como HP 3D Scan y EinScan, evidenciando los pros y contras de cada una de las técnicas. Esta comparación se realizará tomando como referencia las mediciones obtenidas a través de la CMM, debido a su alta precisión.

1.2. Introducción a las CMM

1.2.1. ¿Qué es una Máquina de Medición por Coordenadas?

Una máquina de medición por coordenadas (CMM, por sus siglas en inglés) es un equipo de medición directa en el que el instrumento se desplaza sobre el objeto a medir. A través de la recopilación de datos y su procesamiento con un software especializado, se obtienen las dimensiones del objeto en cuestión. (Quiminet, 2015)

Para llevar a cabo la medición, el objeto se fija en una mesa horizontal. La CMM utiliza un palpador de alta precisión con amplificación electrónica para recorrer el objeto, eliminando así los errores causados por la inercia o el rozamiento que se presentan en los sistemas de amplificación mecánica. (Quiminet, 2015)

Para obtener mediciones precisas, es crucial que el objeto se ajuste a la temperatura ambiente del laboratorio de metrología, generalmente establecida en 20°C, a fin de evitar errores debido a la expansión térmica. (Keyence, Máquinas de Medición por Coordenadas, n.d.)

1.2.2. Partes de una Máquina de Medición por Coordenadas

Las partes que componen una CMM son las siguientes (ver Figura 1):

- A) **Puente móvil.** Es la estructura que se desplaza a lo largo de los ejes de la máquina para posicionar la sonda de palpado en el espacio de medición. En las CMM de puente, este componente se mueve sobre la mesa de medición y puede llevar la sonda a cualquier punto dentro del volumen de trabajo de la máquina. (Creaform, 2021)
- B) **Sonda de palpado.** Es el dispositivo que hace contacto directo con la pieza a medir. Su función es recoger los puntos de datos de las superficies del objeto, que luego se utilizan para definir las dimensiones y la geometría del mismo. (RapidDirect, 2021)
- C) **Mesa de medición.** Es la superficie sobre la cual se coloca el objeto a inspeccionar. Debe ser extremadamente estable y precisa para no introducir errores en las mediciones. En muchas CMM, la mesa está hecha de granito debido a su durabilidad y estabilidad dimensional. (Creaform, 2021)
- D) **Sistema de control.** Incluye el software y el hardware que dirige y controla los movimientos de la máquina, así como el procesamiento de los datos recogidos por la sonda. Este sistema es el cerebro de la CMM, ya que interpreta los datos y los convierte en información útil para el análisis de la pieza. (Creaform, 2021)

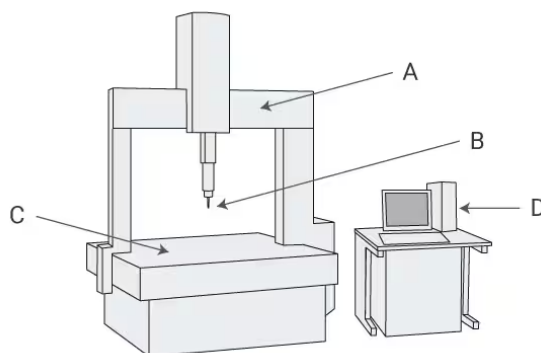


Figura 1. Máquina de Medir por Coordenadas. Fuente: (Keyence, Máquinas de Medición por Coordenadas, n.d.)

A continuación, se muestra una imagen de la CMM del laboratorio de metrología de la UPV con la cual se ha realizado este trabajo de fin de máster (ver Figura 2)



Figura 2. Máquina de medir por coordenadas del laboratorio de la UPV

1.3. Introducción a CAMIO

1.3.1. ¿Qué es CAMIO?

CAMIO es un software de metrología de sensores múltiples para Máquinas de Medición por Coordenadas (CMM) desarrollado por la empresa LK Metrology. Este software lo emplean muchos de los fabricantes más grandes del mundo debido a su relativa facilidad de uso y eficacia.

La versión de la que se dispone para trabajar es la 8.6.

1.3.2. Interfaz de CAMIO

Su interfaz se puede ver en la Figura 3. Esta consta de varias partes:

1. **Barra de herramientas**, donde se encuentran opciones para controlar la máquina, realizar posicionamientos de sistemas de coordenadas, controlar las sondas de palpado, construir elementos geométricos sobre el modelo, crear tolerancias, opciones de programación avanzadas, y edición del informe de resultados.
2. **Ventana de código**. En esta ventana se visualiza el código del programa generado, donde se puede realizar modificaciones sobre el mismo si se desea, para tener un control más avanzado.
3. **Ventana de visualización de modelo-máquina-operación**. En esta ventana se visualiza el modelo, la máquina, y todas las operaciones, incluyendo las entidades geométricas que se crean, tales como puntos, superficies, planos, cilindros, etc.
4. **Ventana de sensores y explorador de entidades**. Desde esta ventana se puede hacer la selección desde la lista de sensores, para que el programa configure el sensor correcto que se va a emplear en las operaciones de inspección. Por otro lado, se dispone de una lista de entidades geométricas que se crean al hacer las inspecciones, tales como puntos, círculos, planos, cilindros, líneas, conos, etc.

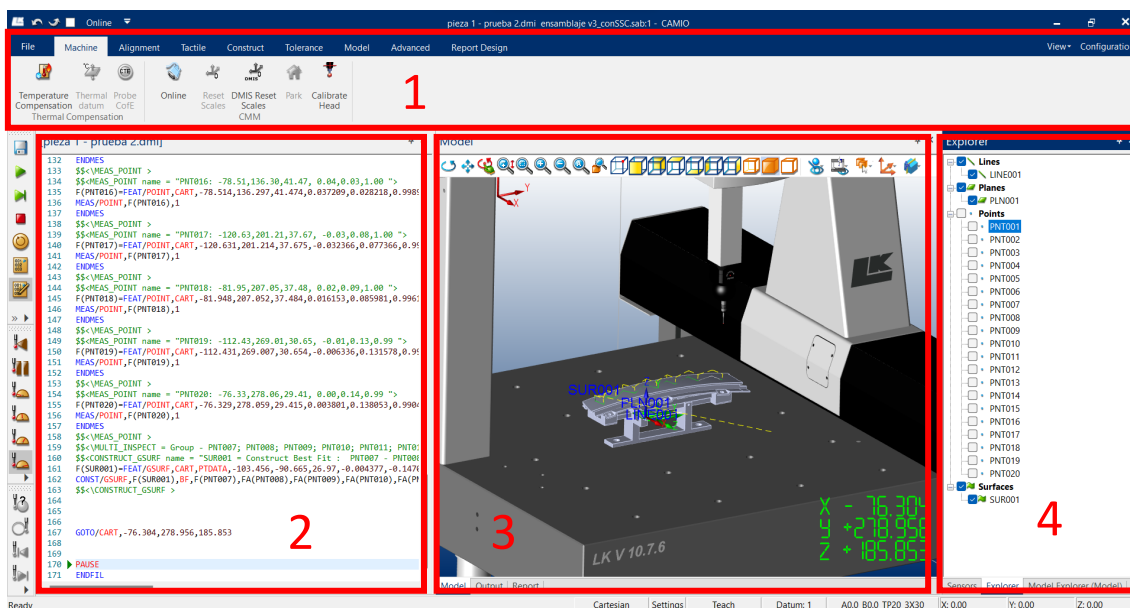


Figura 3. Interfaz de CAMIO

1.3.3. Lenguaje de programación de CAMIO

El lenguaje de programación que utiliza CAMIO para controlar la máquina, a diferencia de otros sistemas de control numérico que utilizan códigos G y M, se llama DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard) y es un lenguaje de programación genérico utilizado para controlar máquinas de medición por coordenadas (CMM).

A modo de ejemplo, se incluye a continuación varias líneas de código para definir las coordenadas de un punto, definición de variables y extracción de coordenadas de un punto en el espacio.

```
$$ DENOMINACIÓN DEL PUNTO 1
F(PNT001)=FEAT/POINT,CART,150,50,25,0,0,1

$$ DECLARACIÓN DE VARIABLES
DECL/LOCAL,REAL,X1,Y1,Z1

$$ EXTRACCIÓN DE LAS COORDENADAS X,Y,Z DEL PUNTO 1
X1=OBTAIN/F(PNT001),3
Y1=OBTAIN/F(PNT001),4
Z1=OBTAIN/F(PNT001),5
```

Nótese que, el código, aunque es aparentemente sencillo, tiene sus dificultades, ya que, por ejemplo, para definir un punto en el espacio, no basta con definir sus las coordenadas cartesianas, sino que adicionalmente hay que incluir el vector normal de palpado, que determina la dirección desde la que se palpa el punto con la sonda.

Por otro lado, teniendo un punto PNT001, para extraer sus coordenadas X, Y, Z, el código no indica directamente los parámetros de X, Y y Z, sino que indica 3, 4 y 5, lo cual es poco intuitivo.

Para profundizar más en el lenguaje de programación, puede consultarse el apartado **“A.7. Programación Avanzada”** del **“ANEXO A. MANUAL BÁSICO DE USO DE CAMIO”**.

1.3.4. Limitaciones del software

Se ha visto también que este software, a pesar de ser relativamente sencillo de utilizar, tiene sus limitaciones. Sobre todo, en este trabajo, la limitación principal que se ha observado es que, CAMIO aparentemente posee la capacidad de medir superficies mediante barrido (contacto continuo) de diferentes líneas separadas una distancia, lo cual puede representarse virtualmente (ver Figura 4). Sin embargo, debido al estado de desarrollo de los actuales algoritmos por parte del fabricante, no funciona de forma completa y correcta, como debería. Por lo que actualmente, para medir superficies por barrido, es el usuario quien tiene que desarrollar sus propios algoritmos.

Se ha tenido ocasión de probar la versión 8.7, y siguen sin haber completado el desarrollo de los algoritmos para medir superficies por barrido.

En la Figura 4 se ha representado el proceso de escaneo de superficie mediante barrido que teóricamente CAMIO debería hacer. El proceso consistiría en que la sonda siga el recorrido marcado con las flechas rojas tocando la pieza de forma continua sin separarse de ella hasta llegar al punto final. Guardando los puntos de contacto intermedios, según la cadencia especificada.

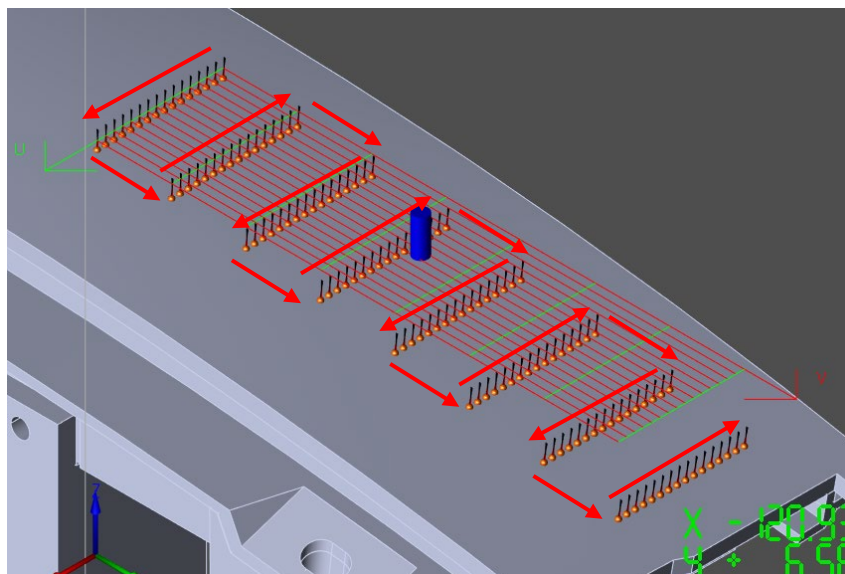


Figura 4. Escaneo de superficies mediante barrido que debería hacer CAMIO

1.3.5. Manual básico de uso de CAMIO

Para poder llevar a cabo todo el trabajo que se ha realizado, ha sido necesario aprender las funcionalidades que ofrece CAMIO. En el proceso, se ha elaborado un manual básico de uso que recorre acciones que van desde la configuración básica y verificación de tolerancias sencillas, hasta aspectos de programación avanzada para realizar algoritmos. Este manual está disponible para consulta en el “ANEXO A. MANUAL BÁSICO DE USO DE CAMIO”. A lo largo de este documento se irán citando diferentes partes del mismo.

1.4. Definiciones de tolerancias

En este apartado se definen las tolerancias geométricas seleccionadas que serán a usadas posteriormente.

1.4.1. Tolerancia de forma de superficie

La zona tolerancia de forma de superficie está compuesta por dos curvas de superficie paralelas que siguen el contorno del perfil de la superficie teórica a lo largo de toda la longitud de la misma, una por encima y otra por debajo, separadas una distancia correspondiente al valor numérico de la tolerancia (ver Figura 5). La tolerancia cumple si la superficie real se encuentra en la zona de tolerancia. (GD&T Basics , 2014). Esta misma tolerancia puede ser especificada sin referencias, con lo cual, se suprimen restricciones en cuanto a la orientación de la superficie inspeccionada.

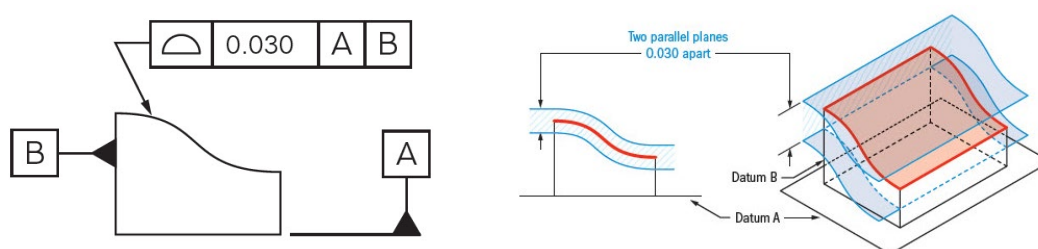


Figura 5. Ejemplo de tolerancia de forma de superficie. Fuente: (GD&T Basics , 2014)

1.4.2. Tolerancia de planitud

La tolerancia de planitud especifica la uniformidad de una superficie. La superficie debe encontrarse entre dos planos paralelos que disten una distancia entre sí del valor numérico de la tolerancia (ver Figura 6)

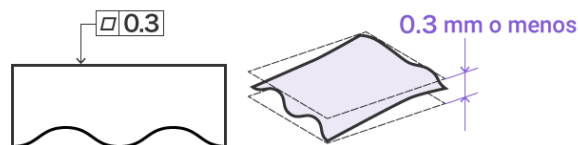


Figura 6. Ejemplo de tolerancia de planitud. Fuente: (Keyence, Fundamentos de GD&T, n.d.)

1.4.3. Tolerancia de cilindridad

La tolerancia de cilindridad especifica cuanto de exactamente circular y recto debe ser un objeto cilíndrico. La superficie cilíndrica debe de encontrarse entre dos cilindros coaxiales con una distancia radial del valor numérico de la tolerancia (ver Figura 7)

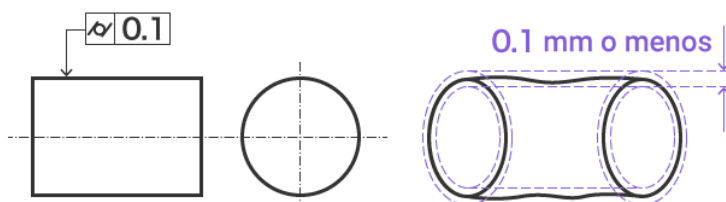


Figura 7. Ejemplo de tolerancia de cilindridad. Fuente: (Keyence, Fundamentos de GD&T, n.d.)

1.4.4. Tolerancia de paralelismo entre superficies

La tolerancia de paralelismo entre superficies especifica la desviación máxima permitida para considerar que 2 superficies son paralelas. Se define por dos planos paralelos que están a una distancia específica de la superficie de referencia (*Datum*). La superficie medida debe estar completamente contenida entre estos dos planos paralelos (ver Figura 8).

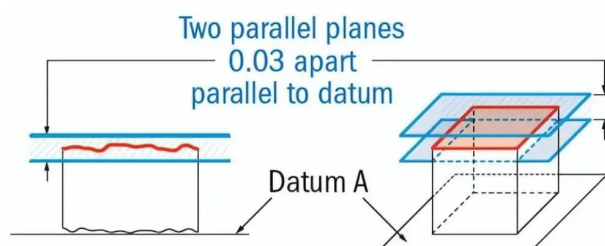


Figura 8. Ejemplo de tolerancia de paralelismo entre superficies. Fuente: (Machine MFG, 2023)

1.5. Relación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En el contexto global actual, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas proporcionan una hoja de ruta crucial para enfrentar los desafíos ambientales, sociales y económicos. La integración de estos objetivos en los proyectos industriales no solo refuerza el compromiso con un futuro más sostenible, sino que también impulsa la innovación y la eficiencia en los procesos.

El presente proyecto, que utiliza una máquina de medir por coordenadas (CMM) y técnicas ópticas avanzadas, se alinea con varios ODS relevantes, reflejando un enfoque integral hacia la sostenibilidad. Estos son:

- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.** El uso de tecnologías avanzadas de medición y análisis impulsa la innovación y mejora la eficiencia en la producción, optimizando recursos y reduciendo costos. Se favorece una cultura de innovación y competitividad industrial.
- **ODS 12: Producción y Consumo Responsables.** El proyecto permite un uso más eficiente de los materiales y una reducción en los desechos generados, promoviendo prácticas de producción sostenibles y conciencia ambiental.
- **ODS 13: Acción por el Clima.** La optimización de procesos industriales reduce la huella de carbono y contribuye a mitigar el cambio climático.

Para más información, y consulta de los beneficios tangibles e intangibles del proyecto enfocado a los ODS, consultar el pliego de condiciones (**PC.5. Relación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**).

CAPÍTULO 2. PRIMERA TOMA DE CONTACTO **(ESCANEADO EN CMM CON MODELO CAD)**

2.1. Objetivo de la primera toma de contacto

El objetivo de esta primera toma de contacto fue familiarizarse con el uso de la máquina y el software de medición. Como el objetivo principal es realizar el escaneo de superficies, debía de seleccionarse un objeto que tuviese una superficie de un tamaño considerable, y para ello se seleccionó una pieza de la carrocería de un automóvil, en este caso de uno de los modelos de Ford (Figura 9)



Figura 9. Pieza de la carrocería de un automóvil Ford

Para tomar medidas sobre una pieza en una CMM, lo ideal es disponer de un modelo virtual (3D) sobre el cual ir indicando donde se quiere realizar las mediciones de la geometría (programación asistida de la CMM en un entorno gráfico). Hay que destacar que puede medirse sin disponer modelo CAD, pero es una forma de trabajo más laboriosa, la cual se trata en “**CAPÍTULO 4. ESCANEADO EN CMM POR PUNTOS (SIN MODELO CAD)**” y en “**CAPÍTULO 5. ESCANEADO EN CMM MEDIANTE ALGORITMO DE BARRIDO POR LÍNEAS (SIN MODELO CAD)**” de este documento. Por este motivo, el primer paso para esta toma de contacto fue realizar un modelo CAD de la pieza.

2.2. Modelo CAD de la pieza

Para modelar la pieza, se utilizó la herramienta CAD SolidWorks, empleando la técnica de modelado de superficies. Las principales medidas de la pieza se obtuvieron con un pie de rey. Lo importante era tener la forma de la superficie próxima a la real, y la zona de apoyo seleccionada (ver Figura 11).

El plano de la pieza modelada puede consultarse en la sección de planos, “**Plano 1. Pieza de carrocería**”.

Como en esta primera toma de contacto no se busca la precisión, sino probar inicialmente la máquina, la pieza modelada, debido a su complejidad, tendrá algunas variaciones respecto a la real, situación que se evidenciará en forma de desviaciones en las medidas, al comparar el palpado sobre la pieza real con el modelo 3D.

El modelo 3D de la pieza se puede apreciar en la Figura 10.

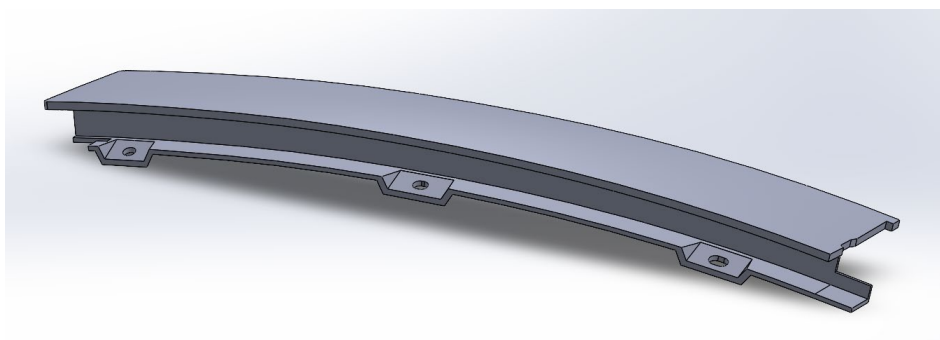


Figura 10. Modelo CAD de la pieza de carrocería de un automóvil Ford

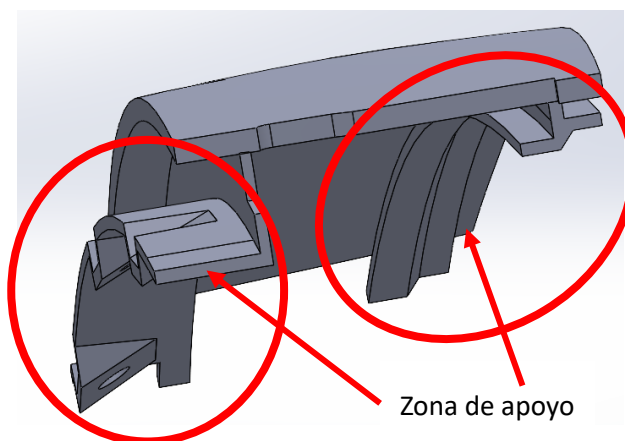


Figura 11. Zona de apoyo de la pieza

2.3. Diseño y fabricación del soporte

2.3.1. Necesidad de un soporte

Como las piezas que se sitúan en las CMM para medir no pueden estar sueltas, ya que esto podría provocar que durante el proceso de medición se muevan y se produzcan errores en las medidas, es necesario fabricar un soporte que la mantenga fija en todo momento.

2.3.2. Diseño del soporte

El diseño del soporte debía cumplir con varios requerimientos:

1. Que ofreciese apoyo para la pieza en al menos 3 puntos, para garantizar la estabilidad
2. Que tuviese al menos 2 agujeros en la base para fijar mediante un perno roscado en los agujeros que tiene la mesa de planitud de la CMM
3. Que se pudiese imprimir en una impresora 3D sin demasiadas dificultades

Tras algunas versiones en el diseño de la pieza soporte, y teniendo en cuenta las restricciones anteriores, se obtuvo el diseño del soporte de la Figura 12.

Debido a que todo el conjunto no se puede imprimir a la vez en una impresora 3D, ya que requeriría excesivo material de soporte para aguantar los voladizos, se dividió en dos partes para

facilitar su impresión. Las dos partes se muestran en la Figura 12 en colores distintos (una gris y la otra verde)

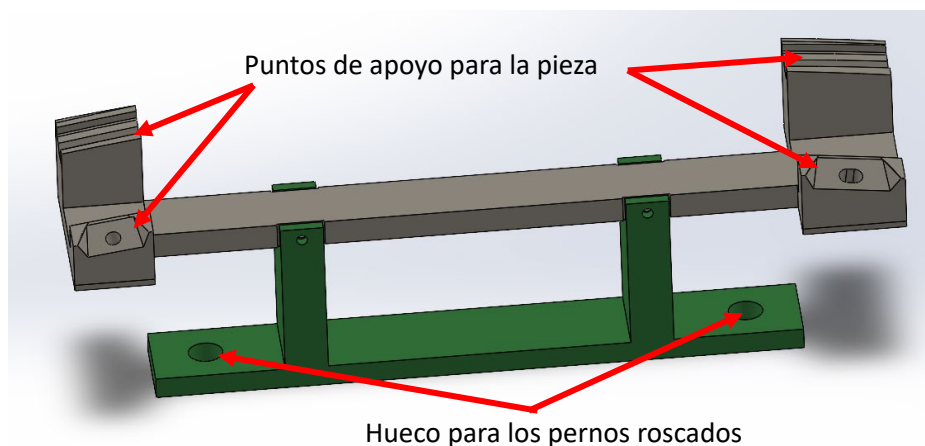


Figura 12. Modelo CAD del soporte de la pieza

2.3.3. Fabricación del soporte

La impresora 3D que se utilizó para imprimir el soporte es una Creality, que, junto con la Blackbelt, son impresoras con un cabezal a 45° (ver Figura 13), cuya principal ventaja es que permiten crear piezas con voladizos reduciendo la necesidad de soportes adicionales. Además, algunos modelos como la Blackbelt disponen de una cinta móvil como base, lo que permite imprimir piezas largas y en lote de forma continua.

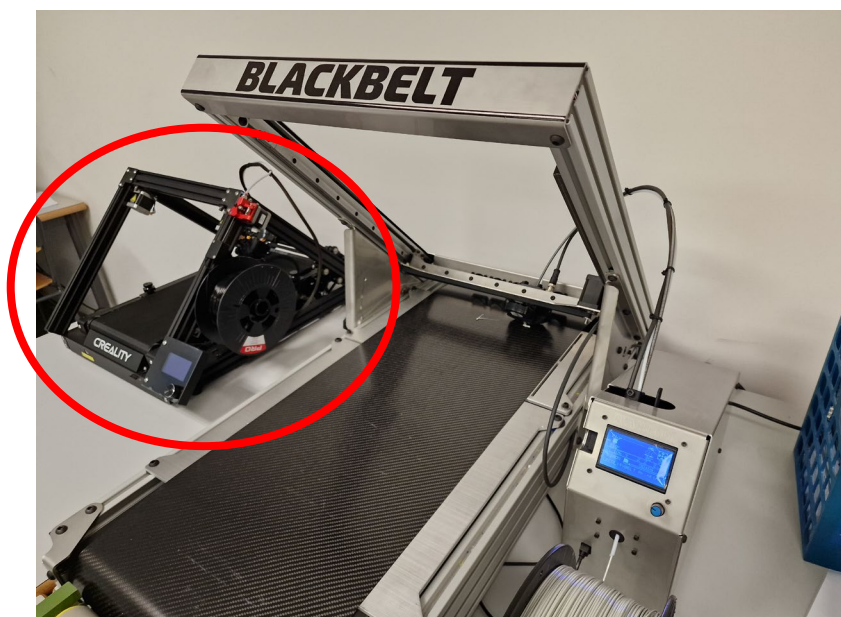


Figura 13. Impresora 3D Creality (izquierda) y Blackbelt (derecha) en ángulo de 45°

Sin embargo, uno de los problemas de la impresión a 45° es que el punto de comienzo es siempre una línea, y sobre esa línea se van superponiendo el resto de las secciones (ver Figura 14)

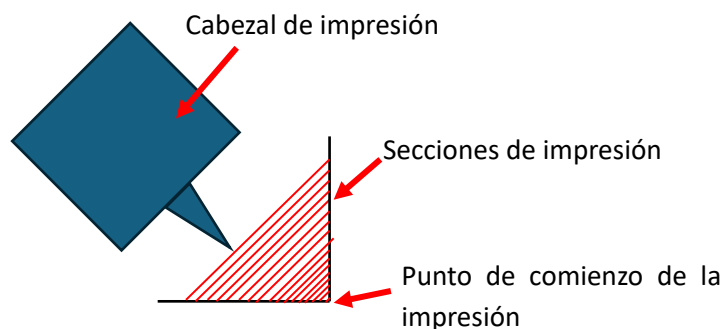


Figura 14. Procedimiento de impresión a 45°

El problema de que el comienzo sea una simple línea, y sea el apoyo del resto de la pieza, es que se suele soltar, y el cabezal comienza a imprimir en vacío, teniendo que desecharse la pieza y siendo necesario comenzar otra vez. Este problema se puede ver en la Figura 15, donde se aprecia que, al soltarse la línea de comienzo de la base, se empieza a acumular el material en forma de bola al estar imprimiéndose en vacío.

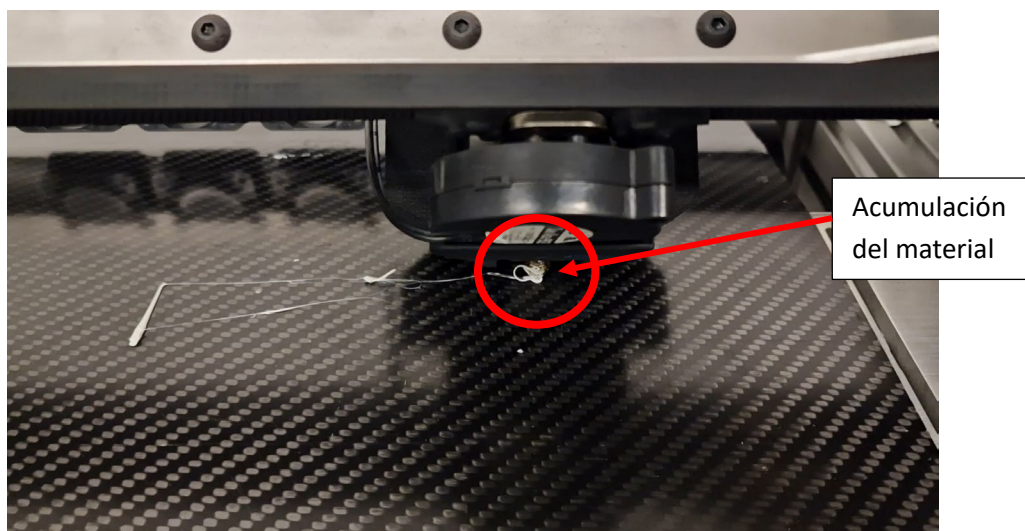


Figura 15. Problema de impresión en vacío al soltarse la primera línea de material

Una forma de solucionar este problema es la creación de un "Brim", que es simplemente una extensión de la pieza en forma de lámina muy fina con la que se consigue más adherencia a la base (ver Figura 16)

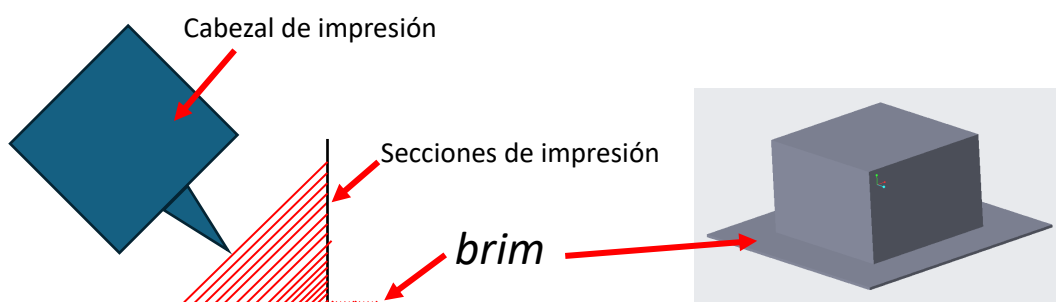


Figura 16. Creación del Brim

Hay que destacar que el programa estándar para impresión 3D, UltiMaker Cura, dispone una función automática para crear *brims*, pero, al tener que utilizar una variante del mismo, concretamente, el CrealityBelt, que no dispone de esta función, hubo que crear el *brim* de forma manual incluyéndolos en las piezas.

Tras llevar a impresión el soporte, se unieron sus dos partes mediante 2 tornillos (ver Figura 17)

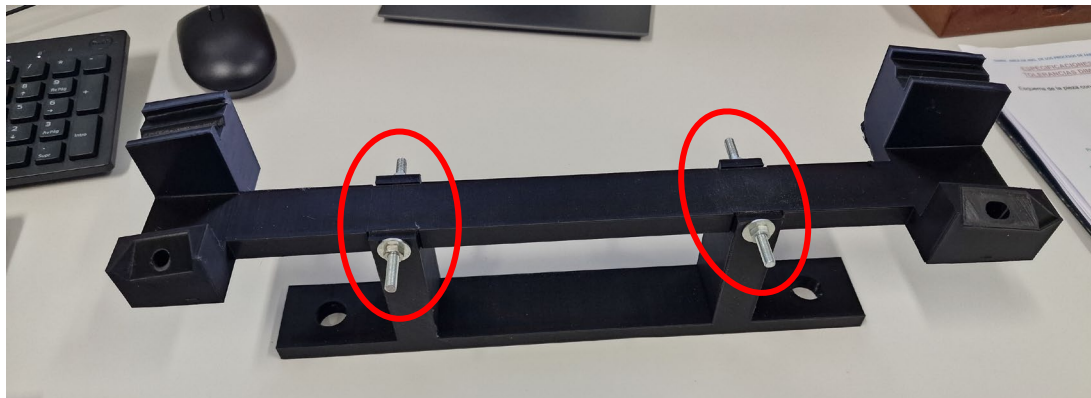


Figura 17. Soporte para la pieza impreso en PLA

Con el soporte impreso, ya se puede situar la pieza encima y fijarla a la CMM para realizar mediciones.

Nota: Los planos del soporte se pueden encontrar en la sección de planos.

2.3.4. Primeros pasos para la verificación de la geometría

El primer paso para poder verificar la geometría en la CMM, es realizar el programa en CAMIO. En esta primera prueba se realiza la medición de la superficie de la pieza mediante palpado de varios puntos.

Tal y como se comenta en “**A.1.1. Procedimiento de trabajo**” en el Anexo A, uno de los primeros pasos es crear el “cero pieza”, que consiste básicamente en ubicar la pieza en la máquina a partir de la creación de un sistema de coordenadas de referencia solidario a la misma.

La primera propuesta para el sistema de coordenadas “cero pieza” es la que se muestra en la Figura 18.

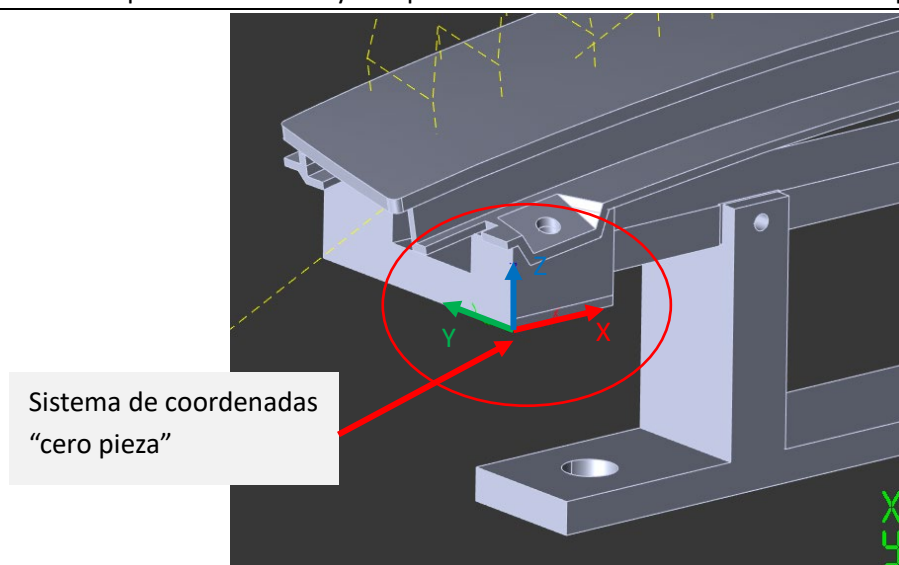


Figura 18. Primera propuesta de sistema de coordenadas "cero pieza"

Para la creación del mismo, es necesario palpar puntos para crear un plano, una línea y un punto (ver "A.1.6. Definición de origen de la pieza ("cero pieza"). Método Plane-Line-Point Alignment" en Anexo A) en las caras que se indican en la Figura 19.

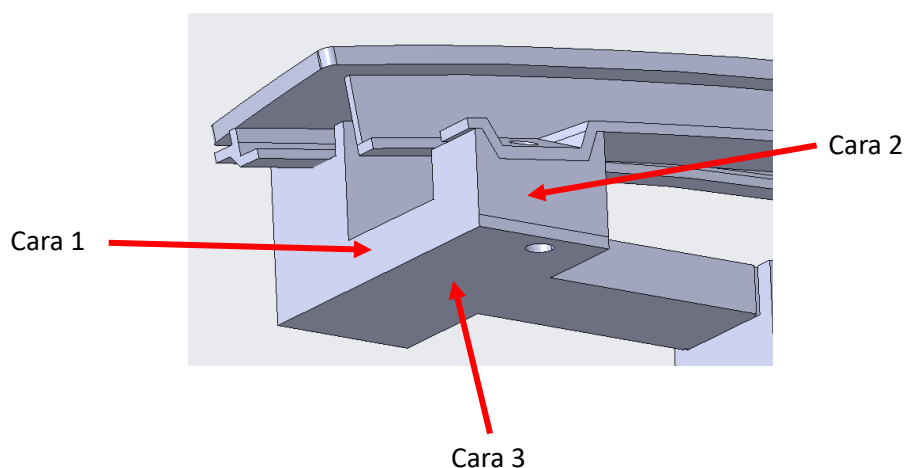


Figura 19. Caras a palpar para la creación de la primera propuesta de sistema de coordenadas "cero pieza"

Sin embargo, para tener acceso en el palpado de los puntos en las caras 1 y 3 se requieren cambios de orientación del palpador. Situación que lo complica ligeramente, pero que afecta considerablemente cuando se busca la misma referencia con otras técnicas de escaneo, como va a ser el caso.

Se decide externalizar y hacer más fácil el acceso para la definición del sistema de coordenadas.

2.3.5. Externalización del sistema de coordenadas "cero pieza"

La externalización del sistema de coordenadas consiste en añadir una pieza adicional de geometría accesible por la sonda para que esté fija al conjunto soporte-pieza, y de esta forma, ubicar el sistema de coordenadas "cero pieza" sobre ella.

En la Figura 20 se puede observar la representación del conjunto soporte-pieza con la pieza adicional que se diseñó (en amarillo). Este sistema de coordenadas externo será muy útil a lo largo de este trabajo y permitirá superponer más fácilmente los escaneos de los diferentes sistemas, para su comparación.

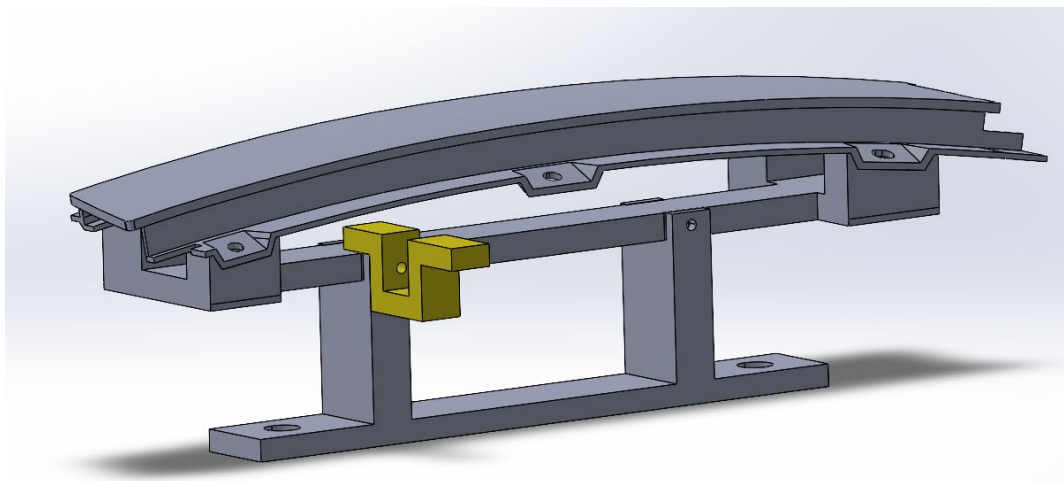


Figura 20. Representación del conjunto con la pieza adicional (en amarillo) para ubicar externamente un sistema de coordenadas

Una vez impresa la pieza para ubicar el sistema de coordenadas, se sitúa en el conjunto soporte-pieza (ver Figura 21) y ya se pueden realizar las mediciones deseadas.

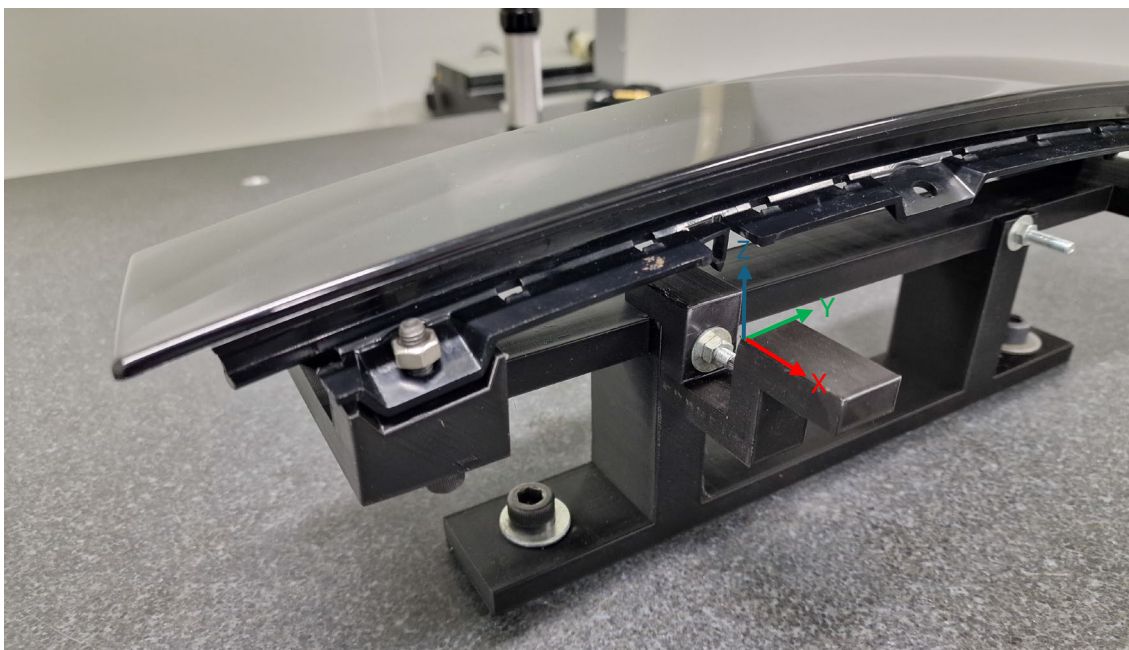


Figura 21. Conjunto soporte-pieza con elemento adicional para ubicar el sistema de coordenadas

2.4. Medida final de los puntos

Una vez se dispone de la pieza con el sistema de coordenadas definitivo, ya se puede proceder a palpar puntos aleatorios sobre la superficie.

En esta primera toma de contacto, lo que se hizo fue seleccionar varios puntos en el modelo CAD sobre la superficie (ver Figura 22) y dejar que la CMM realizase el palpado automático sobre la pieza.

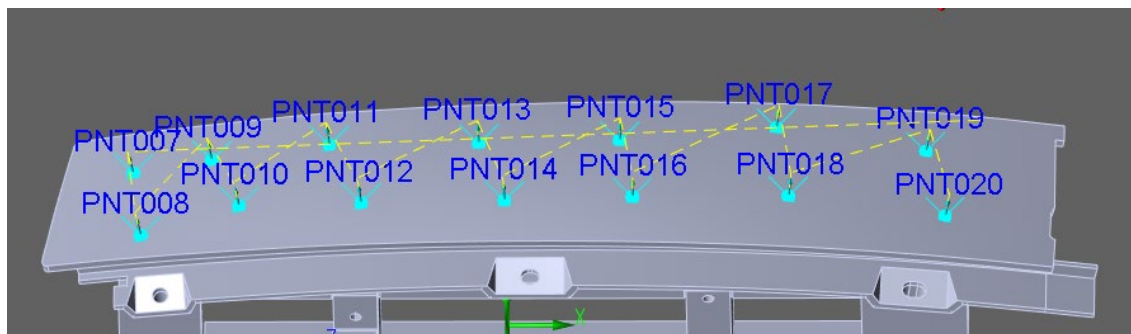


Figura 22. Puntos a palpar en la primera toma de contacto

El proceso de palpado de puntos automático consiste en que:

1. La máquina tiene las coordenadas del punto teórico que tiene que palpar
2. La sonda se aproxima rápidamente a una zona de seguridad por encima del punto, separada una distancia
3. Una vez llega a esa zona de seguridad, se aproxima a una velocidad determinada (que se puede configurar) hasta que toca el punto
4. Tras tocar el punto, la sonda se separa de la superficie una determinada distancia de seguridad, y repite el proceso con el resto de los puntos.

Hay que destacar que, como el modelo CAD de la pieza que se diseñó no tenía una precisión demasiado elevada, existían variaciones en la superficie, por lo que fue necesario incrementar la distancia de la zona de seguridad de aproximación a los puntos para que no se detectase el palpado durante el movimiento en rápido, marcándolo como colisión.

CAPÍTULO 3. ESCANEO EN CMM DE CURVAS Y SUPERFICIES (CON MODELO CAD)

Una vez probado el escaneo de puntos discretos en el capítulo anterior, toca dar un paso más, y realizar el escaneo de curvas y superficies.

Para realizar el estudio de las diferentes formas de escaneos de curvas y superficies se empleó otra pieza distinta, concretamente la de la Figura 23. Se puede observar que es una pieza con una superficie suave dispuesta en un soporte de madera, sujetado a este con un amarre de plastilina. El soporte también está fijado con un amarre de plastilina a la mesa de planitud.

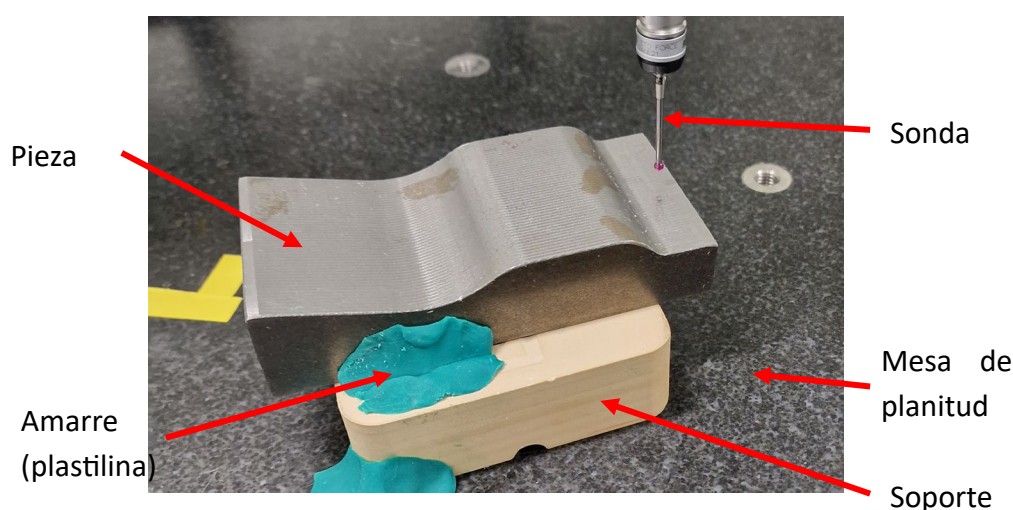


Figura 23. Pieza empleada para el estudio del escaneo de curvas

3.1. Escaneo de curvas

Existen 2 formas de medir curvas (denominadas internamente *gcurve*) en Camio, por puntos (medición discreta) y por barrido (medición continua).

3.1.1. Escaneo de curvas por puntos

El escaneo por puntos consiste en que a partir de una curva predefinida en el modelo CAD de la pieza, se genera un número de toques deseado sobre dicha curva. La sonda de palpado palpará estos puntos individualmente, y se obtendrá la posición en el espacio de dichos puntos discretos.

Esta forma de medida es más lenta, ya que existe un tiempo de aproximación, retirada y movimiento hasta el siguiente punto que la sonda debe medir, y además, se conoce solo la información de los puntos palpados, y no lo que hay entre ellos.

Para entender el funcionamiento de este método, obsérvese la trayectoria (flechas rojas) que seguiría la sonda de palpado para palpar los puntos de color cian sobre la curva (Figura 24)

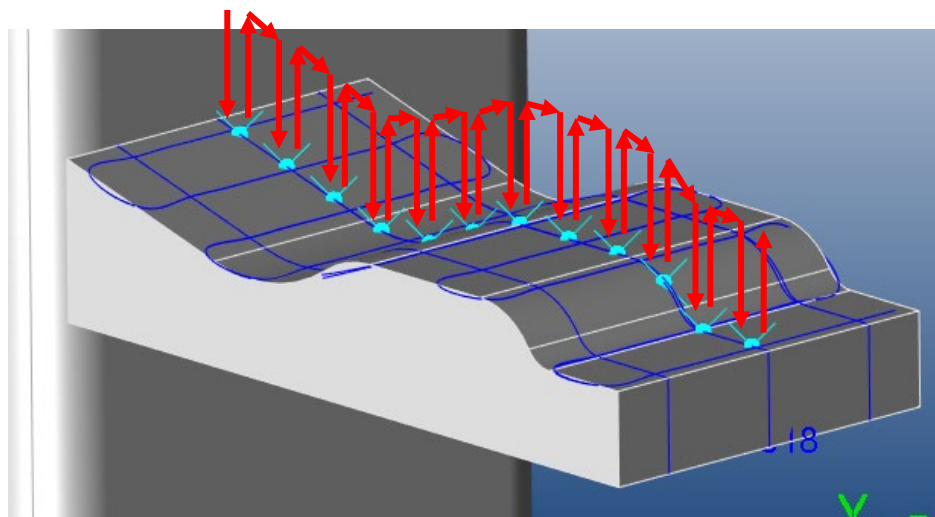


Figura 24. Escaneo de curvas por puntos

3.1.2. Escaneo de curvas por barrido

El escaneo por barrido consiste en que la sonda de palpado está en contacto continuo con la pieza durante la medición. Se dispone de un punto de inicio y un punto de fin, y la sonda toca la superficie de la pieza en todo el trayecto entre ambos puntos.

Existen 2 formas de escaneo por barrido: “*Online Teach*” y con línea prediseñada.

Para activar el modo de escaneo por barrido en Camio, se debe de activar el modo “*SCAN*”, que es básicamente una línea de código que indica el programa que debe realizar el escaneo por contacto continuo. Sin embargo, hay que indicarle los toques que se desean hacer de forma continua de diferente forma que si se hiciesen de forma discreta. Se realiza utilizando los comandos de generación de puntos que posee Camio a partir de la selección de entidades, como líneas, existentes en el modelo; aunque también se pueden crear.

Por otro lado, es necesario ajustar los parámetros de escaneo:

- **Stop Zone.** Indica en qué momento la sonda debe terminar el escaneo.
- **Velocidad de escaneo.** Velocidad con la que la sonda se moverá por la pieza durante el escaneo.
- **Plano de escaneo.** Indica el plano en el que están contenidos los puntos que se desean medir por contacto continuo.

3.1.2.1. Escaneo por barrido “*Online Teach*”

El escaneo “*Online Teach*” consiste en palpar de forma manual con la máquina en “*Online*” sobre la pieza física 3 puntos sobre una superficie. Un punto inicial desde el que empezará la medición, un punto intermedio de aproximación, y un punto final donde terminará la medición.

Con estos 3 puntos, el controlador de la máquina traza una curva entre ellos y la sonda empieza a palpar la curva. Una vez llega al punto final, la nube de puntos de la curva se guarda en memoria.

Para más detalles sobre cómo realizar el Escaneo por barrido “*Online Teach*”, se puede consultar **A.4.1. Escaneo por el método “*Online Teach*”**, en el Anexo A.

3.1.2.2. Escaneo por barrido con línea prediseñada

A diferencia del escaneo "Online Teach", el escaneo por barrido con línea prediseñada consiste en seleccionar una curva que ya exista en el modelo CAD o seleccionar una creada manualmente mediante un corte en el sólido (ver Figura 25) y añadir toques continuos sobre la curva que la sonda barrerá (ver Figura 26)

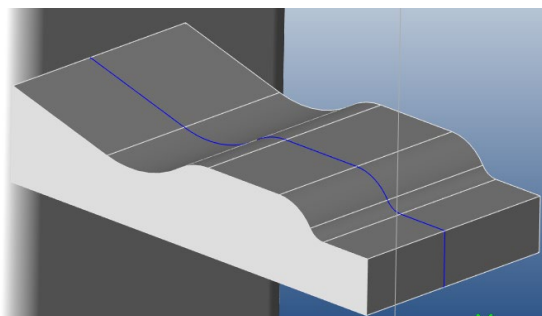


Figura 25. Curva generada mediante un corte con plano

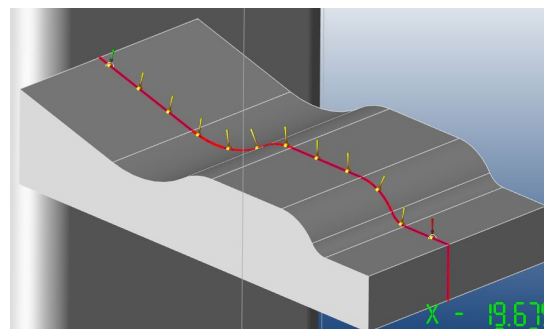


Figura 26. Toques generados para el escaneo por barrido de una curva

En la Figura 27 se puede ver la trayectoria que genera Camio al realizar el escaneo en una curva de una pieza.

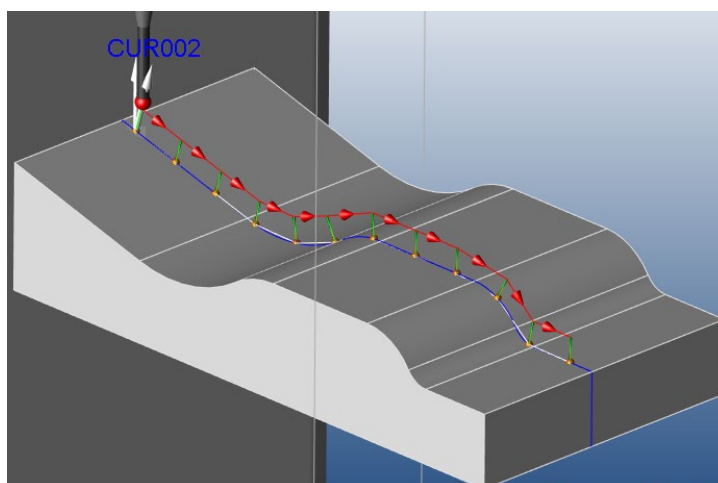


Figura 27. Trayectoria de la sonda para el escaneo por barrido de una curva prediseñada

Para más detalles sobre cómo realizar el escaneo por barrido con línea prediseñada, se puede consultar **A.4.2. Escaneo por selección de línea prediseñada**, en el Anexo A.

3.1.2.3. Problemas detectados al escanear por barrido en la pieza de carrocería

A la hora de realizar pruebas de escaneo por barrido en la pieza de la Figura 28, se descubrió que, mientras que el escaneo es ascendente (línea roja) el algoritmo interno funcionaba perfectamente, el escaneo descendente (línea verde) daba errores por mediciones en vacío, ya que, al recorrer la superficie, la sonda avanza demasiado horizontalmente y detecta que ya no había pieza.

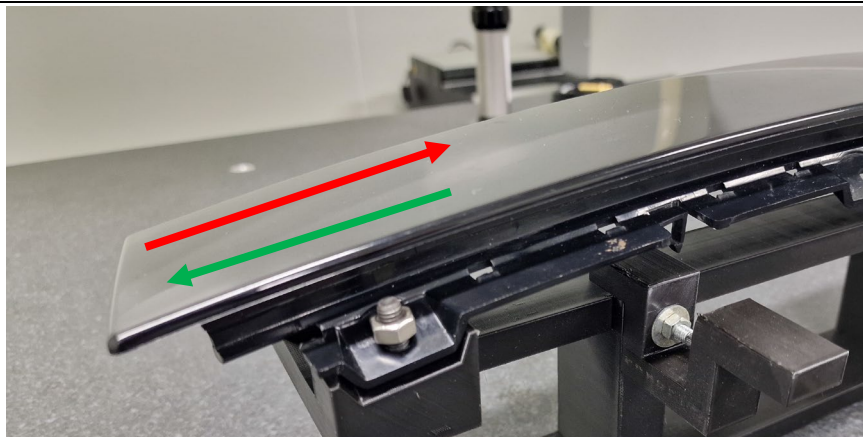


Figura 28. Escaneo por barrido ascendente vs descendente

3.2. Escaneo de superficies

3.2.1. Problema del escaneo por barrido de superficies en Camio

De la misma forma que Camio permite escanear curvas mediante barrido, aparentemente debería permitir también escanear superficies generando automáticamente curvas separadas entre sí una distancia. Sin embargo, tras realizar diversas pruebas, se comprobó que el programa no tiene implementada esta capacidad de manera efectiva para superficies.

El problema surge porque Camio utiliza internamente planos de escaneo para guiar los movimientos de la sonda. Para escaneos con contacto continuo, el software requiere que todos los puntos a medir estén contenidos dentro de un único plano.

Cuando se trata de una superficie, y no de una curva o de un conjunto de puntos contenidos en un plano, estos puntos no pueden ubicarse en un solo plano de escaneo. Como resultado, cuando el software intenta realizar el escaneo, la sonda no puede pasar de una curva a otra, ya que ello implica salirse del plano de escaneo. Esto impide que el proceso de escaneo de superficies mediante contacto continuo se complete correctamente.

Para entender cuál es el problema, supóngase que se desea realizar la trayectoria de escaneo que se representa con flechas rojas en la Figura 29. Esta trayectoria consiste en barrer diferentes líneas pasando del final de una de ellas al comienzo de la siguiente.

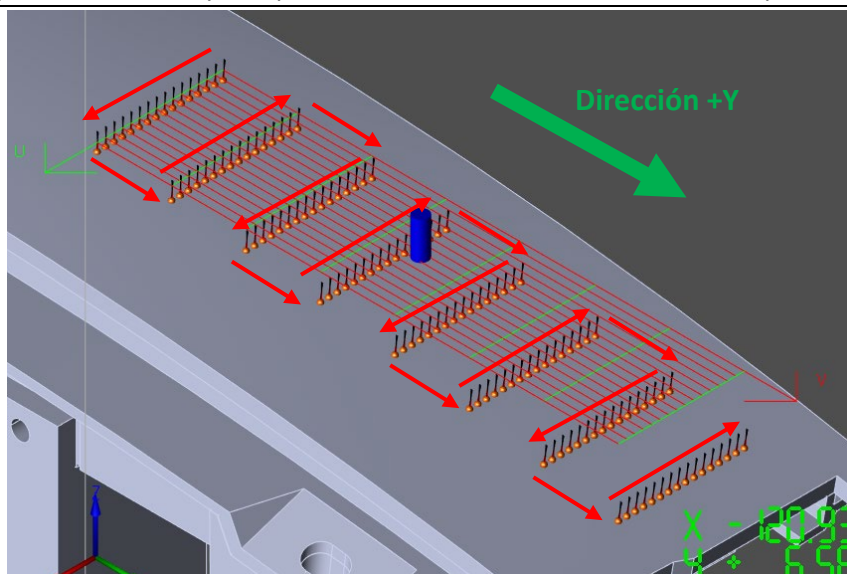


Figura 29. Trayectoria de escaneo para barrido de superficie (flechas rojas)

Para poder realizar el escaneo de cada línea de puntos, se crea un plano de escaneo (obligatorio para que el escaneo funcione) con vector normal en dirección +Y. Destacar que, si no se especifica un plano de escaneo, el programa lo calcula automáticamente. En la Figura 30 se muestran en color azul como serían los planos de escaneo con normal +Y.

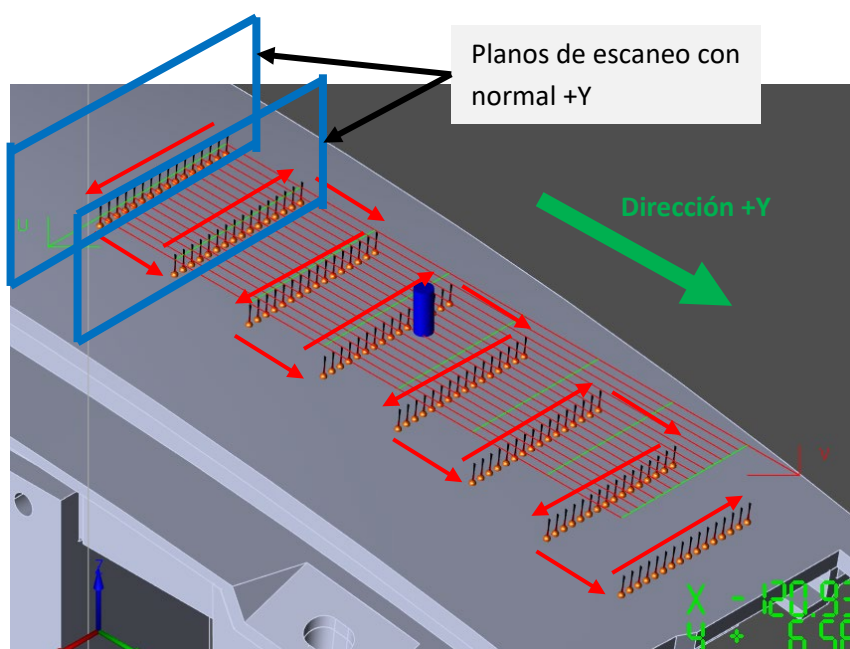


Figura 30. Planos de escaneo con normal +Y

Si se comienza a escanear (ver Figura 31), la sonda empezará por el primer punto de la flecha roja y continuará hasta el último de la misma (la punta de la flecha); pero en el momento en que debe de seguir el camino marcado con una flecha de color amarillo para barrer la siguiente línea (flecha verde), al detectar que es una zona fuera del plano de escaneo en el que se está escaneando (plano con normal +Y), rechaza el camino y sigue escaneando en ese plano, tomando el camino de la flecha morada, hasta que finalmente la sonda se sale de la pieza, obteniendo un resultado distinto al deseado.

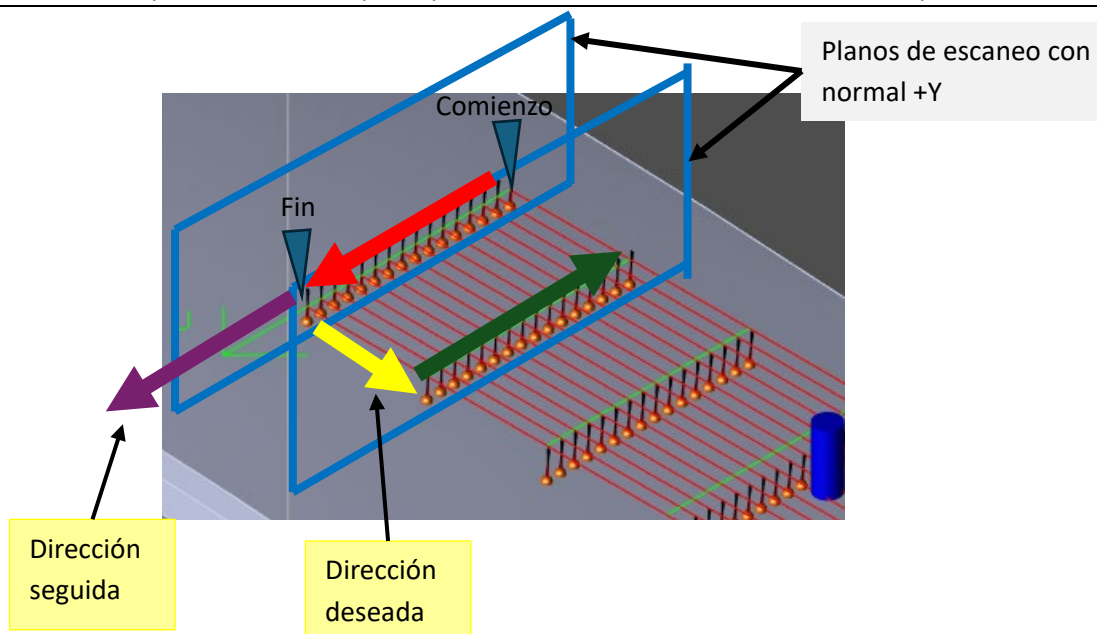


Figura 31. Camino seguido (morado) vs camino deseado (amarillo) al barrer una superficie

A la vista de este problema, se podría pensar que la solución estaría en utilizar un plano en dirección +Z (ver Figura 32). Sin embargo, sucede el mismo problema, ya que al ser una superficie 3D, los puntos no están contenidos en un único plano +Z y toma un camino diferente al deseado.

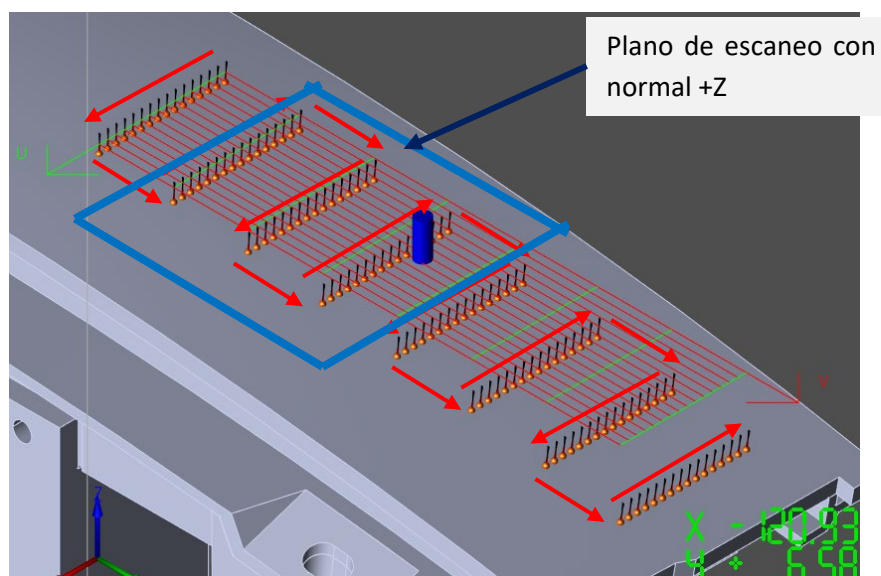


Figura 32. Plano de escaneo con normal +Z

Tras múltiples pruebas de escaneo, se concluye que Camio posee la instrucción para escanear superficies mediante barrido, pero no funciona correctamente debido a la programación interna de la propia instrucción. Se espera que en versiones posteriores del programa corrijan los problemas que se han detectado.

3.2.2. Método alternativo para el escaneo de superficies (palpado de puntos)

Tras ver que no era posible el escaneo de una superficie tridimensional mediante barrido de forma directa, se procedió a realizar la medición mediante palpado de puntos individuales por rejilla (ver Figura 33). Este método consiste en situar una rejilla, de las dimensiones deseadas para que se generen puntos sobre la superficie, los cuales serán palpados por la sonda individualmente.

Más información en el Anexo A, “A.3.5. Medición de una superficie mediante generación de puntos por rejilla”.

Tras el palpado de todos los puntos, se puede reconstruir la superficie que forman dichos puntos y verificar si cumple las tolerancias con respecto al modelo virtual.

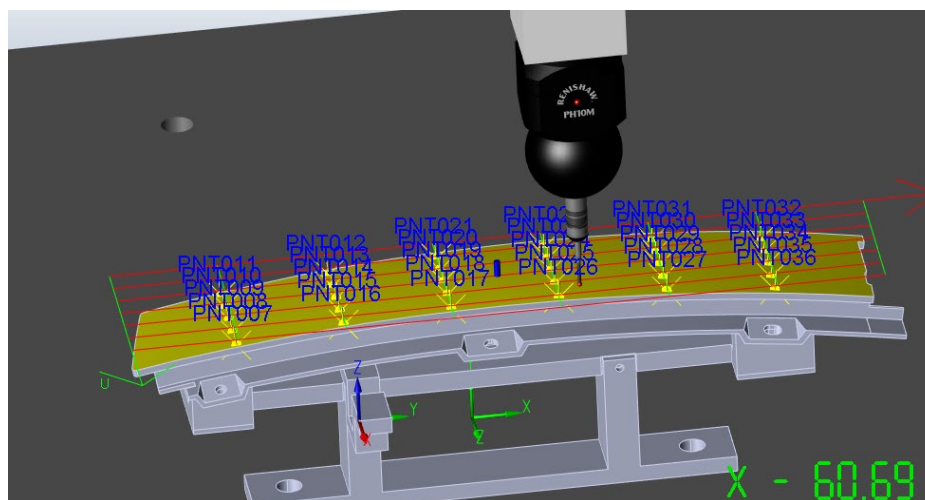


Figura 33. Medida de una superficie mediante palpado de puntos por rejilla

El realizar la medida de una superficie mediante palpado de puntos individuales tiene la limitación de que se necesita un modelo CAD en el que situar los puntos a donde se va a mandar a la sonda de palpado. Además, es un proceso mucho más lento que si directamente se realiza un barrido por contacto continuo.

3.2.3. Alternativa para el escaneo por barrido de superficies empleando el escaneo por barrido de curvas múltiples veces

El fracaso de realizar el escaneo por barrido de una superficie, unido con el éxito de realizarlo en una curva, lleva a plantearse si se pudiera realizar el mismo proceso que se hizo para una curva, pero múltiples veces y separadas una distancia, para intentar automatizar el proceso y conseguir un resultado equivalente.

Si se quisiese realizar utilizando el método “*Online Teach*”, habría que realizar todo el palpado de puntos de forma manual para obtener el código del barrido de las curvas, y luego introducir manualmente las coordenadas de aproximación a las que debe de moverse la sonda antes de palpar para evitar colisiones. Este proceso, como se puede deducir, no es nada automático, ya que requiere realizar todo de forma manual.

Por otro lado, utilizando el método de “Escaneo por barrido con línea prediseñada”, deberían de realizarse varios cortes sobre la pieza, también de manera manual, de forma equivalente a los

realizados para una curva, obteniendo las líneas azules que se observan en la pieza de la Figura 34, siendo estas líneas sobre las que ya se puede especificar los toques para el palpado.

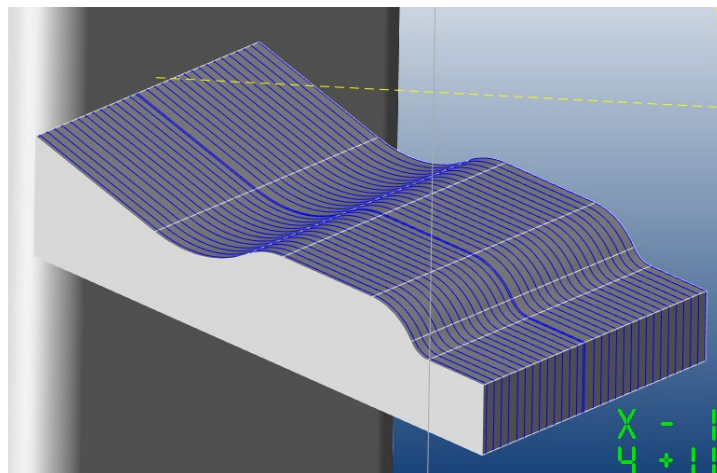


Figura 34. Cortes realizados de forma manual sobre una pieza para realizar el escaneo por barrido de curvas

Tras esto, para generar los toques, habría que seleccionar individualmente cada curva, especificar el punto de comienzo y fin, generar los toques para dicha curva (Figura 35) y configurar los desplazamientos de la sonda para evitar colisiones.

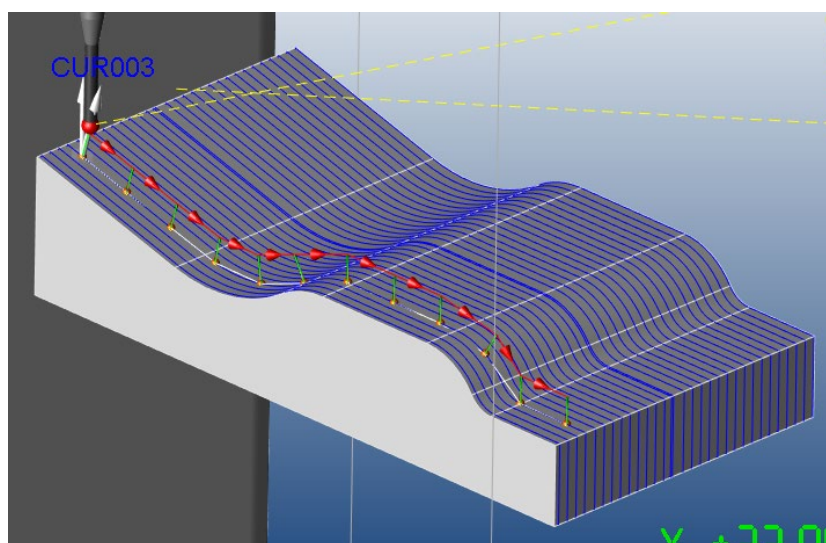


Figura 35. Generación de toques para el barrido de una curva individual

De nuevo, al igual que el método “*Online Teach*”, es un proceso que requiere mucho trabajo manual, y además solo sirve exclusivamente para una pieza, ya que, si se desea realizar en otra, hay que volver a realizar el proceso.

3.2.4. Factor “disponibilidad de modelo CAD” para el escaneo de superficies

Aparte del factor “automatización”, habría que tener en cuenta que se puede dar el caso de que no se disponga de un modelo CAD, y por tanto, el método de “Escaneo por barrido con línea prediseñada” no podría emplearse directamente. Sin embargo, el método “*Online Teach*”, al emplear puntos de aproximación palpados manualmente para realizar el barrido, sí podría emplearse mediante la programación de algún algoritmo que lo extienda.

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Como el objetivo principal es realizar la medición sin disponer de modelo CAD, ya que es la situación más común en el mundo de la metrología, se debería diseñar algún tipo de algoritmo que escanee diferentes líneas mediante barrido separadas una distancia deseada. Este algoritmo será implementado en un capítulo posterior (**"CAPÍTULO 5. ESCANEO EN CMM MEDIANTE ALGORITMO DE BARRIDO POR LÍNEAS (SIN MODELO CAD)"**)

Por otro lado, siguiendo el método de "Palpado de puntos" de este capítulo, también podría realizarse el escaneo sin modelo CAD, aunque para ello, habría que introducir varias modificaciones en el proceso. Esto se tratará en el siguiente capítulo (**CAPÍTULO 4. ESCANEO EN CMM POR PUNTOS (SIN MODELO CAD)**)

CAPÍTULO 4. ESCANEO EN CMM POR PUNTOS (SIN MODELO CAD)

4.1. Planteamiento del problema

En este capítulo, se muestra la modificación que habría que realizar sobre el proceso de “Palpado de puntos” para el escaneo de una superficie si no se dispone de un modelo CAD.

El método de palpado de puntos disponiendo de modelo CAD, básicamente consiste en generar puntos que se proyectan en la superficie que se desea palpar, a partir de la dimensión especificada de una rejilla (ver Figura 36)

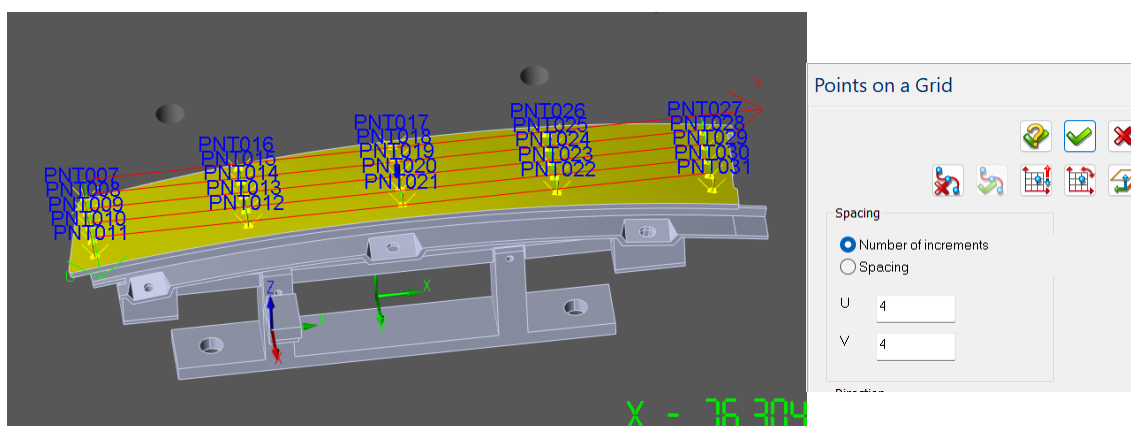


Figura 36. Palpado de puntos por rejilla con modelo CAD para escaneo de superficies

Sin embargo, el problema viene cuando no se dispone de un modelo CAD, ya que no es posible proyectar puntos de una rejilla en una superficie desconocida.

4.2. Procedimiento del método

En este apartado se presenta el resumen del procedimiento de la variante del método del palpado de puntos de una superficie en el caso de no disponer de modelo CAD. Para información más detallada del proceso y las instrucciones para replicarlo, puede consultarse el **ANEXO B. PROCEDIMIENTO DE ESCANEO POR PUNTOS (SIN MODELO CAD)**.

4.2.1. Paso 1. Construcción del sistema de coordenadas “cero pieza”

El procedimiento que debe seguirse es, en primer lugar, construir el sistema de coordenadas “cero pieza”, que será el sistema de coordenadas de referencia para las medidas que se realicen, de la misma forma que si hubiese un modelo CAD en el programa. En la Figura 37, se puede observar en la imagen de la izquierda, el sistema de coordenadas que se va a construir, y en la de la derecha, los puntos que se deben palpar para crearlo.

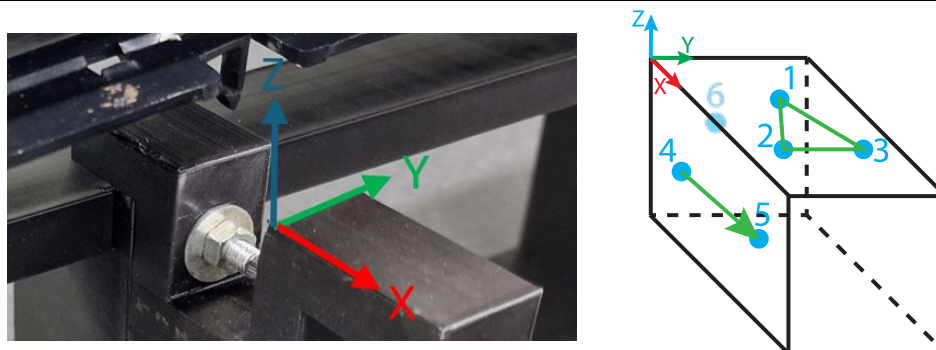


Figura 37. Sistema de coordenadas "cero pieza"

4.2.2. Paso 2. Palpado de puntos de forma manual sobre la superficie

Una vez se dispone del sistema de coordenadas de la pieza, se deben palpar varios puntos de forma manual, con la finalidad de reconstruir, por ingeniería inversa, una superficie en bruto de "baja calidad" (debido al largo proceso que sería palpar un número elevado de puntos de forma manual) para posteriormente importarla como CAD y poder realizar el palpado de puntos automático del método original, ya con un número mucho mayor de puntos y obtener una superficie de mejor calidad.

En la Figura 38 se propone una ubicación para los puntos a palpar de forma manual. Destacar que podrían palparse menos puntos, pero la calidad de la superficie bajaría, y más puntos, pero requeriría más tiempo el proceso.

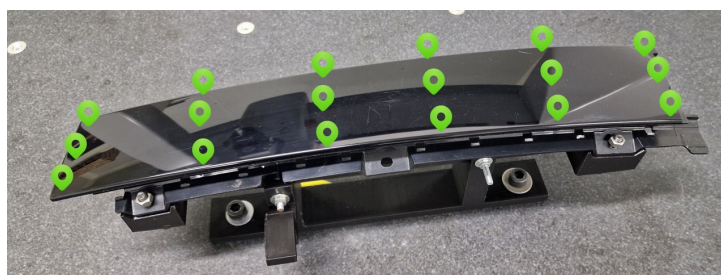


Figura 38. Ubicación propuesta para los puntos a palpar de forma manual

Una vez se realiza el palpado de forma manual, en Camio se muestran los puntos "en el aire", ya que no existe un modelo CAD.

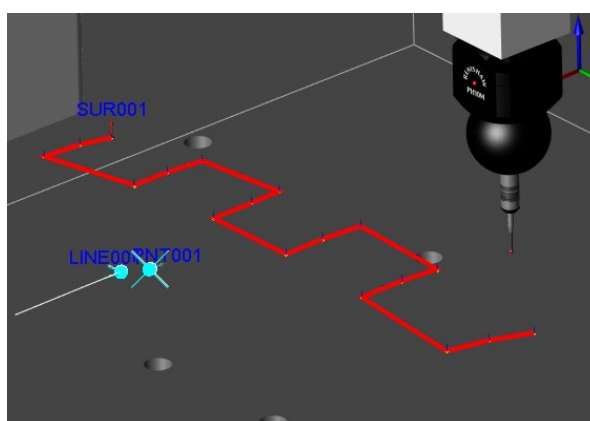


Figura 39. Visualización de los puntos palpados en Camio sin modelo CAD

Con estos puntos, lo que hay que hacer es simplemente exportarlos en formato IGES, ya que es el formato con mayor compatibilidad de los que ofrece Camio para importar a Catia y realizar el proceso de ingeniería inversa.

4.2.3. Paso 3. Reconstrucción de una superficie de “baja calidad” para disponer de un modelo CAD inicial

Cuando se haya exportado la nube de los puntos palpados manualmente, se deben importar en un programa de ingeniería inversa, en este caso Catia, para realizar una reconstrucción de la superficie, que será de “baja calidad”, pero permitirá importarla en Camio como modelo CAD para generar puntos para palpar de forma automática.

Para realizar el proceso, deben primero eliminarse los puntos que sirven para construir el sistema de coordenadas “cero pieza” (ver Figura 40), ya que de no hacerlo pasarían a formar parte de la malla de la superficie reconstruida.

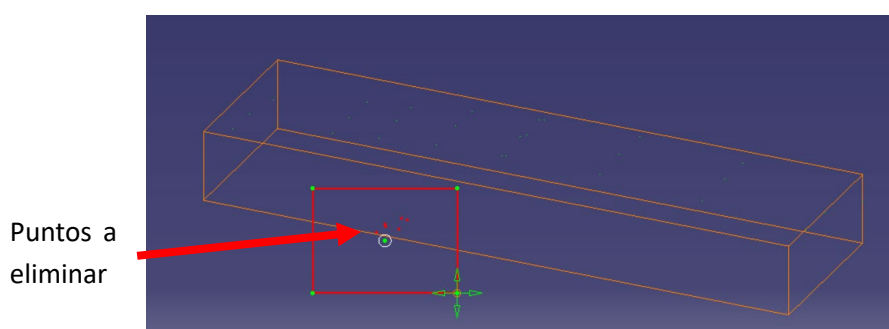


Figura 40. Eliminación de los puntos del sistema de coordenadas

Tras esto, con los puntos restantes, debe de crearse una malla ajustando el valor de la vecindad, que es simplemente el valor de la distancia máxima a la cual 2 puntos deben considerarse vecinos para poder formar parte del mismo triángulo. Con este valor se obtiene una malla preliminar, en la que si existiesen huecos podrían rellenarse manualmente.

Una vez se está conforme con el resultado de la malla, hay que convertirla en superficie (Figura 41), y entonces ya se podría exportar a Camio como modelo 3D en formato iges.

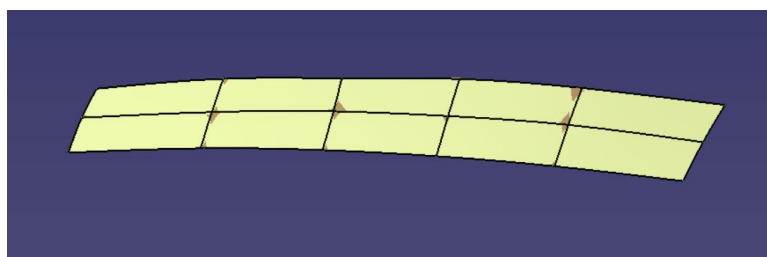


Figura 41. Superficie de “baja calidad” creada a partir de la malla

4.2.4. Paso 4. Importación de la superficie de “baja calidad” en Camio para usarla como modelo CAD

Al disponer de una malla de una superficie, aunque sea de “baja calidad”, debido a los pocos puntos que se han empleado para su construcción, se puede importar en Camio como CAD base (ver Figura 42). El hecho de que en vez de ser un sólido sea una superficie no afecta para nada.

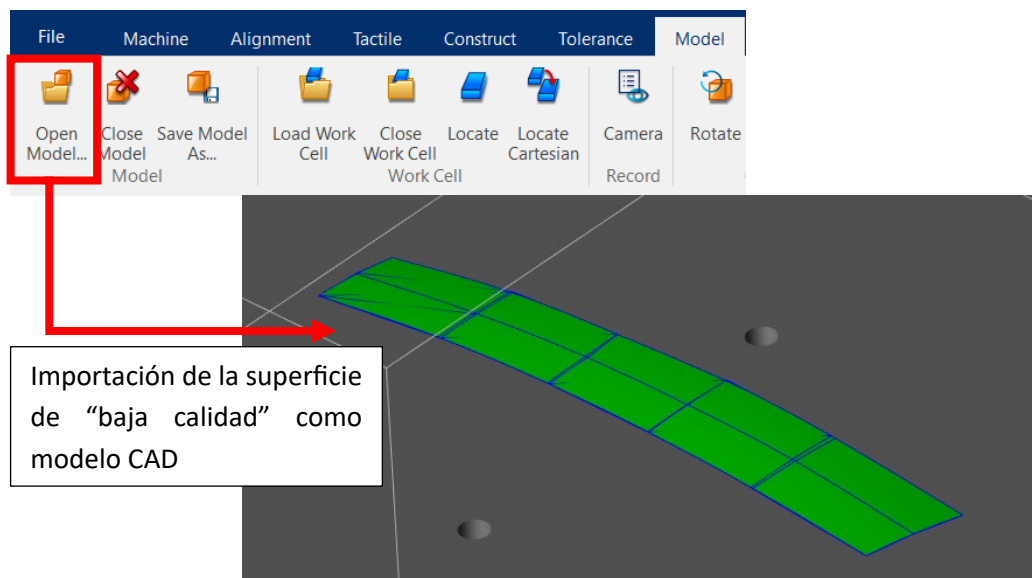


Figura 42. Importación de la superficie de “baja calidad” como modelo CAD en Camio

4.2.5. Paso 5 Generación de puntos sobre la superficie para el palpado automático

Al disponer de un modelo CAD, aunque la superficie sea de “baja calidad”, ya se puede utilizar el comando de generación de puntos mediante rejilla, y generar la cantidad deseada de puntos que serán palpados de forma automática (ver Figura 43).

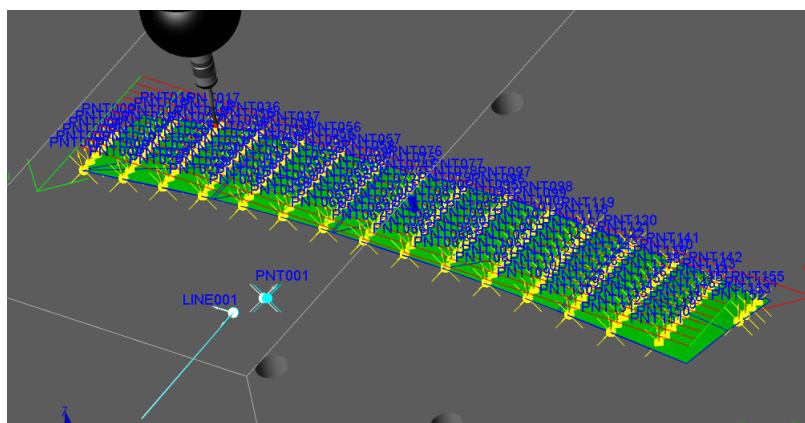


Figura 43. Generación de puntos mediante rejilla para el palpado automático

Hay que indicar que, si la superficie que se ha importado como modelo CAD fuese de “excesiva mala calidad”, no sería un problema grave, ya que se podrían cambiar los parámetros para el escaneo (dentro de unos límites razonable) tales como la distancia de aproximación al palpado,

la distancia de retirada a un plano de seguridad y la velocidad de aproximación, entre otros, ejecutándose el procedimiento comentado de forma satisfactoria.

4.2.6. Paso 6. Reconstrucción de la superficie de “alta calidad”

Una vez se han palpado todos los puntos automáticamente que se han generado con el último escaneo, al disponer de una mayor densidad, la superficie reconstruida a partir de esos puntos será también de mucha mayor calidad.

En cuanto a la reconstrucción de esta nueva superficie, el procedimiento es exactamente igual que para la superficie de “baja calidad”. Se obtendría en este caso la superficie de la Figura 44.

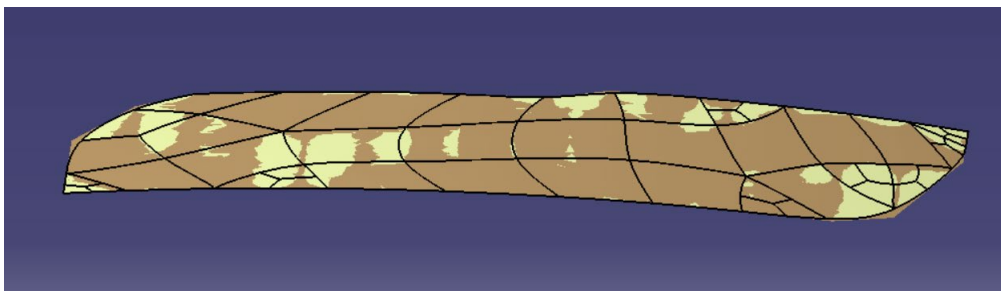


Figura 44. Superficie de “alta calidad” reconstruida

CAPÍTULO 5. ESCANEO EN CMM MEDIANTE ALGORITMO DE BARRIDO POR LÍNEAS (SIN MODELO CAD)

5.1. Necesidad del algoritmo de escaneo

Tal y como se comentó en “3.2.1. Problema del escaneo por barrido de superficies en Camio” en el Capítulo 3, Camio no permite realizar el escaneo de superficies mediante barrido de forma directa, sino que hay que realizarlo a partir del barrido de varias curvas separadas una distancia, o mediante el palpado de puntos sobre la superficie.

Como ambos métodos requieren del uso de un modelo CAD, se va a realizar un algoritmo que haga un “*bypass*” al proceso de reconstrucción externo, y que mida directamente sobre la pieza real múltiples curvas por barrido, separadas por una distancia definida por el usuario, en una zona definida también por el usuario, obteniendo directamente la nube de puntos de la superficie de forma mucho más automática.

El algoritmo completo en DMIS desarrollado en este capítulo puede consultarse en “C.1. Código del algoritmo para el barrido por líneas (sin modelo CAD)” en el anexo C.

5.2. Pasos previos para el desarrollo del algoritmo

Para poder realizar el algoritmo de escaneo, se ha tenido que estudiar las posibilidades que ofrece Camio en cuanto a programación avanzada. Pueden consultarse en “A.7. Programación Avanzada” en el Anexo A.

Para ejecutar el algoritmo diseñado para el barrido por líneas, al igual que en los casos anteriores, es necesario establecer un sistema de coordenadas pieza (cero pieza) (Figura 37)

5.3. Algoritmo de barrido

5.3.1. Funcionamiento del algoritmo

La función del algoritmo es el escaneo mediante barrido de una sección de superficie definida manualmente mediante 9 puntos (ver Figura 45). Los puntos 1, 3, 7 y 9 sirven para definir los límites de la región y su posición en el espacio, y los puntos 2, 4, 5, 6 y 8 sirven para definir la curvatura de la superficie.

Hay que destacar que, en caso de ser una geometría muy variable, con curvas abruptas, sería necesario escanear por secciones, para que la región de escaneo fuese lo más suave posible. Una vez escaneadas todas las partes se combina el resultado final.

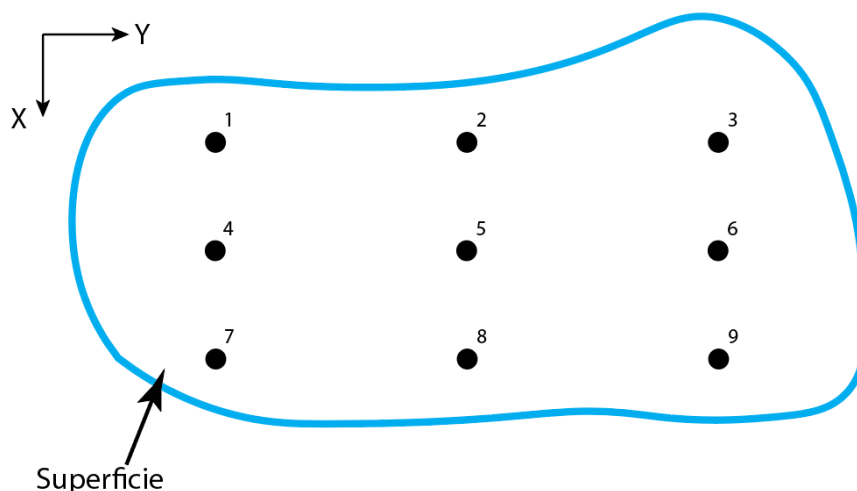


Figura 45. Definición de la sección de superficie por 9 puntos para el algoritmo de escaneo

El algoritmo implementado comienza pidiendo al usuario que escanee los 9 puntos en el orden predefinido. Se incluye un mensaje de alerta para el operario, en el que se indica que es muy importante palpar los puntos en el orden predefinido para que el algoritmo funcione (ver Figura 46).

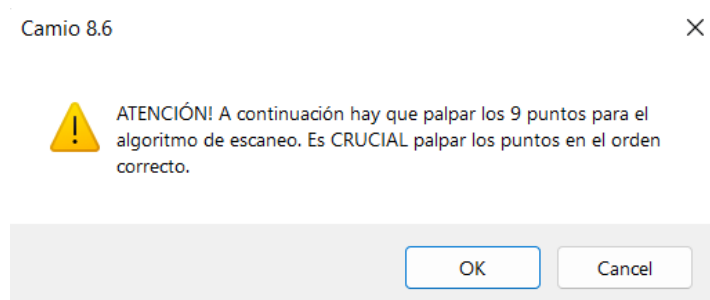


Figura 46. Mensaje de alerta para palpar los puntos en el orden correcto

Una vez se han palpado los puntos, se extraen las coordenadas X, Y, Z del punto 1, y las Y, Z de los puntos 2 y 3, ya que los puntos 2 y 3 tomarán el valor de la X del punto 1, puesto que el barrido se realiza a lo largo del eje Y. Se crean las variables X1, Y1, Z1, Y2, Z2, Y3, Z3 (ver Figura 47)

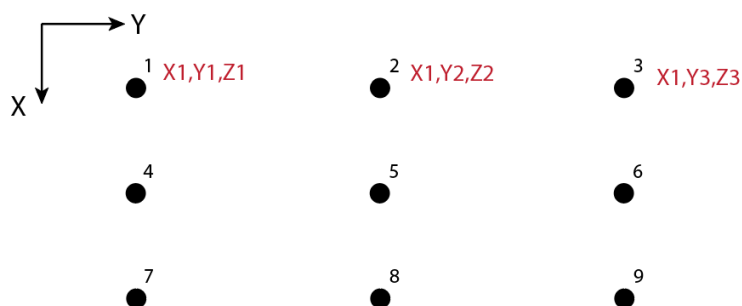


Figura 47. Variables extraídas de los puntos 1, 2 y 3

Seguidamente, se muestra un mensaje de aviso para invitar al operario a que lleve la sonda a una posición segura, ya que posteriormente se ejecutarán operaciones en modo automático, y de esta forma se evitan posibles colisiones (Figura 48)

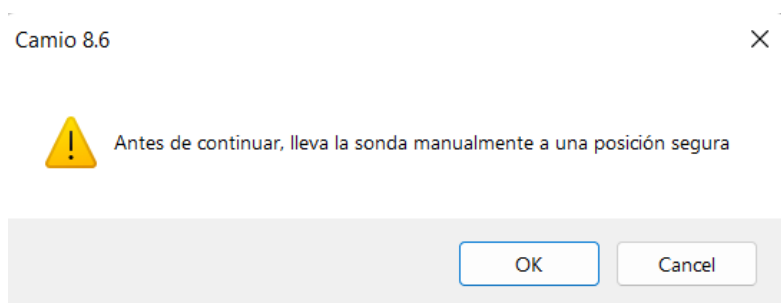


Figura 48. Mensaje de aviso para invitar al operario a que lleve la sonda a una posición segura

Tras esto, aparece otra ventana emergente (Figura 49), en la que se solicita al operario la separación entre líneas deseada para el barrido. El valor introducido se asigna a una variable llamada "SEP".

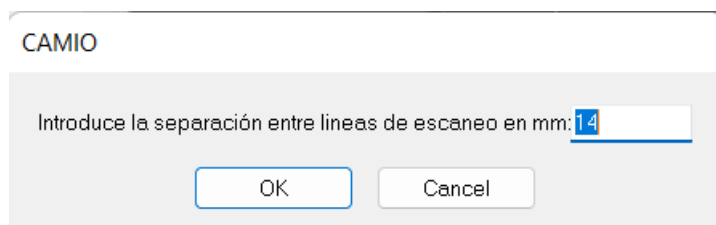


Figura 49. Ventana emergente en la que se solicita al operario la separación entre líneas para el barrido

A continuación, aparece otra ventana emergente (Figura 50) en la que se pide el valor de la distancia de seguridad, es decir, la distancia que se separará la sonda de la pieza tras realizar el barrido. Se indica una recomendación de 30mm, aunque se puede poner otro valor. El valor introducido se asigna a una variable llamada "SEG".

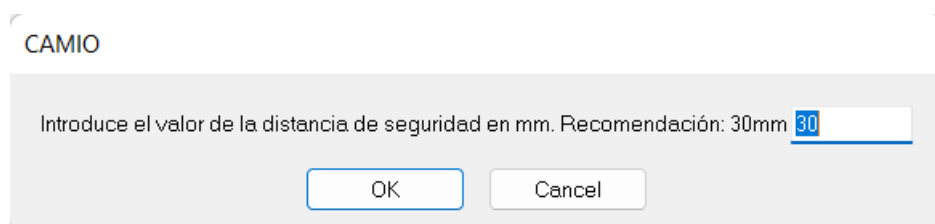


Figura 50. Ventana emergente en la que se pide el valor de la distancia de seguridad

Tras esto, se extrae el valor de las coordenadas X de los puntos 4 y 7 (servirán para definir el tramo de escaneo con el que se estimará un valor de la coordenada Z de los puntos de iteración (ver Figura 54 para comprender esto) y las coordenadas Z de los puntos 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Se crean las variables X4, X7, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8, Z9 con los valores extraídos.

Ahora, para hacer el barrido, se definen unos puntos de iteración I1, I2, I3 (puntos de color naranja en Figura 51), que servirán para indicar los puntos de comienzo (I1), aproximación (I2) y finalización del barrido (I3). Destacar de nuevo que, el barrido se realiza a lo largo del eje Y, por eso la variable XI es la misma para los tres puntos. Estos puntos tendrán una distancia entre

grupos con el valor de la distancia de separación que ha introducido el usuario previamente (SEP).

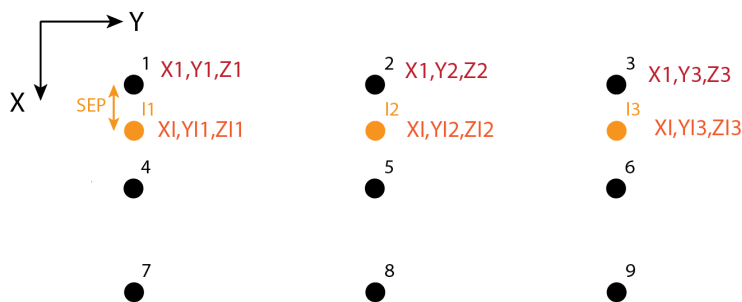


Figura 51. Definición de los puntos de iteración para el algoritmo

Las coordenadas X, Y, Z de los puntos de iteración en la primera iteración serán las de los puntos 1, 2 y 3:

$$\begin{aligned} X_I &= \text{ASSIGN}/X_1 & Y_{I2} &= \text{ASSIGN}/Y_2 & Y_{I3} &= \text{ASSIGN}/Y_3 \\ Y_{I1} &= \text{ASSIGN}/Y_1 & Z_{I2} &= \text{ASSIGN}/Z_2 & Z_{I3} &= \text{ASSIGN}/Z_3 \\ Z_{I1} &= \text{ASSIGN}/Z_1 \end{aligned}$$

Recordar de nuevo que, la X en cada iteración es la misma para los tres puntos, y por eso no se usan las variables X11, X12, X13, sino simplemente la variable XI, ya que el barrido es a lo largo del eje Y

Antes de comenzar el barrido de la primera curva, se lleva la sonda a la posición de las coordenadas X, Y, Z del punto I1, pero con una distancia en Z superior, equivalente a la distancia de seguridad (SEP), es decir:

- Posición de la sonda en X: XI
- Posición de la sonda en Y: Y11
- Posición de la sonda en Z: ZI1+SEG

Una vez que la sonda está en esta posición, comienza el bucle para el barrido. Para entenderlo, hay que tomar varias consideraciones.

Como la superficie no es plana, hay que considerar la coordenada Z de los puntos de iteración, y para ello se distinguen 2 tramos (ver Figura 52); el tramo 1, cuando el punto de iteración se encuentra entre el 1 y el 4, y el tramo 2, cuando el punto de iteración se encuentra entre el 4 y el 7.

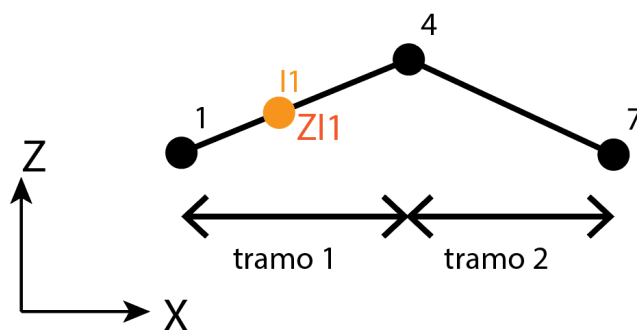


Figura 52. Tramos para la consideración de la coordenada Z

Para actualizar el valor de la variable Z del punto de iteración se utiliza una aproximación lineal (ver Figura 53), de donde se pueden obtener los valores de Z11 por semejanza de triángulos (ver Figura 54).

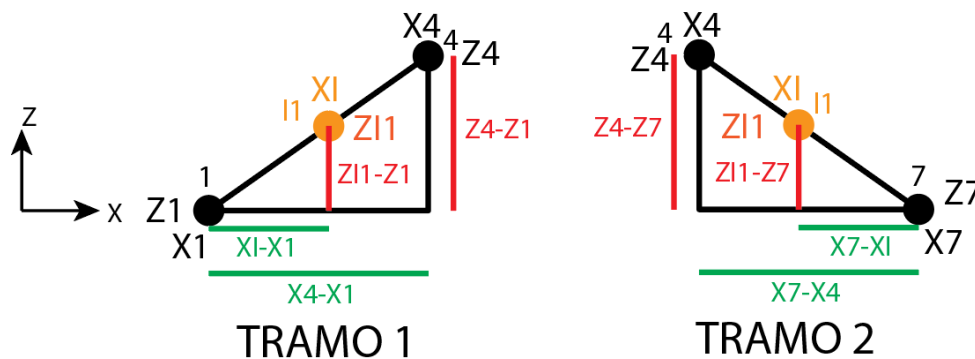


Figura 53. Aproximación lineal para el cálculo de la coordenada Z del punto de iteración de comienzo.

Tramo 1 ($X1 \leq XI \leq X4$)	Tramo 2 ($X4 < XI \leq X7$)
Aplicando semejanza de triángulos:	Aplicando semejanza de triángulos:
$\frac{Z4 - Z1}{X4 - X1} = \frac{Z11 - Z1}{XI - X1}$	$\frac{Z4 - Z7}{X7 - X4} = \frac{Z11 - Z7}{X7 - XI}$
Por lo que despejando Z11:	Por lo que despejando Z11:
$Z11 = \frac{(XI - X1) \cdot (Z4 - Z1)}{X4 - X1} + Z1$	$Z11 = \frac{(X7 - XI) \cdot (Z4 - Z7)}{X7 - X4} + Z7$

Figura 54. Obtención de la ecuación que define los valores de Z11

Una vez conocida la fórmula que sigue la variable Z11, se puede ejecutar el bucle.

El bucle de programación, escrito en un lenguaje natural (pseudocódigo) consiste en lo siguiente:

(REPETIR)

Si $XI \leq X7$ (si los puntos de iteración están dentro de la región de escaneo)

Escaneo por barrido utilizando los puntos I1, I2 e I3

Subir la sonda en el punto final de escaneo en Z SEG mm (posicionarse en XI, YI3, ZI3+SEG)

Se actualiza la variable XI añadiéndole la separación entre líneas ($XI=XI+SEP$)

Se actualiza la variable Z en función de en qué tramo se encuentran los puntos de iteración

Si $XI \leq X4$ (tramo 1), se actualiza el valor de Z11, Z12, Z13 a:

$$Z11 = ((XI - X1) * (Z4 - Z1)) / (X4 - X1) + Z1$$

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

$$ZI2 = ((XI - X1) * (Z5 - Z2)) / (X4 - X1) + Z2$$

$$ZI3 = ((XI - X1) * (Z6 - Z3)) / (X4 - X1) + Z3$$

Fin de la condición $XI \leq X4$.

Si $XI > X4$ (tramo 2), se actualiza el valor de $ZI1$, $ZI2$, $ZI3$ a:

$$ZI1 = ((X7 - XI) * (Z4 - Z7)) / (X7 - X4) + Z7$$

$$ZI2 = ((X7 - XI) * (Z5 - Z8)) / (X7 - X4) + Z8$$

$$ZI3 = ((X7 - XI) * (Z6 - Z9)) / (X7 - X4) + Z9$$

Fin de la condición $XI > X4$.

A continuación, se lleva la sonda al comienzo de la siguiente línea de escaneo, sin embargo, si el siguiente punto en X supera a X7, se manda a X7.

Si $XI \geq X7$ (si el siguiente punto se sale de los límites):

Posicionar la sonda en las coordenadas X7, YI1, ZI1+SEG (coordenadas del punto 7 pero SEG mm por encima en Z)

Si no se cumple que $XI \geq X7$:

Posicionar la sonda en las coordenadas XI, YI1, ZI1+SEG (coordenadas que le corresponden al punto de iteración)

Fin de la condición $XI \geq X7$

Ir a **(REPETIR)** para repetir todo con la siguiente línea de escaneo.

Si no se cumple $XI \leq X7$ (si los puntos de iteración están fuera de la región de escaneo):

Los puntos de la interacción final son 7, 8 y 9:

$$XI = X7$$

$$ZI1 = Z7$$

$$ZI2 = Z8$$

$$ZI3 = Z9$$

Escaneo por barrido utilizando los puntos I1, I2 e I3, que en este caso son los puntos 7, 8 y 9

Posicionar la sonda en las coordenadas XI, YI3, ZI3+SEG (subir la sonda SEG mm por encima del punto final)

Fin de las condiciones

Posicionar la sonda en las coordenadas XI, YI3, ZI3+SEG (subir la sonda 3 veces SEG mm por encima del punto final)

Una vez ejecutado todo el código, se exporta la nube de puntos (ver ejemplo en Figura 55)

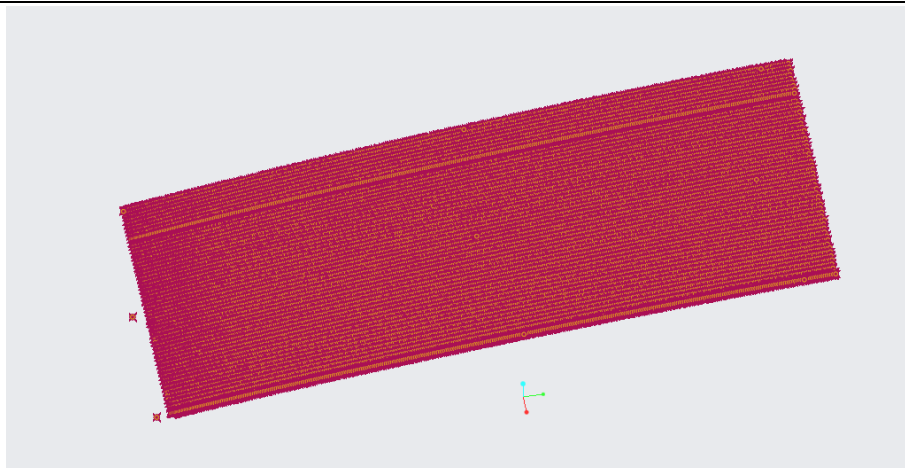


Figura 55. Nube de puntos de barridos con separación de 1mm

Como esa nube de puntos se ha conseguido a partir de una separación entre líneas de 1 mm, la deseada en el ejemplo mostrado, no se pueden visualizar correctamente los puntos con ese *zoom*. Haciendo un *zoom* a una de las esquinas (ver Figura 56), se pueden visualizar mejor los puntos y la separación entre las líneas de escaneo.



Figura 56. Zoom a una de las esquinas de la nube de puntos de barridos con separación de 1mm

5.3.2. Limitaciones del algoritmo

Las limitaciones que tiene el algoritmo son las siguientes:

1. El recorrido del barrido de 1 a 3 debe ser ascendente, ya que, si se hace descendente, ocurre medición en vacío y la sonda deja de medir.
2. El eje positivo de las X debe ser en la dirección de 1 a 7
3. El escaneo es siempre una sección rectangular
4. La superficie escaneada debe ser suave. No pueden existir variaciones bruscas

Sin embargo, recordar que la pieza se puede amarrar en la CMM con la orientación que se quiera, por lo que las limitaciones 1 y 2 pueden ser fácilmente evitadas.

5.4. Combinación de diferentes escaneos realizados con el algoritmo

5.4.1. Reconstrucción de la superficie

Como se ha comentado anteriormente, se puede dar el caso de que, por las limitaciones del algoritmo, sea necesario escanear una superficie por secciones, y posteriormente combinar todos los puntos en una misma nube.

De los diversos escaneos realizados con la CMM sobre la pieza de carrocería, se han obtenido nubes de puntos por separado de dos tramos de la superficie (Figura 57) y el contorno de la superficie (Figura 58)

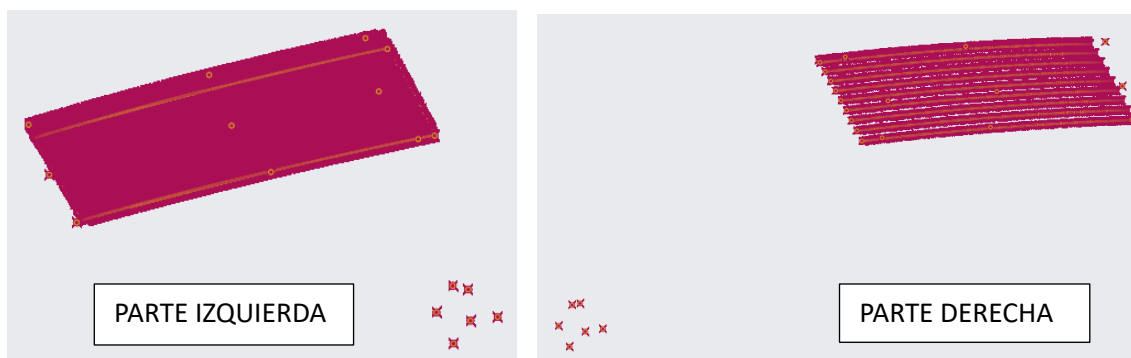


Figura 57. Nube de puntos individuales parte izquierda y parte derecha

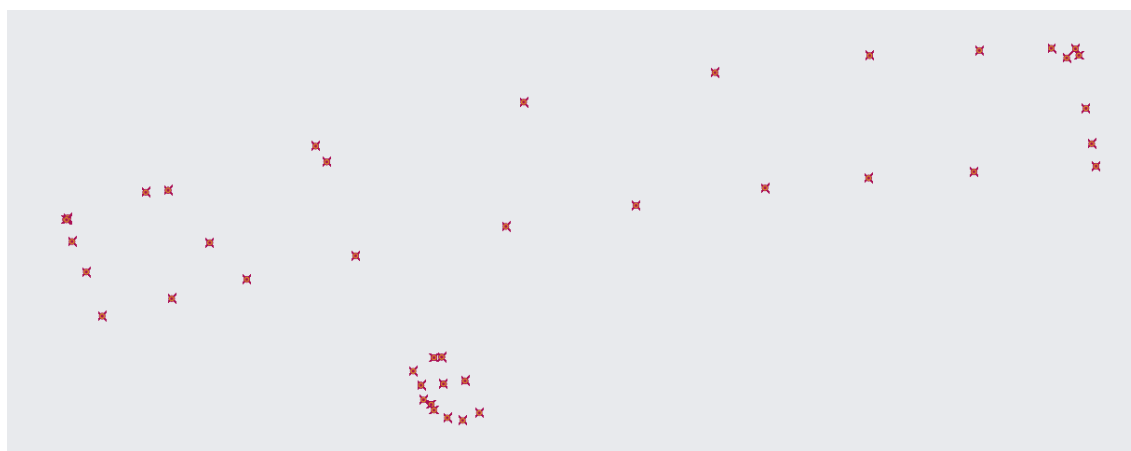


Figura 58. Nube de puntos del contorno

Al haberse realizado todos los escaneos respecto del mismo sistema de coordenadas, si se importan todas las nubes de puntos, se dispone de una referencia común a todos los puntos (ver Figura 59), por lo que solamente hace falta reconstruir la superficie por ingeniería inversa usando como único conjunto de puntos la suma de todas las nubes importadas. Eliminando los utilizados como “cero pieza”.

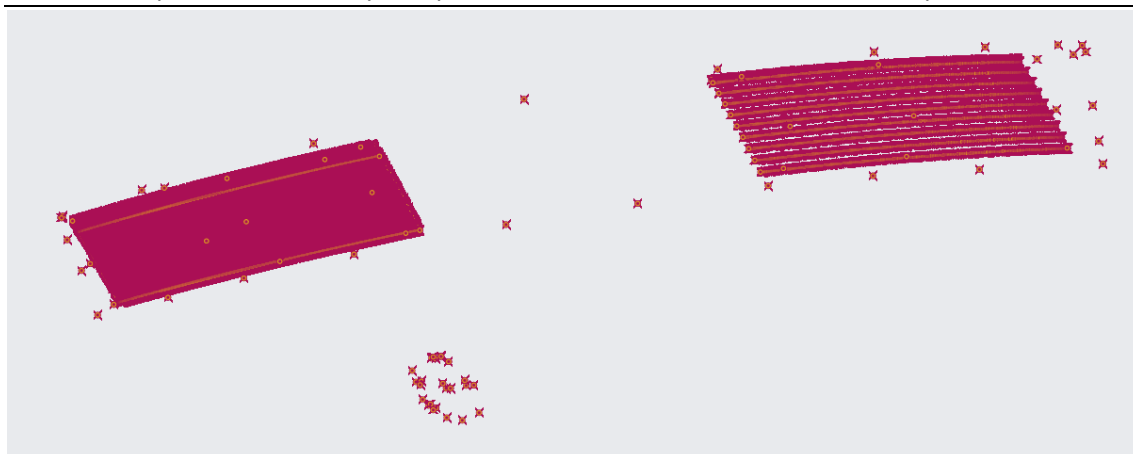


Figura 59 Nubes de puntos de diferentes escaneos realizados con el mismo sistema de coordenadas

Tras realizar una reconstrucción rápida de la superficie ejemplo en Catia, con un valor de vecindad elevado para recubrir el espacio que se ha dejado entre las nubes de puntos de los barridos, se ha obtenido la malla de la Figura 60.

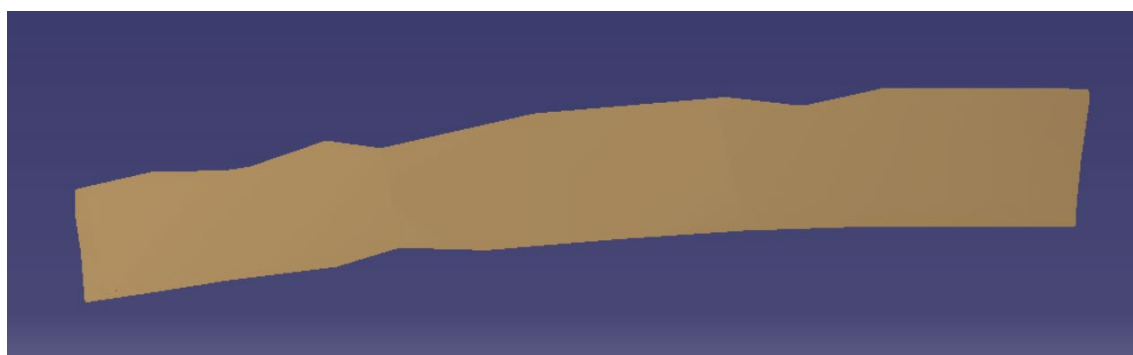


Figura 60. Malla de la superficie obtenida con diferentes nubes de puntos

5.4.2. Reconstrucción de la pieza del sistema de coordenadas

A partir de los diferentes puntos que se han palpado sobre la pieza real para construir el “cero pieza” (puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 de la Figura 37), se debe reconstruir la forma de prisma rectangular para ubicar el sistema de coordenadas en el mismo sitio en todos los escaneos para poder hacer la comparación de forma correcta.

Tras crear los planos a partir de los 6 puntos, se obtiene la geometría de la Figura 61.

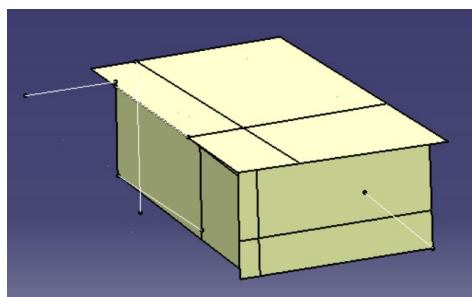


Figura 61. Geometría del prisma para ubicar el sistema de coordenadas

CAPÍTULO 6. ESCANEO MEDIANTE EINSCAN PRO 2X

En este capítulo se presenta la técnica de escáner EinScan Pro 2X. Es una de las dos técnicas de escaneo óptico que se va a utilizar para comparar las tolerancias respecto a la pieza de referencia (escaneo mediante CMM y pieza patrón del capítulo 8). Es una forma de obtener la “precisión” de una técnica de escaneo, comparándola con una técnica mucho más precisa, el palpado desde una CMM.

6.1. ¿Qué es EinScan Pro 2X?

EinScan Pro 2X es un escáner 3D de mano portátil desarrollado por SHINING 3D (ver Figura 62). Está diseñado para el escaneo de precisión de objetos pequeños a medianos. Funciona utilizando la tecnología de escaneo de luz estructurada para capturar modelos 3D detallados de objetos. (Top3DShop, 2020)



Figura 62. Escáner EinScan Pro 2X (Top3DShop, 2020)

La tecnología de luz estructurada del EinScan Pro 2X funciona proyectando un patrón de líneas paralelas entre sí de luz sobre el objeto a escanear mediante una fuente de luz LED que lleva incorporado.

Las cámaras del escáner capturan las imágenes del patrón proyectado, y la forma en que el patrón se deforma al chocar con las superficies del objeto permite al software (EXScan Pro) calcular las distancias y formas.

EinScan Pro 2X posee un Diseño Modular (ver Figura 63), es decir, admite varios complementos, como el Color Pack para capturar texturas y el Industrial Pack para mejorar la precisión con un trípode. (Top3DShop, 2020)



Color Pack



Industrial Pack

Figura 63. Complementos de EinScan Pro (Top3DShop, 2020)

6.2. Escaneo de la pieza de carrocería con Einscan

6.2.1. Procedimiento de escaneo

A la hora de escanear, el escáner no detectaba la superficie, ya que es demasiado brillante y oscura. Por este motivo, se decidió cubrir con un quitamanchas en seco que deja unos polvos blancos sobre la parte de la pieza a escanear (ver Figura 64). Gracias a que el polvo blanco deja la superficie con una apariencia mate, no reflectante, por lo que la superficie cubierta por el producto se puede escanear perfectamente.

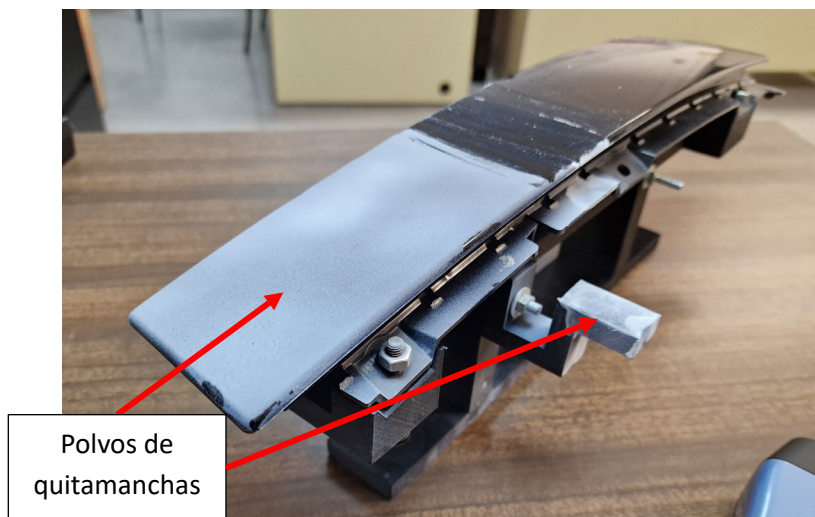


Figura 64. Pieza con la zona a escanear recubierta con polvos de quitamanchas

Una vez en condiciones para ser escaneada, se sujeta con la mano el escáner EinScan y se va apuntando a la superficie de la pieza (Figura 65) para que se vaya creando la malla en el programa.



Figura 65. Escaneo manual con EinScan

6.2.2. Parámetros, interfaz y resultados de escaneo

Los parámetros utilizados para la creación de la malla son los parámetros recomendados por el programa:

1. **Número máximo de triángulos: 2500000.** Establece el límite máximo de triángulos que se pueden generar en el modelo 3D resultante. Cuanto mayor número de triángulos habrá más detalle, pero también aumentará el tamaño del archivo y el tiempo de procesamiento.
2. **Rellenar agujeros pequeños con perímetro de agujero 10.** Indica que el software debe rellenar automáticamente los agujeros pequeños en el modelo 3D que tengan un perímetro de hasta 10 unidades. Esto mejorará la integridad y la apariencia del modelo, eliminando pequeños defectos.
3. **Remove picos.** Elimina picos o artefactos no deseados en el modelo 3D que pueden ser causados por errores en el escaneo o en el procesamiento de los datos. Su eliminación ayuda a obtener un modelo más suave y preciso.

En la Figura 66 se puede ver la interfaz del programa EXScan. En la parte izquierda se encuentra en menú donde se configuran los parámetros de escaneo, y en la parte derecha se muestra la visualización de la malla escaneada. Al exportar dicha malla se obtendría el fichero resultado del escaneo.

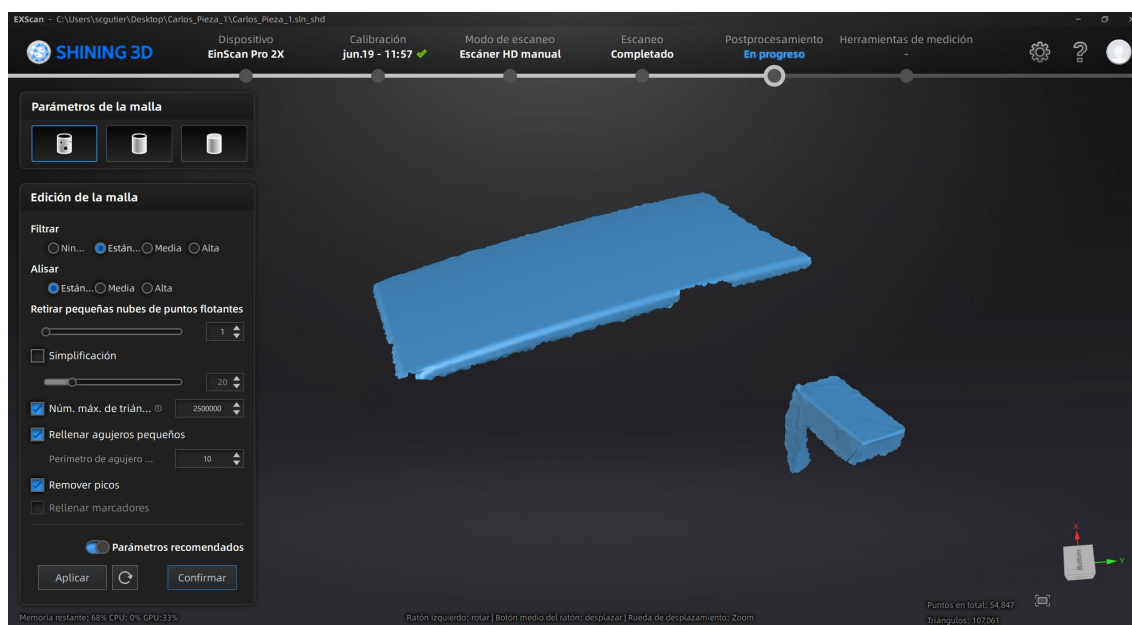


Figura 66. Interfaz del programa de escaneo para el escáner EinScan

6.3. Pros y Contras de EinScan Pro 2X

En este apartado se presenta una lista de los pros y contras de utilizar EinScan Pro 2X para escanear una superficie.

Pros:

- **Precisión:** Se pueden obtener buenos valores de tolerancias (ver capítulo 9), aunque no llega a los niveles de precisión de una CMM. Además, ofrece mejor precisión que el escáner HP 3D Scan.
- **Velocidad:** Puede capturar hasta 1500000 puntos por segundo, lo que permite una rápida recolección de datos. (Top3DShop, 2020)
- **Versatilidad:** Presenta múltiples modos de escaneo (Handheld HD, Handheld Rapid, Fixed y Auto Scan) y métodos de alineación, haciéndolo adaptable a varias aplicaciones. (Top3DShop, 2020)
- **Complementos:** Soporta complementos como el Color Pack para escaneo de texturas y el Industrial Pack para una mayor precisión. (Top3DShop, 2020)
- **Portabilidad:** Diseño ligero y ergonómico, lo que facilita su uso y transporte. (Top3DShop, 2020)

Contras:

- **Sensibilidad a la Iluminación:** Requiere condiciones de iluminación controladas para un rendimiento óptimo, ya que la luz ambiental puede afectar la calidad del escaneo.
- **Coste:** Inversión inicial más alta en comparación con algunas otras tecnologías de escaneo 3D. (Precio: entre de unos 7000 € sin complementos)
- **Limitaciones en Superficies:** Tiene dificultades con superficies muy brillantes o transparentes, que pueden requerir preparación adicional, como la aplicación de un spray mate o capa que lo evite.
- **Coste extra en módulos opcionales:** Algunas funciones, como el escaneo de color, requieren módulos adicionales, lo que puede aumentar el coste total. (Top3DShop, 2020)

CAPÍTULO 7. ESCANEEO MEDIANTE HP 3D SCAN

De la misma forma que se ha presentado la técnica de escaneo EinScan Pro en el capítulo 6; en este capítulo se presenta otra técnica con la que comparar tolerancias, en este caso, el escáner de luz estructurada HP 3D Scan.

7.1. ¿Qué es HP 3D Scan?

El HP 3D Scan es un escáner que utiliza la tecnología de escaneo de luz estructurada para capturar las dimensiones físicas de un objeto y crear un modelo 3D del mismo.

De forma equivalente a EinScan Pro, el funcionamiento consiste en proyectar una serie de patrones de luz con forma de cuadrículas y líneas paralelas sobre el objeto mediante un proyector (cañón de video) (ver Figura 67).

Dos cámaras, que miran desde diferentes ángulos capturan cómo se deforman los patrones al incidir sobre la superficie del objeto (ver Figura 68) y el software mediante análisis reconstruye el modelo 3D. El objeto, al estar en una plataforma giratoria, gira el número de veces y grados especificados por el usuario, y en cada posición se crea un modelo 3D.

Una vez se han terminado todos los escaneos, el software intenta unir todos ellos (no siempre de forma exitosa), lo cual introduce una fuente de error en el modelo escaneado.

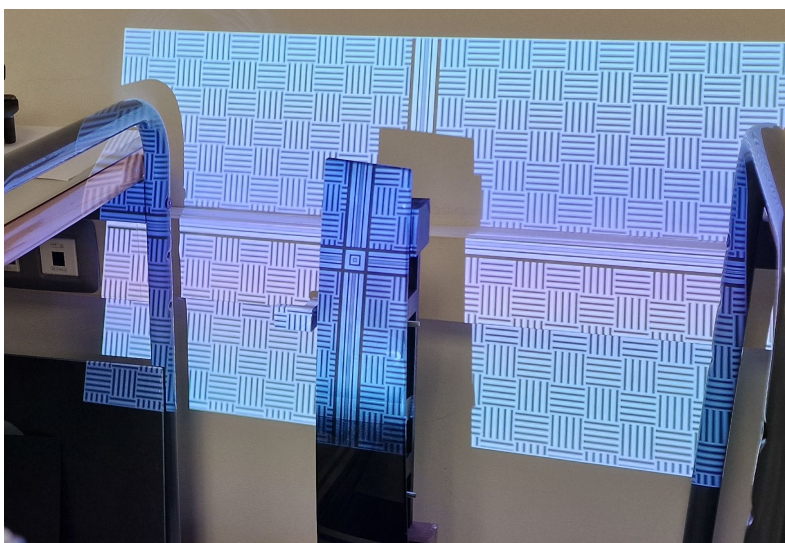


Figura 67. Patrones proyectados en la pieza en el escáner de luz estructurada mediante HP 3D Scan

7.2. Escaneo de la pieza de carrocería mediante HP 3D Scan

7.2.1. Proceso de calibración y escaneo

Para escanear el trozo de la superficie de la pieza deseada, lo primero que hay que hacer es situarla en su plataforma giratoria a una distancia a la que quepa toda la zona que se desea escanear en el plano de visión de las cámaras.

En la Figura 68 se puede apreciar el conjunto proyector-cámaras y la pieza a escanear sobre la plataforma giratoria.

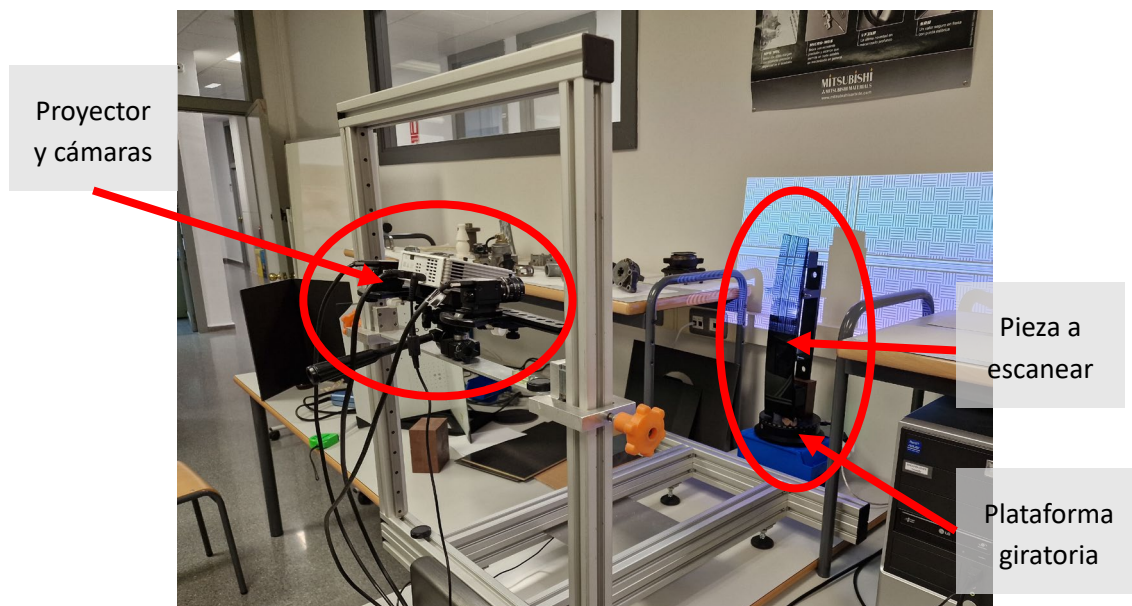


Figura 68. Estructura del escáner HP 3D Scan

Para comenzar el escaneo, hay que realizar la calibración para la distancia a la cual se va a situar la pieza. Se comienza midiendo la distancia a la cual se encuentra la zona a escanear respecto al conjunto proyector-cámaras. Una vez se tiene esta medida, se sitúa el panel de calibración a dicha distancia, asegurándose que la distancia focal del proyector coincida (es decir, que la imagen proyectada se vea nítida). Tras esto, se clic en el botón de calibración para que el programa ajuste los parámetros, y cuando haya terminado se observarán 2 cuadros con apariencia de tablero de ajedrez (ver Figura 69). Tras esto se puede proceder a escanear la pieza.

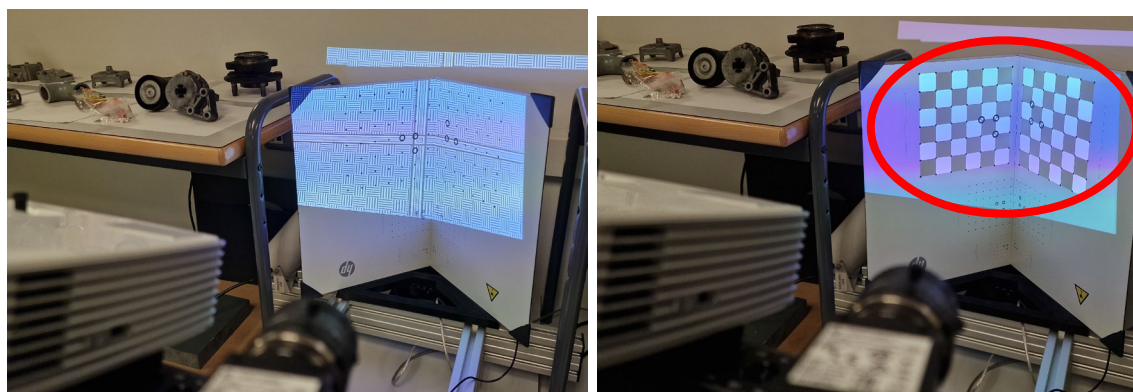


Figura 69. Patrones de calibración del escáner HP 3D Scan

Al igual que con el escáner Einscan Pro 2X, fue necesario recubrir la superficie a escanear la pieza con polvo en spray para eliminar los reflejos y conseguir que el escáner detecte la pieza.

Para el escaneo de esta pieza, se realizaron 10 escaneos intermedios con una rotación total de 360°. Puesto que solo se quiere obtener el modelo 3D de la superficie y de la pieza que ubica el sistema de coordenadas, varios de esos escaneos se tuvieron que eliminar.

Una vez realizados los 10 escaneos, el programa HP 3D Scan los superpone, por lo que hay que tener en cuenta que en este proceso se puede introducir bastante error si no lo hace bien, aunque se pueden eliminar las superposiciones no deseadas (ver Figura 70)

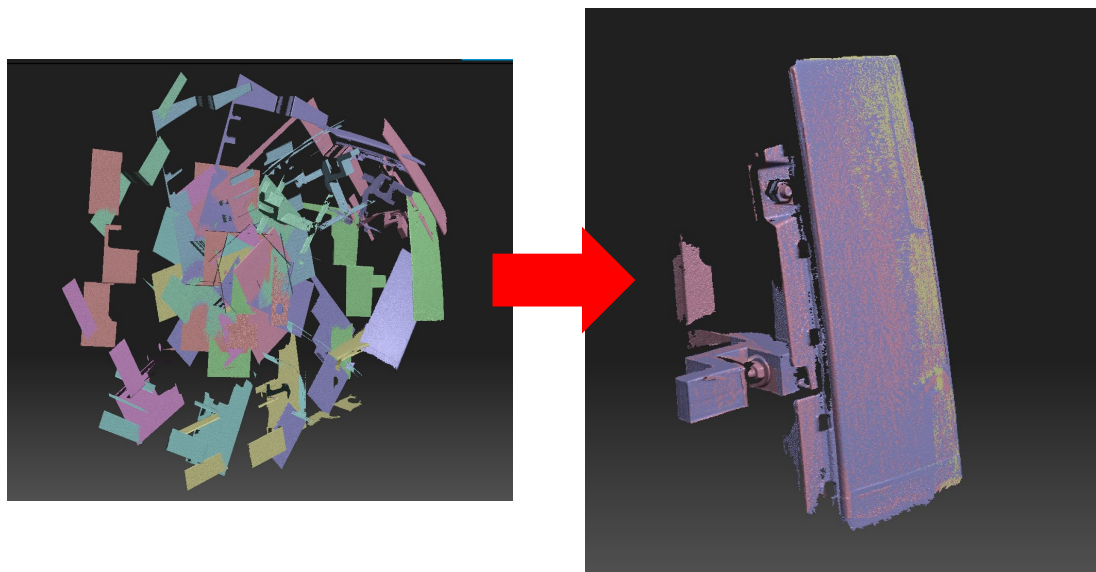


Figura 70. Proceso de fusión de los escaneos

7.2.2. Resultado del escaneo

Tras haber realizado todo el proceso de escaneo, se exporta la malla, y se obtiene un resultado como el que se muestra en la Figura 71. Como puede aparecer parte del entorno de escaneo, es necesario realizar una limpieza de la malla de las partes no útiles.

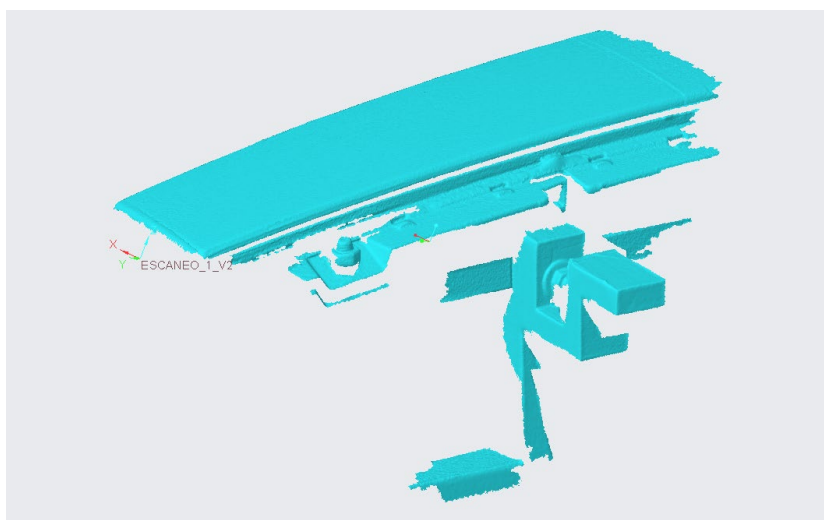


Figura 71. Resultado de escaneo de la pieza de carrocería en el escáner HP 3D Scan

7.3. Pros y contras de HP 3D Scan

En este apartado se presenta una lista de los pros y contras de utilizar HP 3D Scan para escanear una superficie.

Pros:

- **Precisión:** Se pueden obtener buenos valores de tolerancias (ver capítulo 9), aunque es algo menos preciso que el escáner EinScan, y tampoco puede llegar a los niveles de precisión de una CMM.
- **Facilidad de uso:** El escáner es fácil de usar y no requieren una gran experiencia para obtener buenos resultados.
- **Versatilidad:** Pueden escanear objetos de diferentes tamaños y formas, desde pequeños componentes hasta piezas más grandes.

Contras:

- **Sensibilidad a la iluminación:** El escáner es muy sensible a las condiciones de iluminación y la luz ambiental puede afectar la calidad del escaneo.
- **Limitaciones en superficies:** Las superficies muy brillantes pueden ser difíciles de escanear con precisión. Para ello es necesario cubrirlas con pinturas/espráis mates.
- **Requiere calibración frecuente:** Para mantener la precisión, es necesario calibrar el escáner de forma frecuente. Sobre todo, si se cambia la distancia entre pieza y conjunto proyector-cámaras.
- **Coste:** Es más caro en comparación con otras tecnologías de escaneo 3D (precio aproximado: 4000€)
- **Tamaño del equipo:** A pesar de que se puede utilizar el conjunto proyector-cámaras, mediante montaje en un trípode; si se sitúa en una estructura fija (como el equipo empleado en este trabajo), esta estructura ocupa un tamaño considerable.

CAPÍTULO 8. ANILLO PATRÓN (SEGUNDO SISTEMA)

8.1. Introducción

En capítulos anteriores, se ha escaneado una pieza utilizando una máquina de medir por coordenadas (CMM) y mediante dos técnicas de escaneo óptico (HP 3D Scan y EinScan Pro). En este capítulo se pretende tomar medidas con los mismos equipos (CMM, HP 3D Scan, EinScan) para un anillo patrón, que es un elemento de referencia para la medida de diámetros interiores. Al conocer las dimensiones reales de este anillo, se puede utilizar para evaluar la precisión y tolerancias de la CMM, HP 3D Scan y EinScan.

En este capítulo solo se presenta el procedimiento para escanear el anillo con HP 3D Scan y EinScan, y las tolerancias de la CMM. En el capítulo 9 se presentará la comparación entre todas las técnicas.

El Anillo Patrón que se va a medir se puede ver en la Figura 72. Este anillo patrón solo garantiza tolerancias en diámetro (dimensión $70,0 \pm 0.01$ mm a temperatura de 20°C) pero, puesto que tiene muy buen acabado superficial de las caras planas, serán aprovechadas para comparar entre los distintos equipos tolerancias como la planitud.

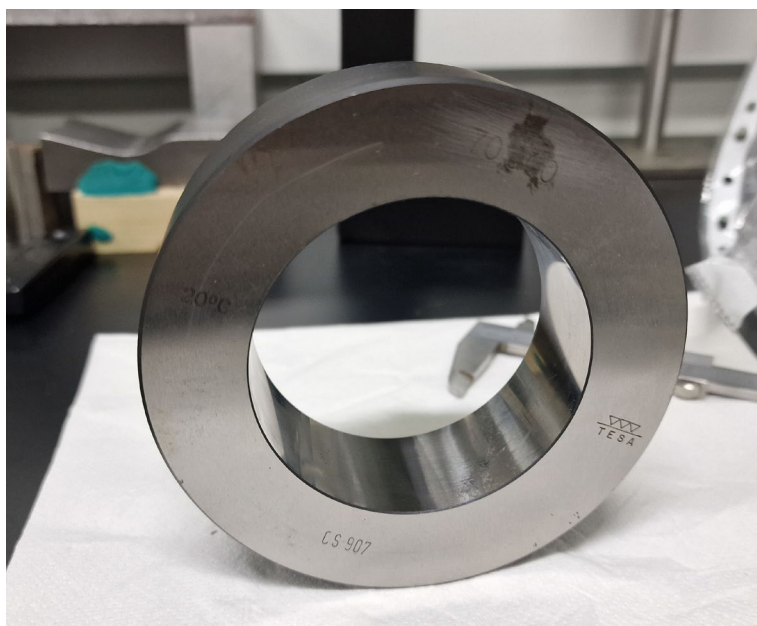


Figura 72. Anillo Patrón

Se van a medir puntos en ambas caras y en el cilindro interior, verificando las tolerancias de:

- Planitud de ambas caras
- Paralelismo entre ambas caras
- Cilindricidad del cilindro interior

8.2. Escaneo del anillo patrón en la CMM

La posición del anillo patrón en la CMM se puede ver en la Figura 73. Se encuentra situado en un soporte de madera para que sea posible palpar puntos de la parte inferior sin que el cabezal choque con la mesa. El hecho de que esté en posición vertical es con la finalidad de realizar la medida en ambas caras y el cilindro interior con un solo programa, lo cual es una ventaja, pero a la vez introduce la dificultad de alineamiento manual. En caso de poner el cilindro con una de sus caras tocando la mesa, se eliminaría el problema de alineamiento, pero habría que realizar varios programas para el palpado debido a la necesidad de mover la pieza y fusionar los resultados, lo cual introduciría un error.

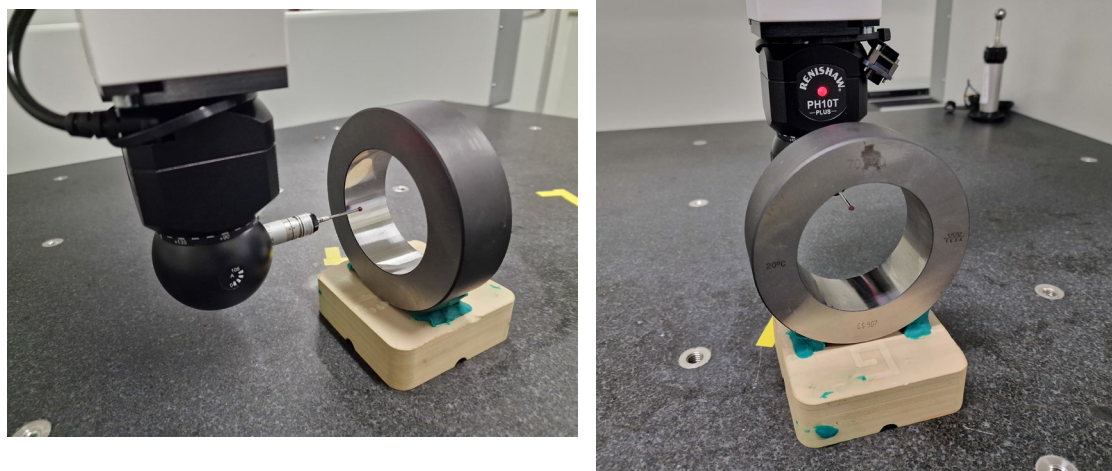


Figura 73. Posición del anillo patrón en la CMM

8.2.1. Problema de alineamiento del anillo patrón en la CMM

Como se ha comentado, el principal problema para palpar los puntos del interior del anillo para verificar la cilindridad es el alineamiento del mismo respecto a la mesa, ya que debe de estar posicionado de forma coaxial a la sonda, ya que, si no, al realizar el palpado a determinada profundidad, la parte más superior de la sonda colisionaría con la pieza en vez de la esfera de palpado (ver Figura 74)

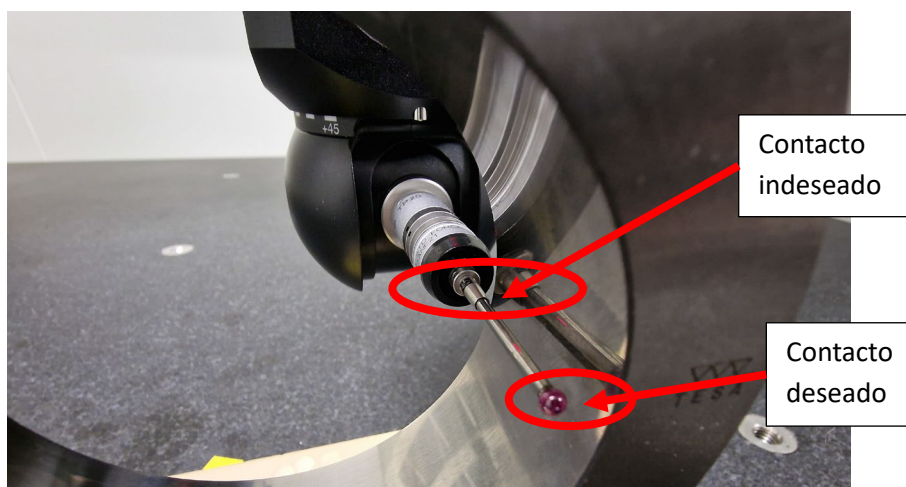


Figura 74. Problema de alineamiento del anillo patrón en la máquina

Para intentar reducir al máximo el desalineamiento causado por la necesidad de alineamiento manual, se emplearon unas escuadras para el proceso (ver Figura 75)



Figura 75. Escuadras utilizadas para alinear correctamente el anillo patrón

8.2.2. Tolerancias del anillo patrón de la CMM

Tras realizar las 10 mediciones, las tolerancias que se obtuvieron para el anillo patrón utilizando la CMM fueron las que se muestran en la Tabla 1.

Antes de consultar los valores, hay que recordar que el anillo patrón solo garantiza la tolerancia de cilindricidad del cilindro interior ($70,0 \pm 0.01$ mm a temperatura de 20°C), pero se van a medir también planitud y paralelismo, para establecer un protocolo de verificación, sobre unas caras planas.

Nº escaneo	Cilindricidad del cilindro interior	Planitud cara 1	Planitud cara 2	Paralelismo cara1/cara2
1	0.0049	0.0109	0.014	0.0182
2	0.0056	0.0035	0.0103	0.014
3	0.0048	0.0109	0.0102	0.0182
4	0.0048	0.0113	0.0038	0.0111
5	0.0049	0.0122	0.013	0.0201
6	0.0043	0.0115	0.0126	0.0177
7	0.0043	0.0037	0.0036	0.0052
8	0.0042	0.0108	0.0111	0.0167
9	0.0043	0.0108	0.0048	0.007
10	0.005	0.0031	0.0044	0.006

Tabla 1. Tolerancias del anillo patrón calculadas con las mediciones en CMM

8.2.2.1. Análisis de Repetibilidad

- **Cilindricidad del Cilindro Interior.** Los valores obtenidos de cilindruidad están en el rango 0.0042 - 0.0056 mm. Se encuentran todos dentro de un margen pequeño, lo que indica que la CMM tiene buena precisión y repetibilidad. Además, se encuentran dentro de la tolerancia de 10 μ m.
- **Planitud Cara 1.** Los valores oscilan entre 0.0031 y 0.0122. Aquí se observa una mayor variación, especialmente en los escaneos 2 (0.0035), 7 (0.0037), y 10 (0.0031), que son significativamente más bajos que el resto.
- **Planitud Cara 2.** La variación aquí es bastante menor, con valores entre 0.0036 y 0.014. Sin embargo, los valores 1 y 9 (0.014 y 0.0048) muestran los extremos de la variabilidad. La mayoría de los otros valores están cercanos entre sí, lo que es una señal positiva de consistencia.
- **Paralelismo Cara 1/Cara 2.** Los valores van desde 0.0052 hasta 0.0201. Existe una variabilidad considerable en estos valores, con algunos picos notables en los escaneos 5 y 1 (0.0201 y 0.0182).

8.2.2.2. Conclusión

La mayoría de los valores para las diferentes características están dentro de un rango estrecho, lo cual es indicativo de una buena repetibilidad y precisión general de la máquina. Sin embargo, la variabilidad observada en la planitud de la Cara 1 y el paralelismo entre Cara 1 y Cara 2 demuestra que no están pensadas para garantizar planitud y paralelismo, ya que la rugosidad o pequeñas imperfecciones, podrían estar influyendo en las mediciones.

8.3. Posiciones de escaneo del anillo patrón para HP 3D Scan y EinScan Pro

En este apartado se muestran las dos posiciones de escaneo necesarias para el anillo patrón que se utilizan tanto en el escáner HP 3D Scan como en EinScan Pro. Son necesarias 2 posiciones diferentes porque con una sola posición no se consiguen escanear todas las caras.

Como se podrá observar en la Figura 76 y Figura 77, para el anillo patrón también es necesario escanear con la pieza recubierta de polvo, ya que la superficie es muy brillante y no se detecta la pieza

8.3.1. Posición 1 Medida de cilindruidad

En la Figura 76 se puede ver la posición para medir la cilindruidad. Cuando la plataforma gire, la única zona que no se escaneará, es la base inferior del anillo, por lo que no se puede medir paralelismo entre caras ni planitud de la cara inferior.

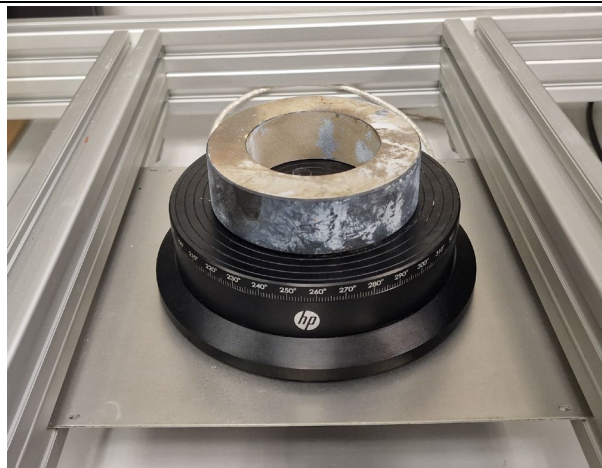


Figura 76. Posición del anillo patrón para la medida de cilindridad

8.3.2. Posición 2 Medida de planitud y paralelismo

En la Figura 77 se puede ver la posición para medir la planitud y paralelismo. Cuando la plataforma gire, la única zona que no se escaneará, es la parte superior del cilindro interior, por lo que no se puede medir la cilindridad de dicho cilindro con el resultado de este escaneo.

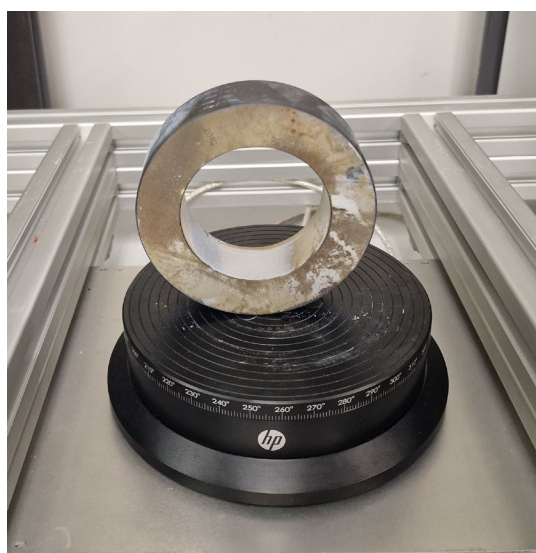


Figura 77. Posición del anillo patrón para la medida de planitud y paralelismo

CAPÍTULO 9. VERIFICACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE ESCANEO

9.1. Introducción

En este capítulo se evalúa/compara la precisión de los escáneres HP 3D Scan y EinScan respecto a la CMM para la pieza de carrocería y respecto a las dimensiones y formas seleccionadas en el capítulo anterior para el anillo patrón.

Como el sistema de medición CMM es mucho más preciso que el resto de sistemas (HP 3D Scan y EinScan), se van a emplear los resultados obtenidos en la CMM como referencia.

9.1.1. Definición del concepto de presión, exactitud y repetibilidad

La precisión, la exactitud y la repetibilidad son tres conceptos clave en la metrología.

- La **precisión** se refiere a la cercanía de las mediciones entre sí, es decir, como de consistentes son los resultados de mediciones repetidas. (Fernandes, n.d.)
- La **exactitud** es la cercanía del valor de una o más mediciones independientes al valor real. (Fernandes, n.d.)
- La **repetibilidad** es la variación que se observa cuando el mismo operador mide la misma parte muchas veces, usando el mismo sistema de medición, bajo las mismas condiciones. Es decir, es la capacidad de un sistema para producir los mismos resultados al realizar mediciones idénticas en las mismas condiciones en un corto período de tiempo. (Minitab, n.d.)

Mientras que la precisión y la repetibilidad se refieren a la consistencia de los resultados de las mediciones, la exactitud se refiere a como de cerca está el resultado de la medición del valor real.

En la Figura 78 se muestra una analogía de un tiro a una diana para ver la diferencia entre la precisión y la exactitud.

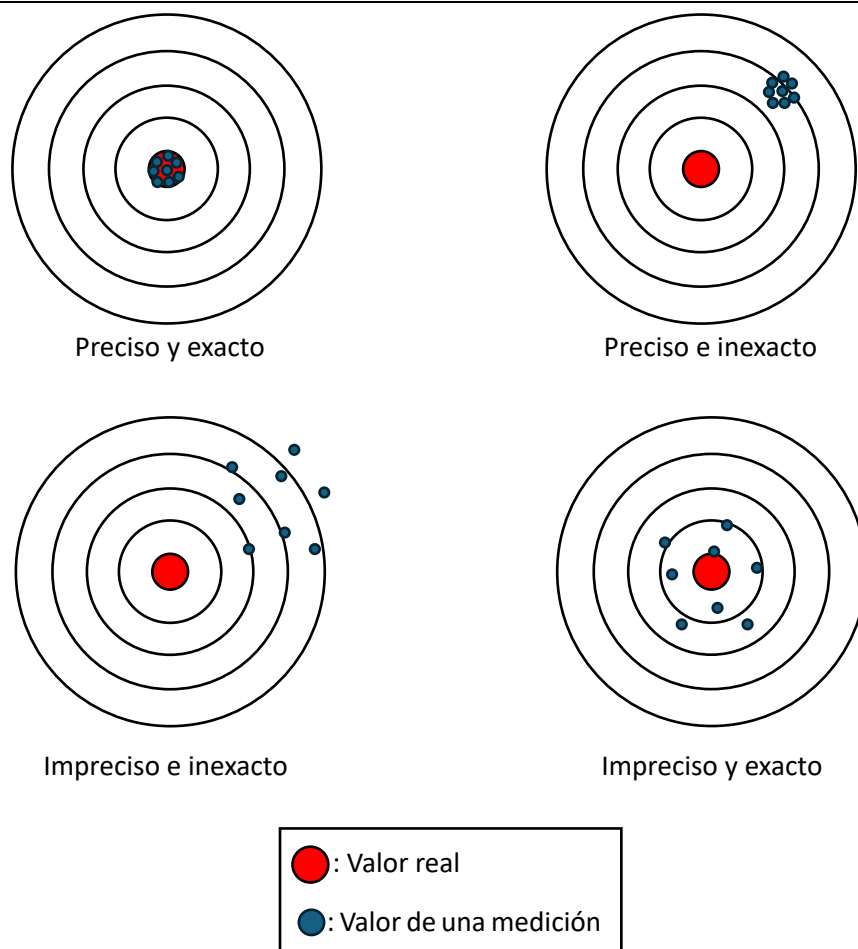


Figura 78. Diferencia entre precisión y exactitud

9.2. Modificación del sistema de coordenadas de los escaneos de HP 3D Scan y Einscan para la pieza de carrocería

9.2.1. Procedimiento para la modificación del sistema de coordenadas de los escaneos de HP 3D Scan y Einscan.

El sistema de coordenadas de los escaneos realizados mediante HP 3D Scan y EinScan deben coincidir con el de la CMM para facilitar las comparaciones, por lo que es necesario cambiarlos.

Para ello, se importa el resultado del escaneo en Catia y se reconocen los planos de la pieza que se usarán para ubicar el sistema de coordenadas. Se emplea el comando **Surface Creation -> Basic Surface Reconstruction...** (ver Figura 79)

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

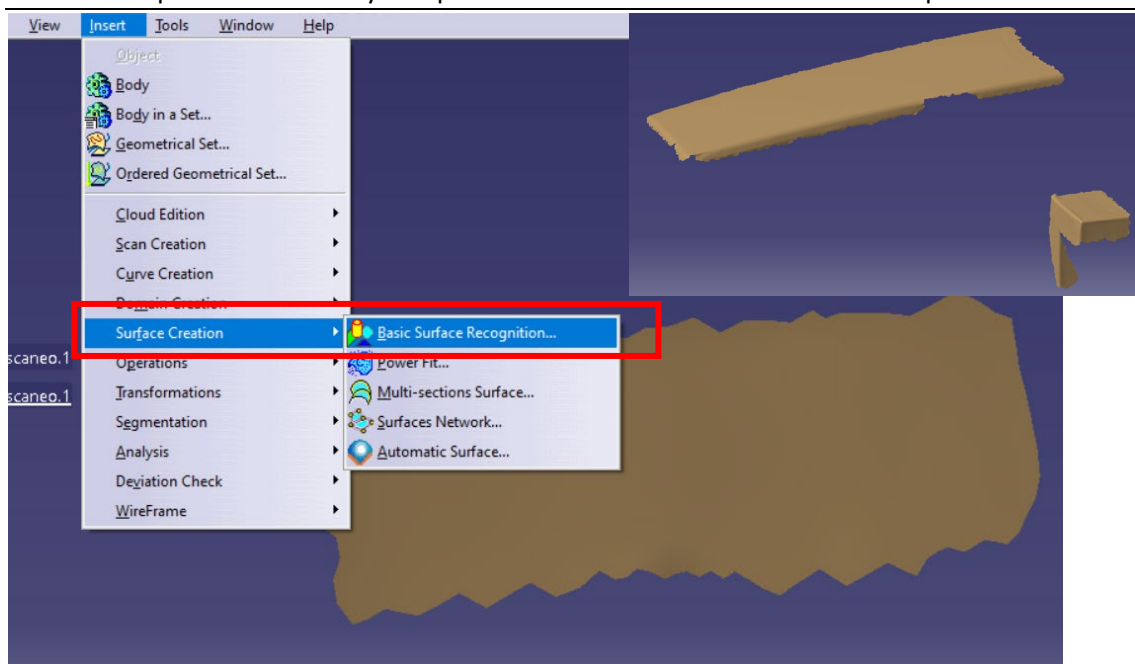


Figura 79. Reconocimiento de planos en Catia

Se hace el reconocimiento de los 3 planos con extensión de los mismos, y luego se recortan entre ellos (ver Figura 80)

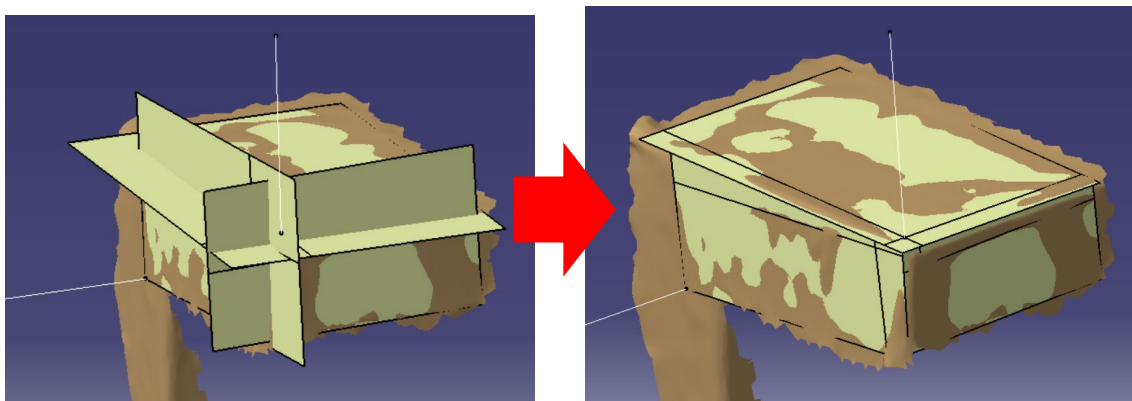


Figura 80. Extensión y recorte de los planos en Catia

Tras disponer de la pieza reconstruida, se utiliza PTC Creo para cambiar el sistema de coordenadas al deseado. En la Figura 81 se muestra la ventana de PTC Creo en la que, a partir de la selección de los 3 planos, se puede situar el origen del sistema de coordenadas en el lugar deseado.

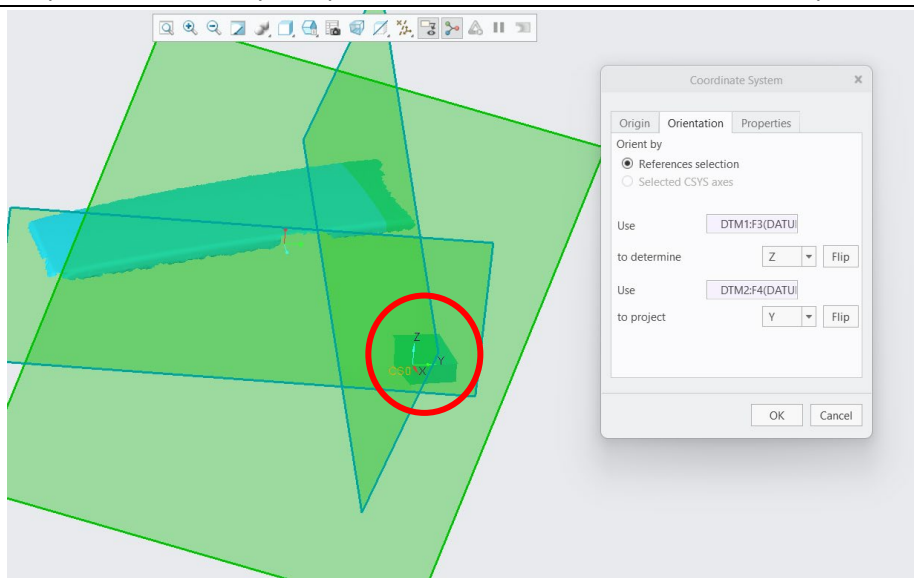


Figura 81. Cambio del origen de coordenadas al lugar deseado mediante PTC Creo

Tras haber modificado el sistema de coordenadas, para comprobar que las coordenadas de los puntos están referidas al nuevo sistema de coordenadas, se abren en formato xyz simultáneamente el nuevo sistema de coordenadas (izquierda) y el sistema de coordenadas original (derecha) (ver Figura 82)

part_con_sc - Copystl	part_con_scxyz	part_con_sc_original - Copystl	part_con_sc_originalxyz				
1	-107.364899	-88.979271	27.215790	1	27.850220	-8.871166	371.543213
2	-106.742798	-89.253601	27.235380	2	27.349279	-8.871086	371.083099
3	-107.142998	-88.540199	27.314510	3	27.849091	-8.371071	371.502014
4	-79.568787	-112.420197	25.535931	4	1.350222	-19.371149	348.906403
5	-79.952400	-111.717003	25.635530	5	1.849026	-18.871071	349.297089
6	-80.168640	-112.159599	25.543711	6	1.849694	-19.371120	349.328705
7	-72.731850	-91.737762	29.285980	7	3.349885	2.628891	349.661102
8	-73.326630	-91.480492	29.301060	8	3.849652	2.628899	350.073914
9	-73.530602	-91.930473	29.223391	9	3.848932	2.128918	350.085388
10	-73.182793	-67.292007	32.821522	10	11.348700	25.128910	355.990906
11	-72.588470	-67.548920	32.805351	11	10.848640	25.128901	355.579315
12	-72.986801	-66.837044	32.889359	12	11.349970	25.628910	355.993011
13	-65.718369	-119.482903	24.989080	13	-10.650420	-20.371111	339.057587
14	-65.131622	-119.734901	24.962830	14	-11.150440	-20.371111	338.659485
15	-65.506271	-119.037804	25.075859	15	-10.650790	-19.871090	339.032990
16	-90.968063	-15.205650	38.347672	16	39.349579	66.128906	380.379303
17	-91.386528	-14.480570	38.402390	17	39.849491	66.628906	380.830902
18	-91.575859	-14.940050	38.345188	18	39.849289	66.128906	380.815491
19	-70.307701	-87.939392	29.950769	19	2.850137	7.128893	349.164795
20	-71.100830	-88.135536	29.894779	20	3.348612	6.628922	349.579803
21	-70.508568	-88.391281	29.876820	21	2.849147	6.628910	349.171112
22	-67.878090	-99.750740	28.206169	22	-2.649823	-2.871120	344.898102
23	-67.288361	-100.004700	28.183750	23	-3.149942	-2.871113	344.494812
24	-67.672150	-99.301682	28.284470	24	-2.650332	-2.371101	344.884705
25	-52.662281	-9.830291	37.320541	25	11.953340	86.043549	361.667389
26	-52.637039	-9.739959	37.178349	26	11.862600	86.116051	361.791992
27	-52.672661	-9.339355	37.376259	27	12.105030	86.492790	361.806702
28	-86.973389	-66.161774	32.364010	28	21.349449	20.628901	364.440887

Figura 82. Comparación del sistema de coordenadas nuevo con el original

9.2.2. Error en la reconstrucción de la pieza para la ubicación del sistema de coordenadas

Siguiendo el método para establecer el sistema de coordenadas del apartado anterior, puede aparecer un error debido a la propia imprecisión del escaneo. Este error consiste en que al reconocer las caras directamente como planos, no se forma un triedro ortogonal, ya que no son perpendiculares entre sí.

En la Figura 83 se indican los ángulos entre los planos creados mediante la reconstrucción de caras. Se puede observar que en ningún caso los planos forman 90.00° entre sí, sino que hay una pequeña desviación.



Figura 83. Ángulos entre los planos reconocidos

El error introducido en la reconstrucción de los triedros ortogonales del sistema de coordenadas se traduce en que, al alinear los sistemas de coordenadas del modelo de referencia (procedente de la CMM) y el del escaneo con los otros dispositivos (ver Figura 84), existe un *offset* angular por la incorrecta reconstrucción (ver Figura 85).

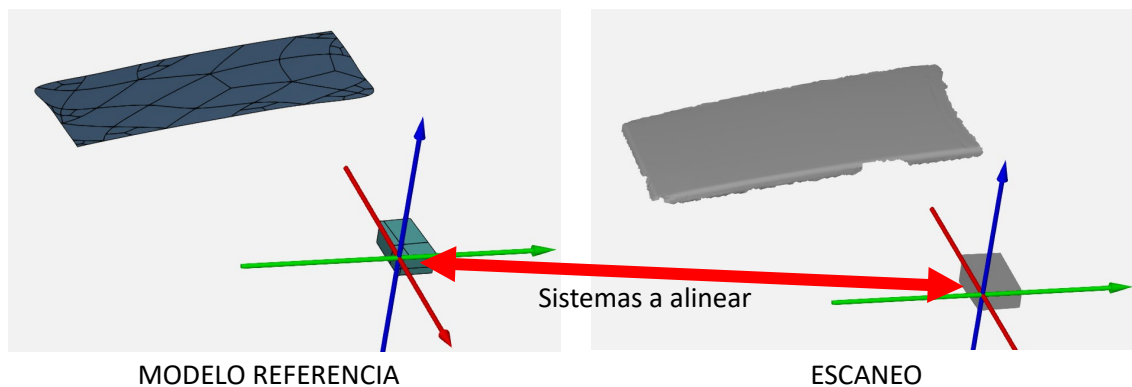


Figura 84. Sistemas de coordenadas a alinear del modelo referencia y el escaneo

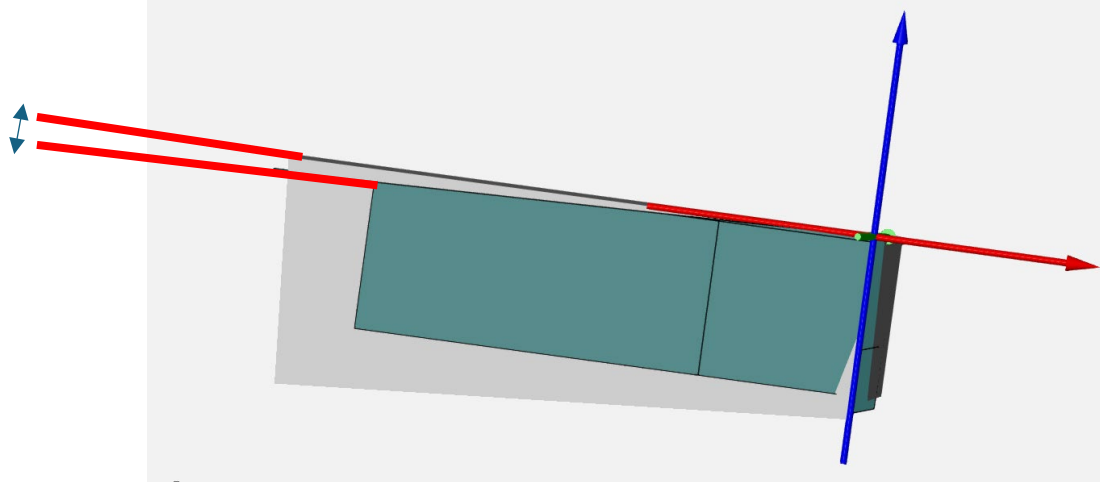


Figura 85. Offset angular debido a la incorrecta reconstrucción

Este *offset* angular se propaga a la pieza traduciéndose en un error de posición de la superficie (ver Figura 86)

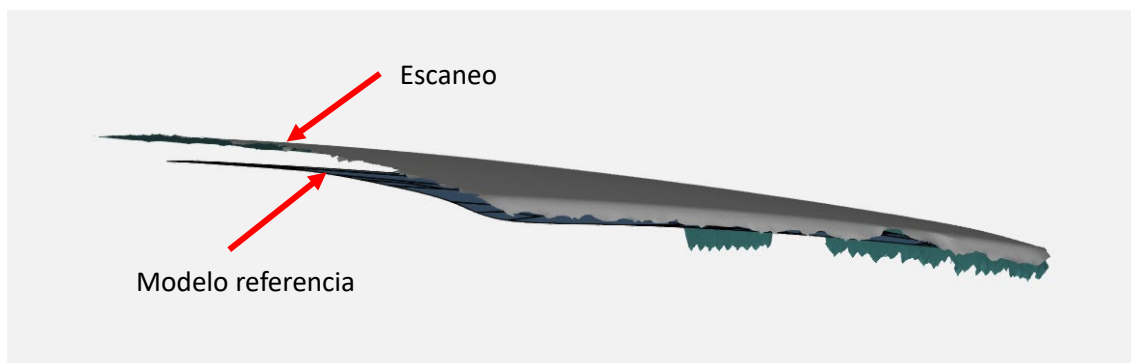


Figura 86. Error de posición de la superficie

La solución es forzar a que los planos reconocidos formen un ángulo de 90° entre sí. Para ello es necesario realizar modificaciones manuales en los planos reconocidos, lo que introducirá pequeñas diferencias en las comparaciones. Sin embargo, estas pequeñas diferencias no dejan de estar causadas por la falta de precisión del equipo de escaneo al reconstruir los planos a partir de los puntos tomados sobre los planos reales y ortogonales entre sí.

9.3. Anillo Patrón

Para hacer una verificación de la precisión de los sistemas de escaneo, se emplea en primer lugar el anillo patrón. Hay que destacar que se hace una comprobación del funcionamiento de la máquina sobre el patrón, pero no se trata de una calibración, sino que solo es para ver la respuesta del equipo

En este apartado, se presenta primero una verificación de la consistencia dimensional de la CMM, después se recopilan en una tabla las tolerancias máximas alcanzadas con la CMM que se han obtenido en el capítulo 8, para tener un orden de magnitud, y por último las tolerancias obtenidas con los escáneres HP 3D Scan y EinScan.

9.3.1. Verificación de la consistencia dimensional de la CMM en el anillo patrón

Se han realizado 10 mediciones del anillo, y en cada una de ellas se han palpado 8 puntos. En total se han palpado 80 puntos. Para cada conjunto de puntos se ha calculado la media y la desviación típica, y para la verificación de si las medidas se consideran validas, se ha empleado el criterio de rechazo de Chauvenet. En el **ANEXO E** se recopilan las coordenadas de todos los puntos.

A modo de resumen, en la Tabla 2 se recopilan los valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto.

Punto	MEDIA X	DESVIACIÓN TÍPICA X	MEDIA Y	DESVIACIÓN TÍPICA Y	MEDIA Z	DESVIACIÓN TÍPICA Z
1	48.3370	0.00030	-2.8039	0.04209	8.3535	0.00011
2	41.0300	0.00021	30.7290	0.04018	-0.1212	0.00029
3	-48.3220	0.00026	30.7250	0.02714	5.5608	0.00030
4	-35.8850	0.00010	-1.3087	0.02910	33.0690	0.00040
5	-34.0500	0.00024	-1.3120	0.02898	-33.5400	0.00038
6	19.4400	0.00144	5.0005	0.00012	-27.2920	0.00153
7	27.2910	0.00092	5.0009	0.00007	19.4380	0.00146
8	-27.2930	0.00113	10.5010	0.00012	-19.4400	0.00121

Tabla 2. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto en el anillo patrón

En la Tabla 3 se muestran los valores máximos y mínimos de los intervalos de aceptación de Chauvenet para cada coordenada de cada punto

Punto	MÍNIMO X	MÁXIMO X	MÍNIMO Y	MÁXIMO Y	MÍNIMO Z	MÁXIMO Z
1	48.3360	48.3372	-2.8864	-2.7214	8.3533	8.3538
2	41.0298	41.0306	30.6500	30.8075	-0.1218	-0.1206
3	-48.3229	-48.3219	30.6719	30.7783	5.5602	5.5614
4	-35.8852	-35.8848	-1.3657	-1.2516	33.0685	33.0701
5	-34.0502	-34.0493	-1.3689	-1.2552	-33.5411	-33.5396
6	19.4374	19.4430	5.0003	5.0007	-27.2952	-27.2892
7	27.2890	27.2926	5.0008	5.0011	19.4356	19.4413
8	-27.2957	-27.2912	10.5009	10.5014	-19.4425	-19.4377

Tabla 3. Intervalos de aceptación de Chauvenet para las medidas del anillo patrón en CMM

Finalmente, en la Tabla 4 se indica con “SI”, si se cumple el criterio de Chauvenet para la coordenada x, y y z para cada punto en cada medida, y con “NO” si no cumple para alguna coordenada. Como se puede observar, todas las medidas cumplen el criterio.

Punto	MED. 1	MED. 2	MED. 3	MED. 4	MED. 5	MED. 6	MED. 7	MED. 8	MED. 9	MED. 10
1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Tabla 4. Verificación del criterio de Chauvenet para cada medida de cada punto. Anillo Patrón

Se puede observar que utilizando el criterio de Chauvenet, todas las medidas de todos los puntos se encuentran en el intervalo, lo cual demuestra la consistencia dimensional en esta pieza patrón.

9.3.2. Tolerancias de la CMM en el escaneo del anillo patrón

La Tabla 1 del capítulo 8 recopila las tolerancias del anillo patrón calculadas con las mediciones en la CMM (Cilindricidad del Cilindro Interior, planitud de las caras, paralelismo entre caras)

En la Tabla 5 se recopilan los valores máximos obtenidos de esas medidas, para tener una idea de la magnitud que alcanza la CMM para comparar a continuación con los escáneres ópticos.

Tolerancia	Valor máximo
Cilindricidad del cilindro interior	0.0056
Planitud de una cara	0.014
Paralelismo entre caras	0.0201

Tabla 5. Valores máximos de las tolerancias de cilindricidad, planitud y paralelismo obtenidas con la CMM en el anillo patrón

9.3.3. Tolerancias de HP 3D Scan en el escaneo del anillo patrón

Como se ha comentado en el capítulo 8, son necesarias 2 posiciones diferentes de escaneo para el anillo patrón porque con una sola posición no se consiguen escanear todas las caras, y si se fusionasen los escaneos se podría introducir un error adicional. La posición 1 sirve para medir la cilindricidad y la posición 2 sirve para medir la planitud y paralelismo.

En la Figura 87, Figura 89, Figura 92, Figura 94, Figura 97 y Figura 99 se muestran gráficamente los valores de las tolerancias, y en la Tabla 6 se recopilan los mismos.

Por otro lado, en la Figura 88, Figura 90, Figura 91, Figura 93, Figura 95, Figura 96, Figura 98, Figura 100, Figura 101, se visualizan con colores las desviaciones del escaneo respecto a las dimensiones teóricas de la pieza patrón.

9.3.3.1. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad

En la Figura 87 se visualiza la tolerancia de cilindridad del escaneo 1.1. Es un valor de 0.7616 mm.

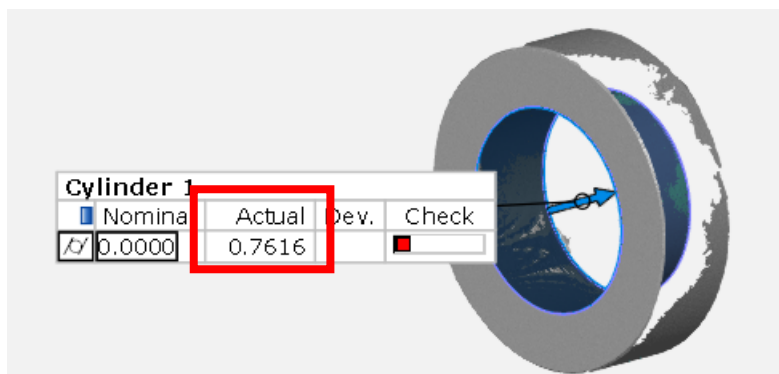


Figura 87. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner HP 3D Scan

Se puede observar que en la Figura 88, en la parte interior del anillo hay relieves indeseados que afectan al valor de la tolerancia. Los valores positivos (colores más cálidos) indican que el valor está por encima de la superficie (diámetro del anillo menor que 70 mm) y los valores negativos (colores más fríos) indican que el valor está por debajo de la superficie (diámetro del anillo mayor que 70 mm). El máximo es de 0.3807 mm y el mínimo de -1.1335.

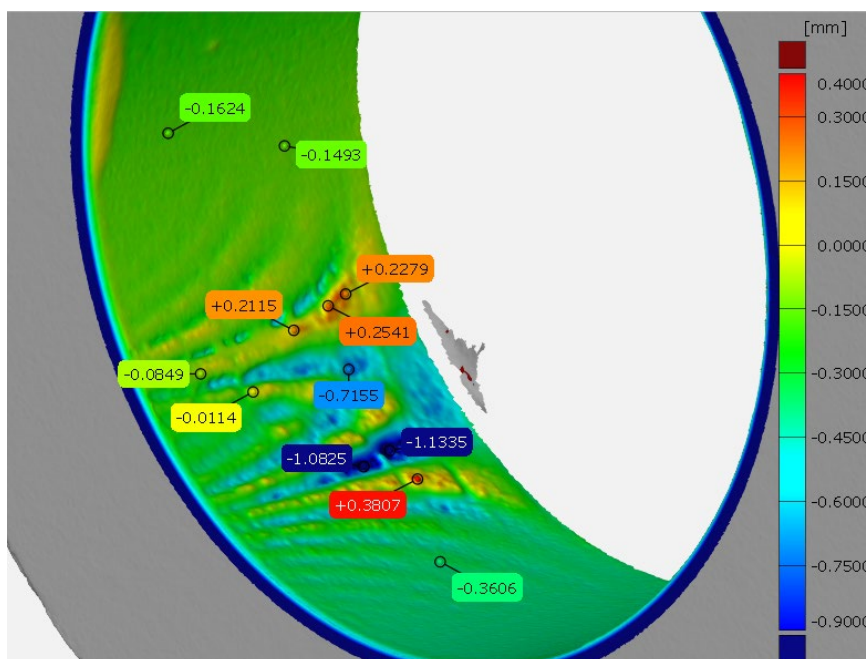


Figura 88. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 1.1. HP 3D Scan

9.3.3.2. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 89 se visualiza la tolerancia de planitud y paralelismo del escaneo 1.2. La tolerancia de planitud de la cara 1 es de 0.2419 mm y la de la cara 2 de 0.3295 mm. Por otro lado, la tolerancia de paralelismo entre caras es de 0.5341 mm.

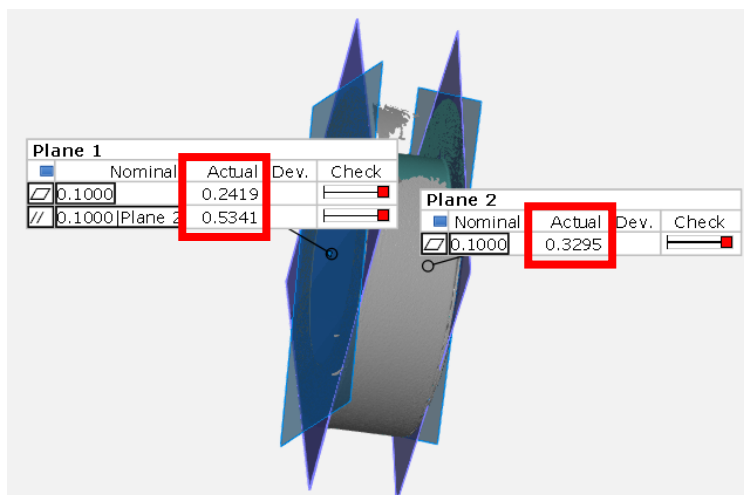


Figura 89. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 90 y Figura 91 se incluyen etiquetas con los valores de la distancia a cada cara del anillo. Se puede observar que en este escaneo los valores son bastante grandes (en torno a 0.5 mm), lo que significa que el anillo escaneado tiene menos espesor que el que debería.

En la Figura 90 hay un máximo puntual de 1.8486 mm, lo cual afecta bastante al valor de la tolerancia de planitud y paralelismo.

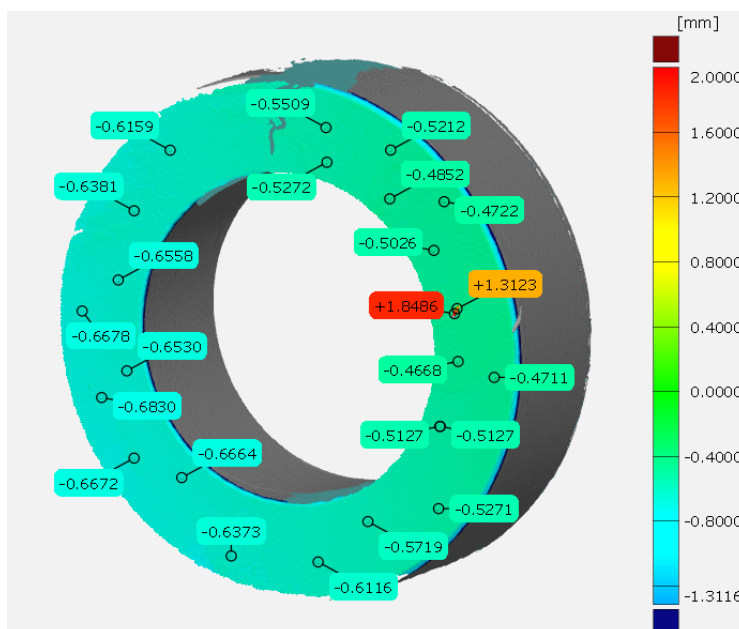


Figura 90. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 1.2. HP 3D Scan

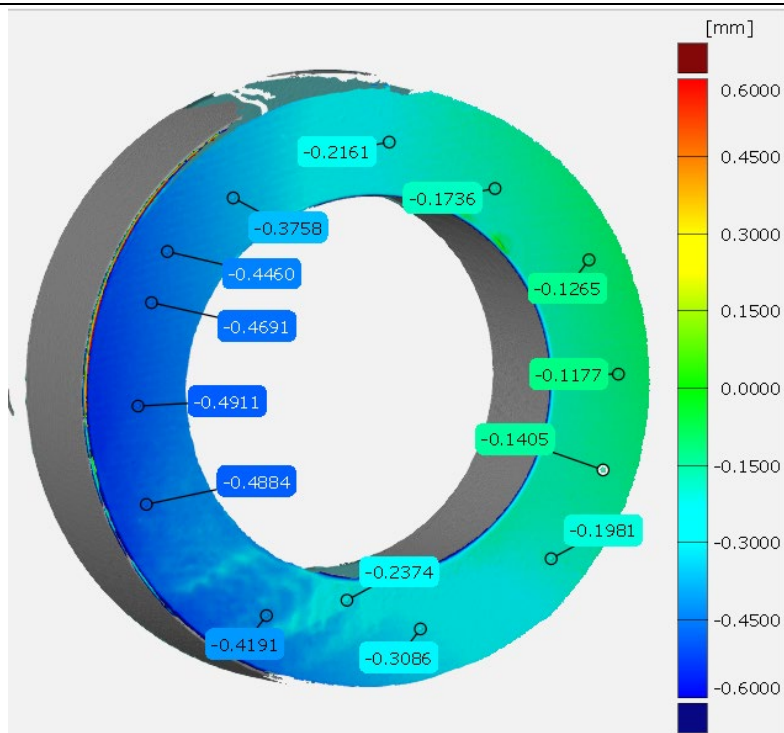


Figura 91. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 1.2. HP 3D Scan

9.3.3.3. Escaneo 2, posición 1 (2.1.). Tolerancia de cilindridad

En la Figura 92 se visualiza la tolerancia de cilindridad del escaneo 2.1. Es un valor de 1.0578 mm.

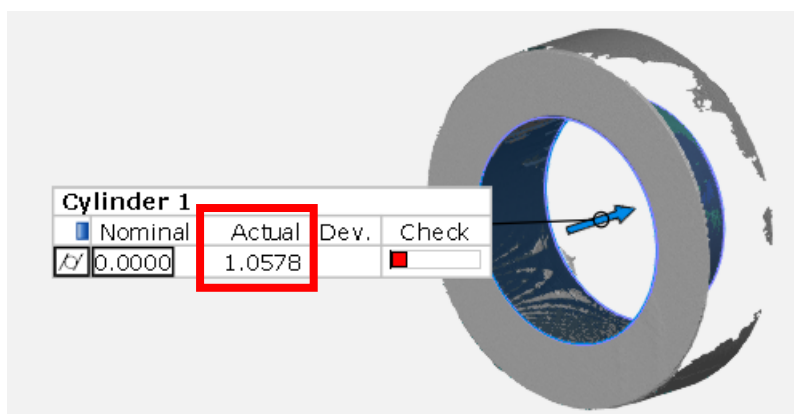


Figura 92. Escaneo 2, posición 1 (2.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner HP 3D Scan

Se puede observar que en la Figura 93, en la parte interior del anillo hay relieves indeseados que afectan al valor de la tolerancia. De nuevo, los valores positivos (colores más cálidos) indican que el valor está por encima de la superficie y los valores negativos (colores más fríos) que el valor está por debajo de la superficie. El máximo es de 0.565 mm y el mínimo de -0.9008 mm.

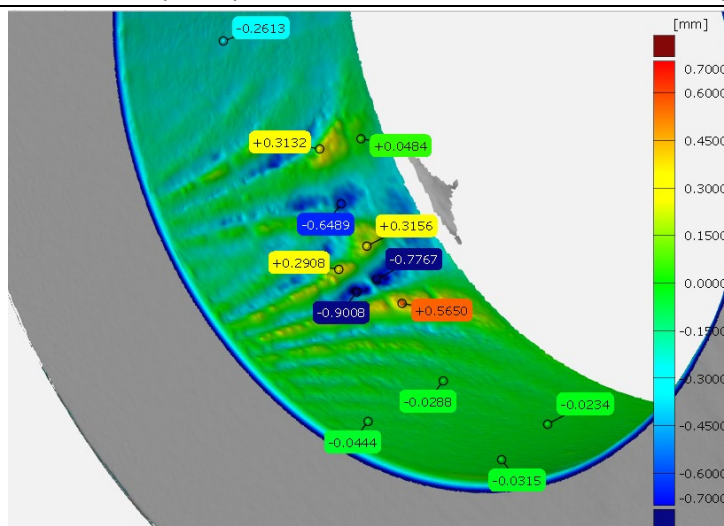


Figura 93. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 2.1. HP 3D Scan

9.3.3.4. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 94 se visualiza la tolerancia de planitud y paralelismo del escaneo 2.2. La tolerancia de planitud de la cara 1 es de 0.2149 mm y la de la cara 2 de 0.3057 mm. Por otro lado, la tolerancia de paralelismo entre caras es de 0.3803 mm.

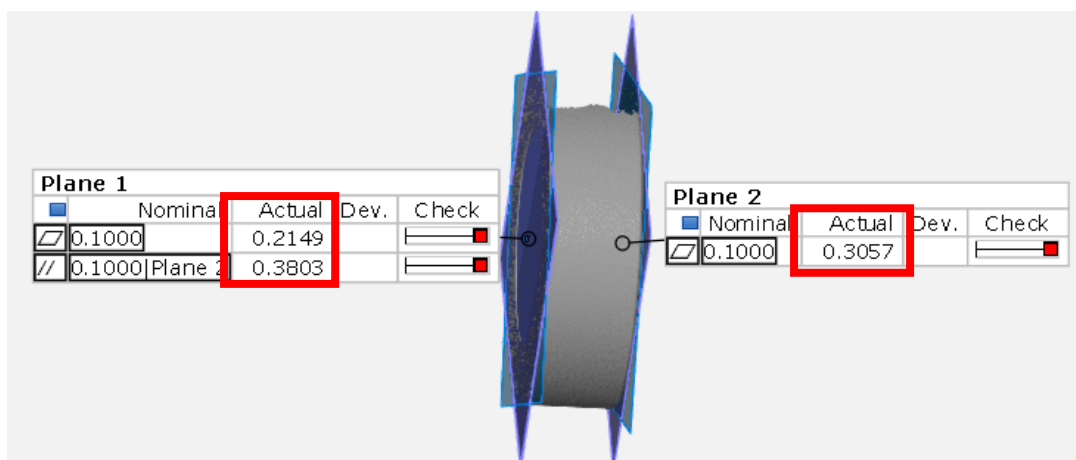
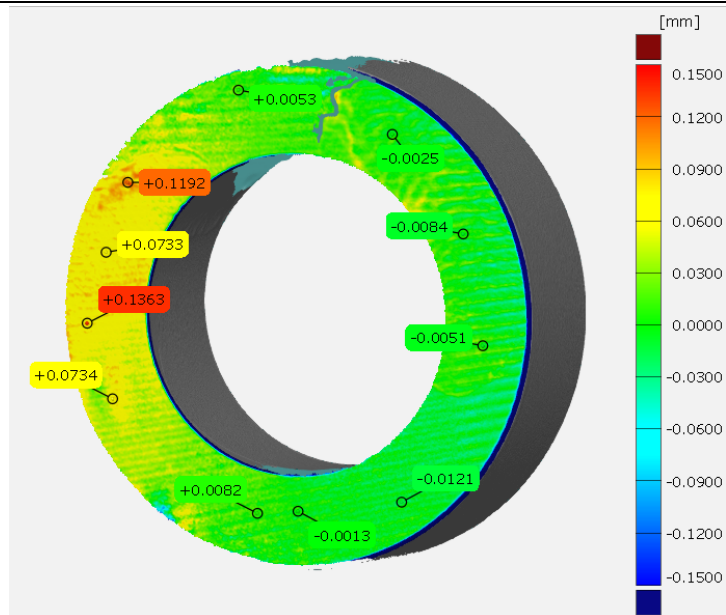


Figura 94. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

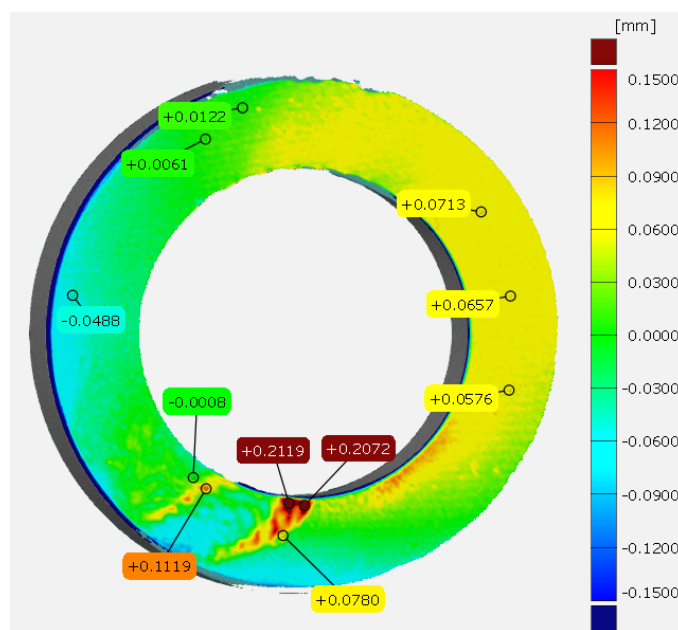
En la Figura 95 y Figura 96 se incluyen etiquetas con los valores de la distancia a cada cara del anillo.

En la Figura 95 se ve que no hay cambios de superficie demasiado bruscos, pero se encuentra un máximo de 0.1363 mm, que será el valor que más afecta a la tolerancia.

En la Figura 96 se puede observar varios relieves puntuales que aumentan el valor de la tolerancia con máximo de 0.2119 mm.



**Figura 95. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón.
Escaneo 2.2. HP 3D Scan**



**Figura 96. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón.
Escaneo 2.2. HP 3D Scan**

9.3.3.5. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad

En la Figura 97 se visualiza la tolerancia de cilindridad del escaneo 3.1. Es un valor de 1.2735 mm.

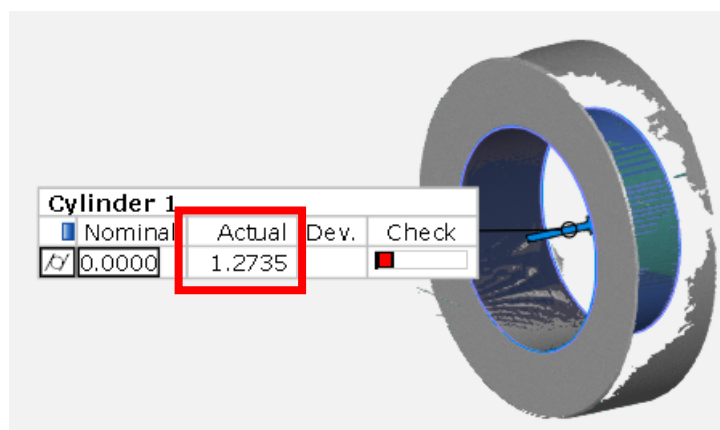


Figura 97. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner HP 3D Scan

Se puede observar que en la Figura 98, en la parte interior del anillo hay relieves indeseados que afectan al valor de la tolerancia. El máximo es de 0.7351mm y el mínimo de -0.6068 mm.

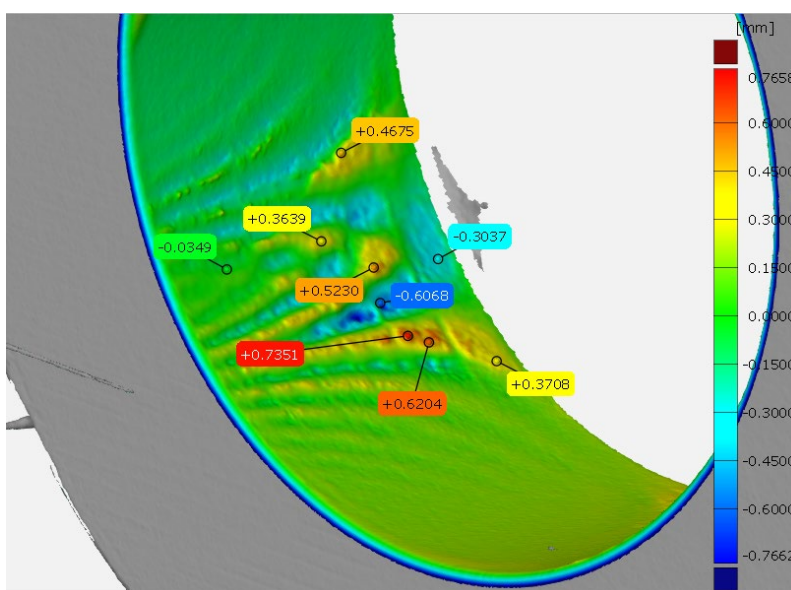


Figura 98. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 3.1. HP 3D Scan

9.3.3.6. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 99 se visualiza la tolerancia de planitud y paralelismo del escaneo 3.2. La tolerancia de planitud de la cara 1 es de 0.3256 mm y la de la cara 2 de 0.2302 mm. Por otro lado, la tolerancia de paralelismo entre caras es de 0.4650 mm.

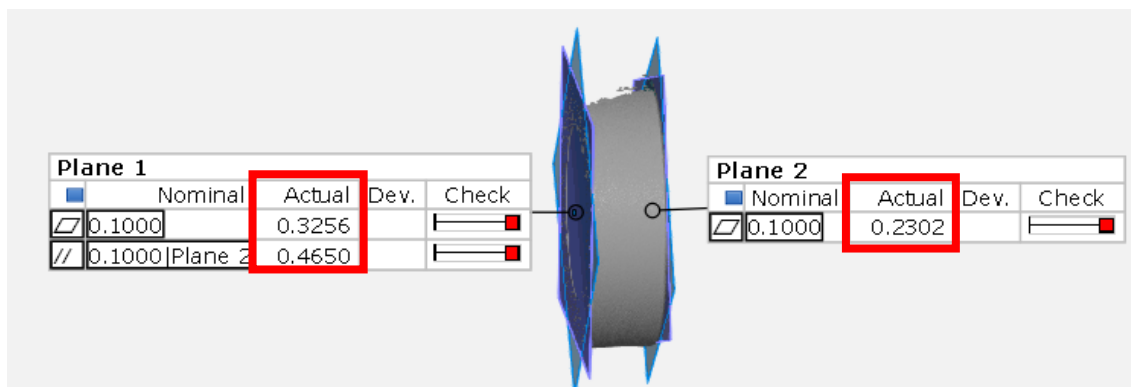


Figura 99. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 100 y Figura 101 se incluyen etiquetas con los valores de la distancia a cada cara del anillo. La diferencia de colores entre ambas figuras se debe a que el valor central (color verde) no es el mismo en ambas.

En la Figura 100 se detecta un relieve puntual con máximo de 0.2088 mm.

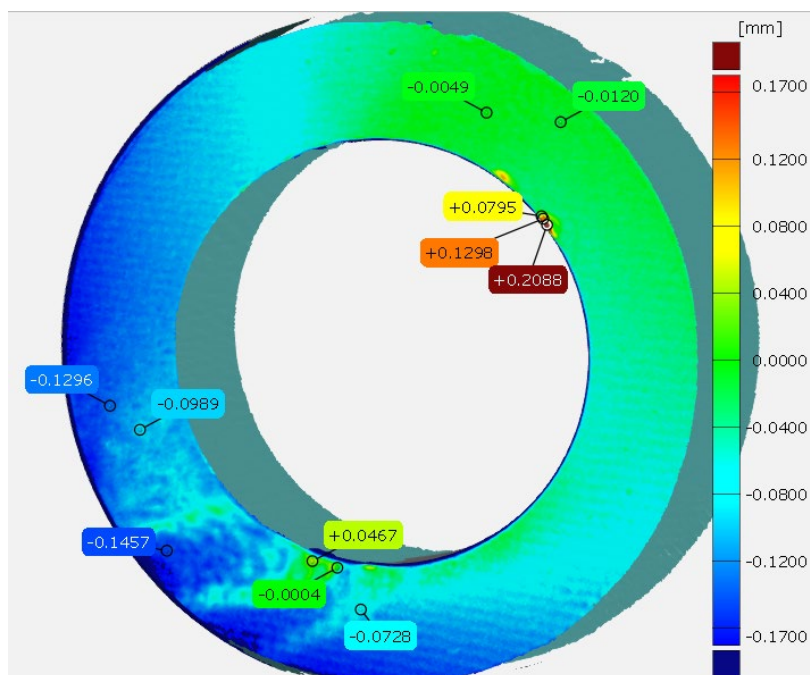


Figura 100. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 3.2. HP 3D Scan

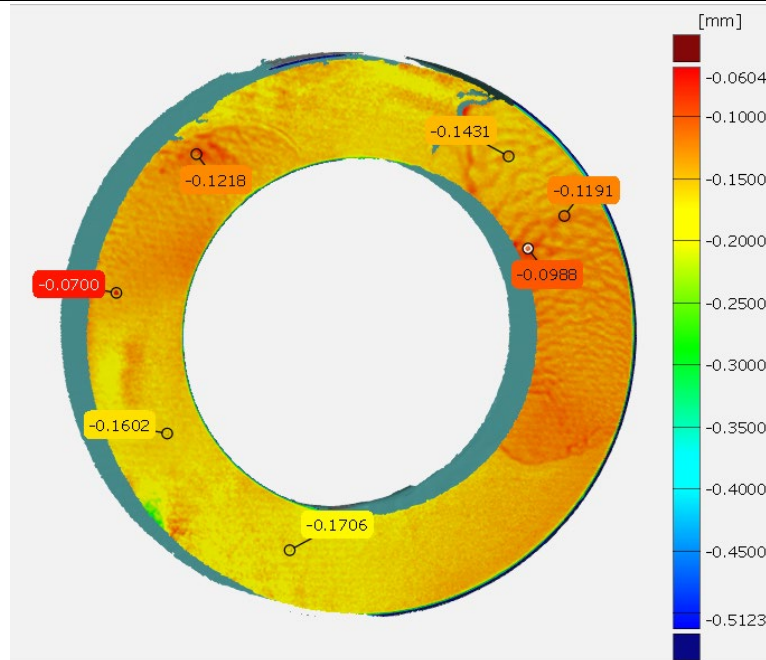


Figura 101. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 3.2. HP 3D Scan

9.3.3.7. Resumen de tolerancias obtenidas con el escáner HP 3D Scan para el anillo patrón

En la Tabla 6 se muestra el resumen de las tolerancias calculadas con GOM-Inspect para el anillo patrón utilizando el escáner HP 3D Scan. La denominación del número de escaneo se presenta con dos números separados por un punto; el primer número corresponde al número de cada par de escaneos y el segundo número corresponde a la posición (1 = medida de cilindricidad, 2 = medida de planitud y paralelismo). Como los escaneos “X.1” solo sirven para verificar cilindricidad, se indica con un “—” las tolerancias que no se pueden verificar. Lo mismo para los “X.2”, que solo sirven para planitud y paralelismo.

Se puede observar que para cilindricidad se obtiene el valor mínimo de tolerancia de 0.7616 mm y el máximo de 1.2735 mm. Para planitud de una cara, el mínimo es de 0.2149 mm y el máximo de 0.3295 mm. Por otro lado, en cuanto a paralelismo entre caras, el mínimo es de 0.3803 mm y el máximo de 0.5341.

Nº escaneo	Cilindricidad del cilindro interior	Planitud cara 1	Planitud cara 2	Paralelismo cara1/cara2
1.1	0.7616	—	—	—
1.2	—	0.2419	0.3295	0.5341
2.1	1.0578	—	—	—
2.2	—	0.2149	0.3057	0.3803
3.1	1.2735	—	—	—
3.2	—	0.3256	0.2302	0.4650

Tabla 6. Resumen de tolerancias de los escaneos realizados con HP 3D Scan para el anillo patrón

9.3.3.8. Evaluación de la tolerancia de cilindridad

Para evaluar la precisión y repetibilidad del escaneo en la medición de la cilindridad del cilindro interior, se analiza la dispersión de los valores obtenidos en los tres escaneos. Se calcula la media de las cilindridades obtenidas, y se obtiene que es de 1.03097. Adicionalmente, se calcula la desviación estándar y se obtiene que es de 0.257.

Conclusion: El valor de la tolerancia de cilindridad es demasiado elevado, ya que el teórico es de 0.01 mm. Por otro lado, el alto valor de la desviación estándar y la diferencia notable entre los valores de cilindridad obtenidos en los tres escaneos sugieren que la repetibilidad del sistema de escaneo es baja. Esto significa que el escaneo no es completamente confiable para medir la cilindridad de manera consistente.

9.3.3.9. Evaluación de la tolerancia de planitud de la cara 1

Para evaluar la precisión y repetibilidad de los escaneos en la medición de la planitud de la cara 1, se analizan los valores obtenidos en los tres escaneos. Se calcula la media de los valores de planitud obtenidos, obteniendo un valor de 0.2608. Adicionalmente, se calcula la desviación estándar y se obtiene que es de 0.05772.

Conclusión: La media de planitud de 0.2608 mm sugiere que el sistema de escaneo tiene una precisión baja en comparación con la CMM. Por otro lado, la desviación estándar de 0.05772 mm indica que, aunque el sistema es relativamente consistente, existen pequeñas fluctuaciones en los valores.

9.3.3.10. Evaluación de la tolerancia de paralelismo

Para evaluar la precisión y repetibilidad del escaneo en la medición del paralelismo entre la cara 1 y la cara 2, se utilizan los valores obtenidos en los tres escaneos. Se calcula la media de los valores de paralelismo obtenidos, obteniendo un valor de 0.4598 mm. Adicionalmente, se calcula la desviación estándar y se obtiene que es de 0.07703 mm

Conclusión: La media de paralelismo de 0.4598 mm sugiere que el sistema de escaneo tiene una precisión también baja si se compara con las medidas obtenidas con la CMM. En cuanto a la desviación estándar de 0.07703 mm, revela una variabilidad moderada, lo que indica que la repetibilidad de las mediciones podría mejorarse.

9.3.4. Tolerancias de EinScan Pro 2X en el escaneo del anillo patrón

De la misma forma que para el escáner HP 3D Scan, se procede con el escáner EinScan.

En la Figura 102, Figura 104, Figura 107, Figura 109, Figura 112 y Figura 114 se muestran gráficamente los valores de las tolerancias, y en la Tabla 7 se recopilan los mismos.

Por otro lado, en la Figura 103, Figura 105, Figura 106, Figura 108, Figura 110, Figura 111, Figura 113, Figura 115 y Figura 116, se visualizan con colores las desviaciones del escaneo respecto a las dimensiones teóricas de la pieza patrón.

9.3.4.1. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad

En la Figura 102 se visualiza la tolerancia de cilindridad del escaneo 1.1. Es un valor de 0.6885 mm.



Figura 102. Escaneo 1, posición 1 (1.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner EinScan

Se puede observar que en la Figura 103, en la parte interior del anillo hay relieves indeseados que afectan al valor de la tolerancia. Se observa un máximo de 0.3875 mm y un mínimo de -0.229 mm.

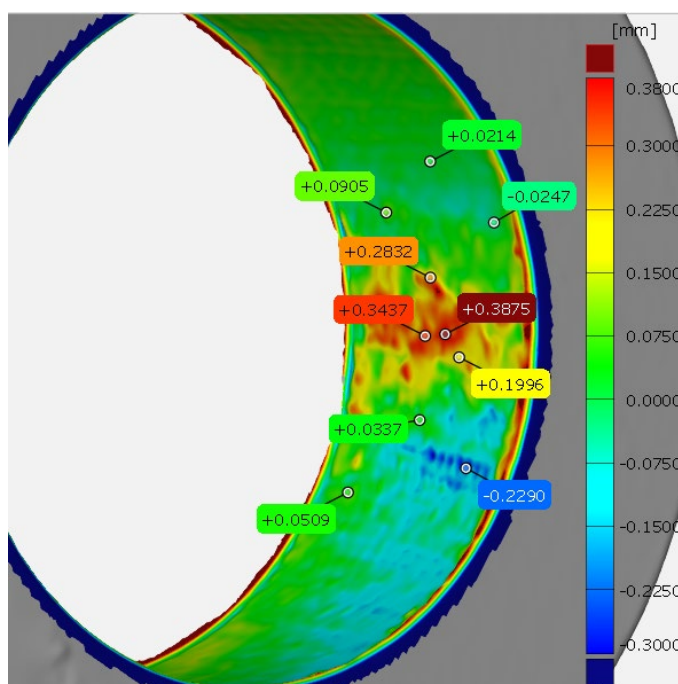


Figura 103. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 1.1. EinScan

9.3.4.2. Escaneo 1, posición 2 (1.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 104 se visualiza la tolerancia de planitud y paralelismo del escaneo 1.2. La tolerancia de planitud de la cara 1 es de 0.5300 mm y la de la cara 2 de 0.4227 mm. Por otro lado, la tolerancia de paralelismo entre caras es de 0.5463 mm.

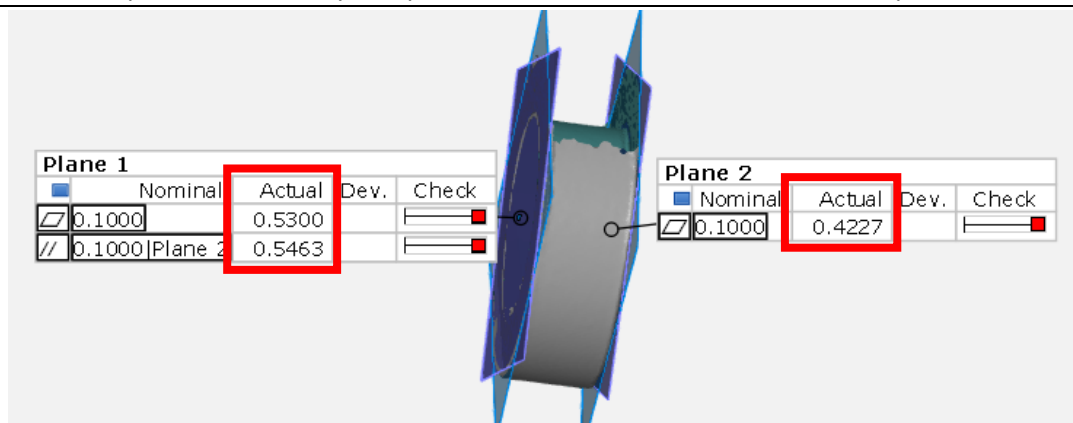


Figura 104. Escaneo 1, posición 2 (1.2). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 105 y Figura 106 se incluyen etiquetas con los valores de la distancia a cada cara del anillo. Se puede observar en la Figura 105 que los valores son bajos (en torno a 0.01), salvo en zonas puntuales con relieves en la parte más externa con un máximo de 0.4509 mm. En la Figura 106, también existen relieves puntuales con un máximo de 0.5698 mm.

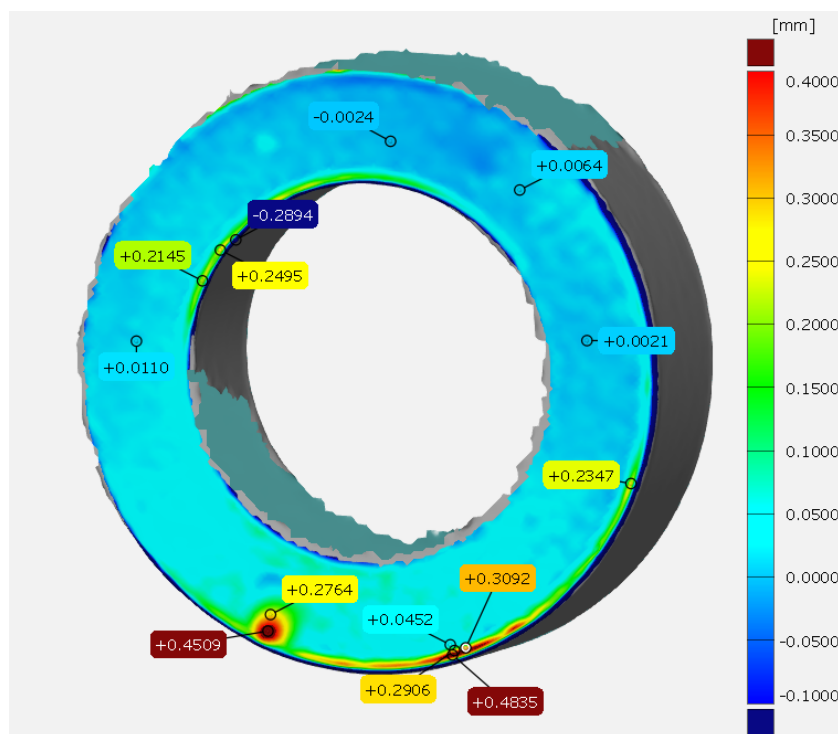


Figura 105. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón. Escaneo 1.2. EinScan

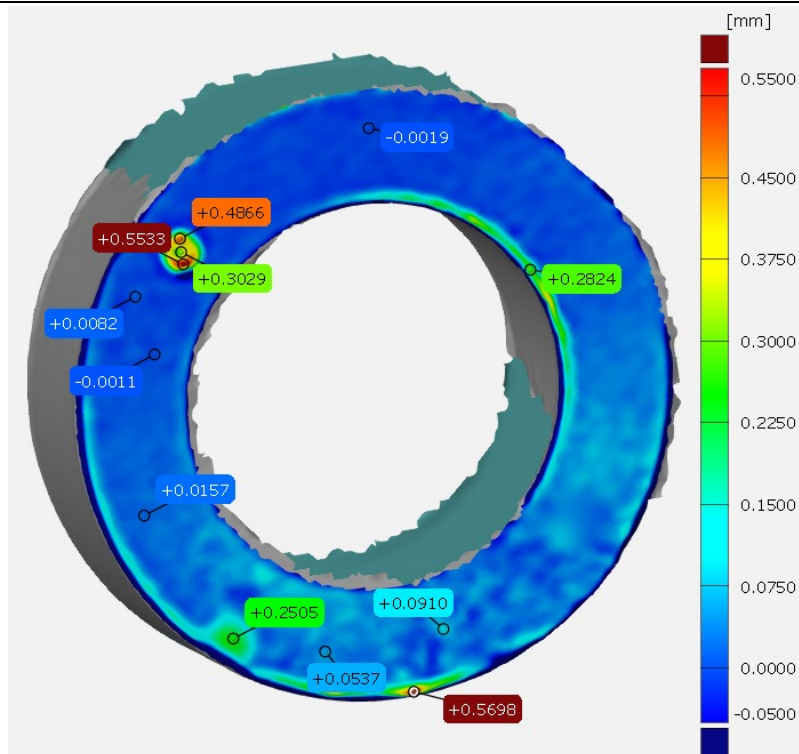


Figura 106. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 1.2. EinScan

9.3.4.3. Escaneo 2, posición 1 (2.1). Tolerancia de cilindricidad

En la Figura 107 se visualiza la tolerancia de cilindricidad del escaneo 2.1. Es un valor de 0.7435 mm.

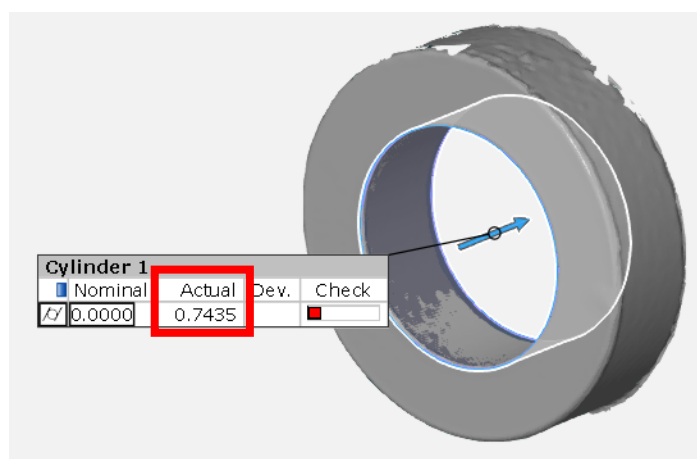


Figura 107. Escaneo 2, posición 1 (2.1). Tolerancia de cilindricidad. Anillo patrón. Escáner EinScan

Se puede observar en la Figura 108, que en la parte interior del anillo hay relieves indeseados en la parte más cercana a la cara 1, que afectan al valor de la tolerancia. Existe un máximo de 0.7273 mm.

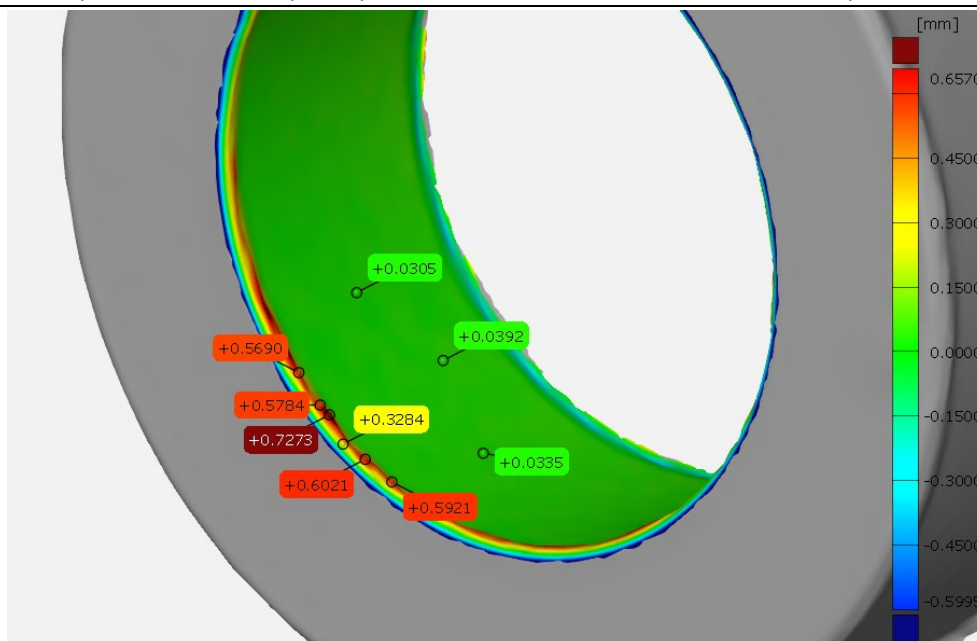


Figura 108. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 2.1. EinScan

9.3.4.4. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 109 se visualiza la tolerancia de planitud y paralelismo del escaneo 2.2. La tolerancia de planitud de la cara 1 es de 0.5494 mm y la de la cara 2 de 0.3976 mm. Por otro lado, la tolerancia de paralelismo entre caras es de 0.6366 mm.

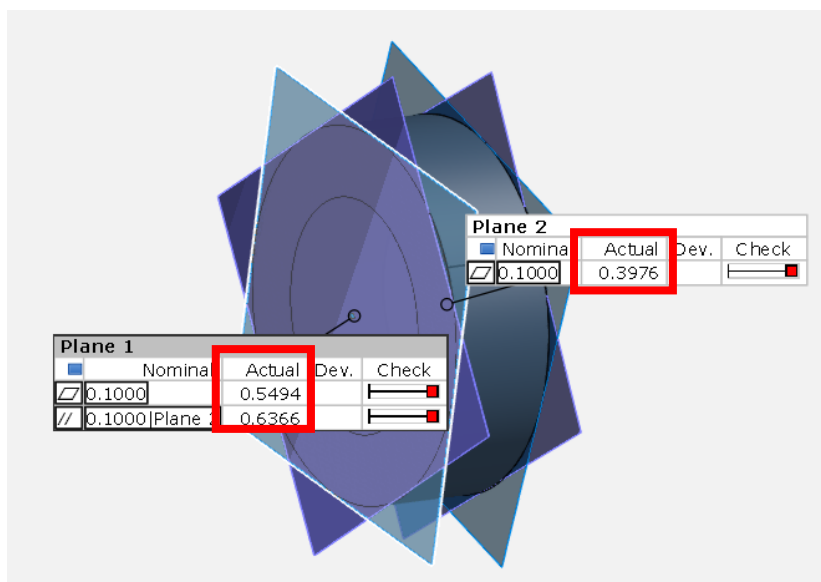


Figura 109. Escaneo 2, posición 2 (2.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 110 y Figura 111 se incluyen etiquetas con los valores de la distancia a cada cara del anillo. En la Figura 110 hay relieves puntuales con un máximo de 0.4542 mm, y en la Figura 111 con un máximo de 0.5016 mm.

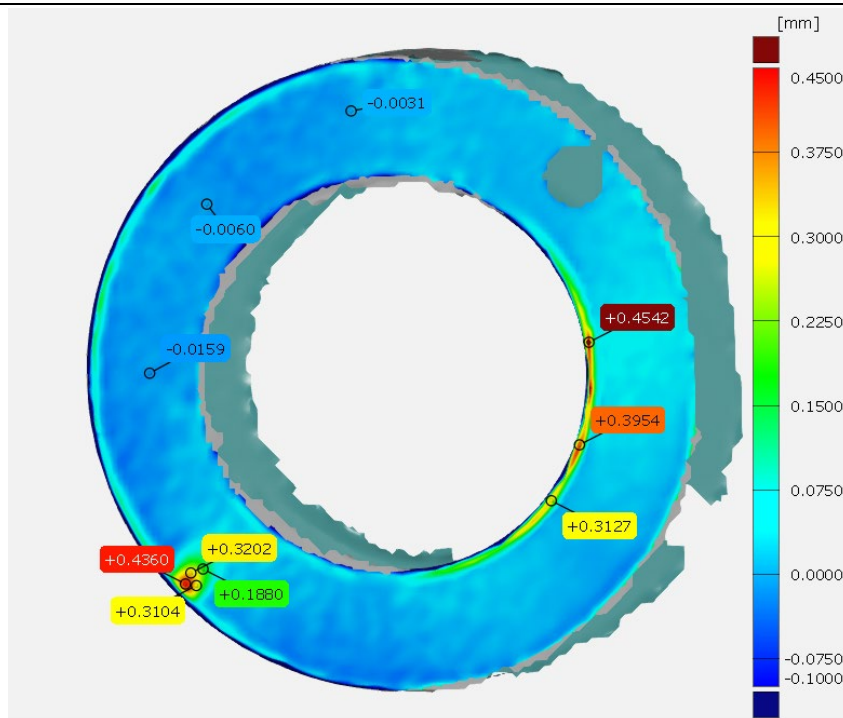


Figura 110. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón.
Escaneo 2.2. EinScan

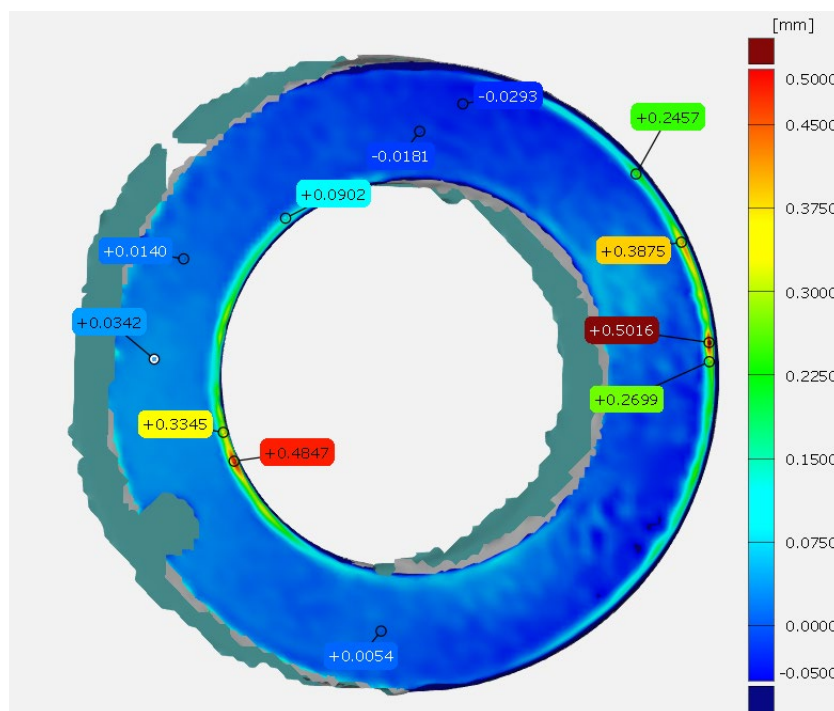


Figura 111. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón.
Escaneo 2.2. EinScan

9.3.4.5. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad

En la Figura 112 se visualiza la tolerancia de cilindridad del escaneo 3.1. Es un valor de 0.8825 mm.

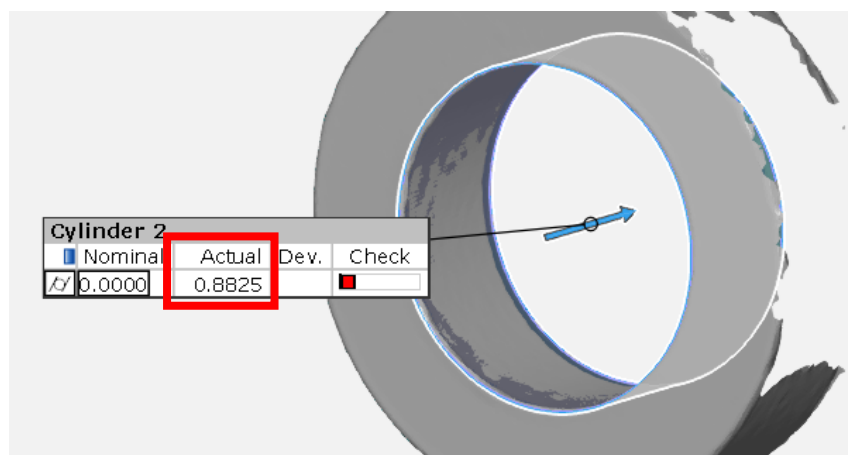


Figura 112. Escaneo 3, posición 1 (3.1.). Tolerancia de cilindridad. Anillo patrón. Escáner EinScan

Se puede observar en la Figura 113, que en la parte interior del anillo hay relieves indeseados en la parte más cercana a la cara 1 que afectan al valor de la tolerancia. El máximo es de 0.793 mm

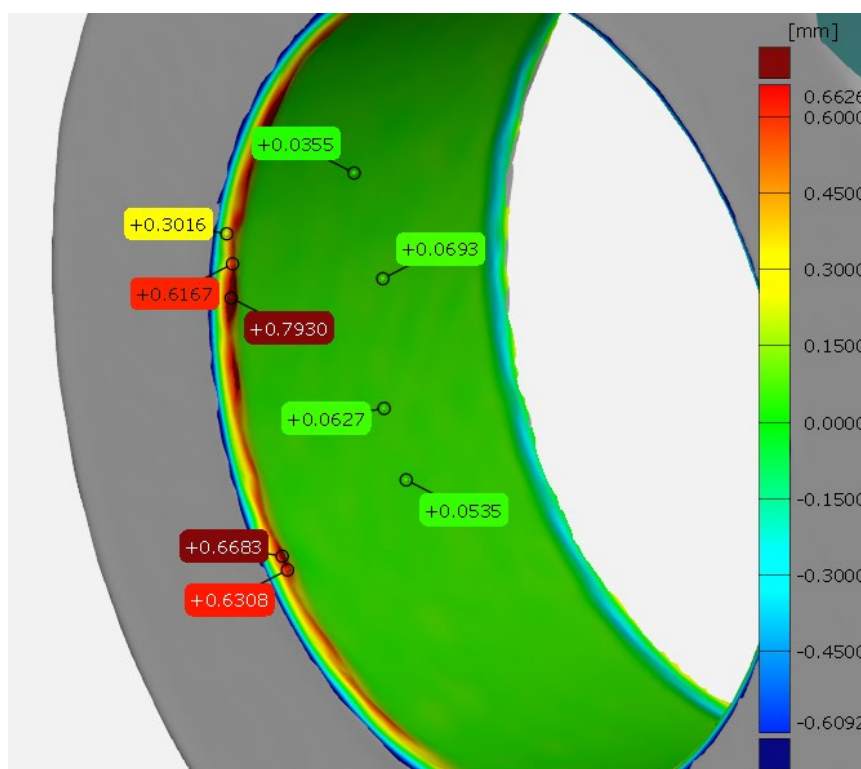


Figura 113. Relieves en el cilindro interior del anillo patrón. Escaneo 3.1. EinScan

9.3.4.6. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 114 se visualiza la tolerancia de planitud y paralelismo del escaneo 3.2. La tolerancia de planitud de la cara 1 es de 0.4407 mm y la de la cara 2 de 0.4119 mm. Por otro lado, la tolerancia de paralelismo entre caras es de 0.4887 mm.

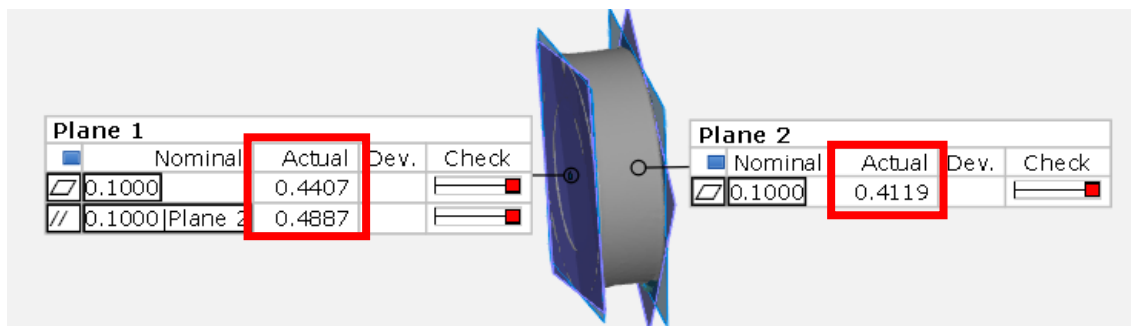


Figura 114. Escaneo 3, posición 2 (3.2.). Tolerancia de planitud y paralelismo

En la Figura 115 y Figura 116 se incluyen etiquetas con los valores de la distancia a cada cara del anillo. En la Figura 115 se encuentran relieves puntuales con un máximo de 0.4618 mm, y en la Figura 116 con un máximo de 0.7113 mm.

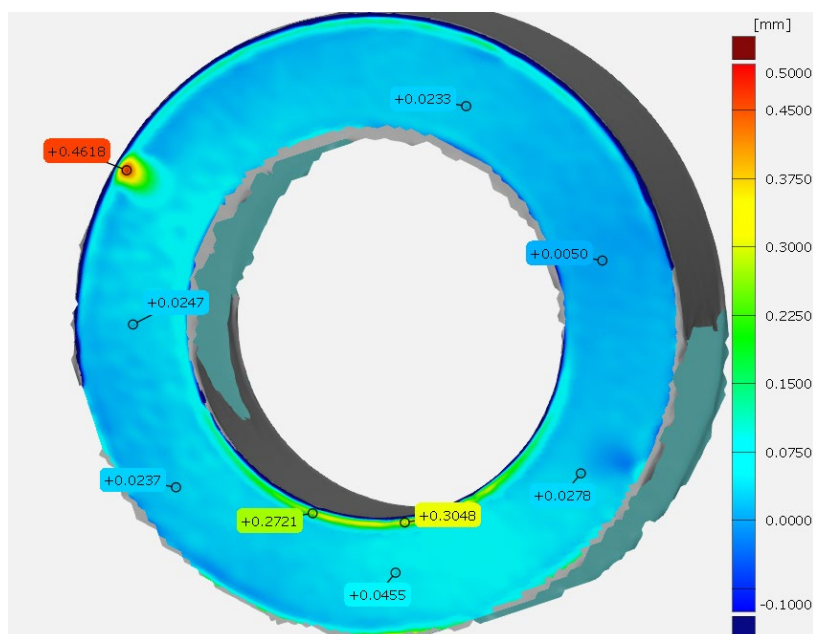


Figura 115. Visualización de distancias a la superficie de la cara 1 del anillo patrón.
Escaneo 3.2. EinScan

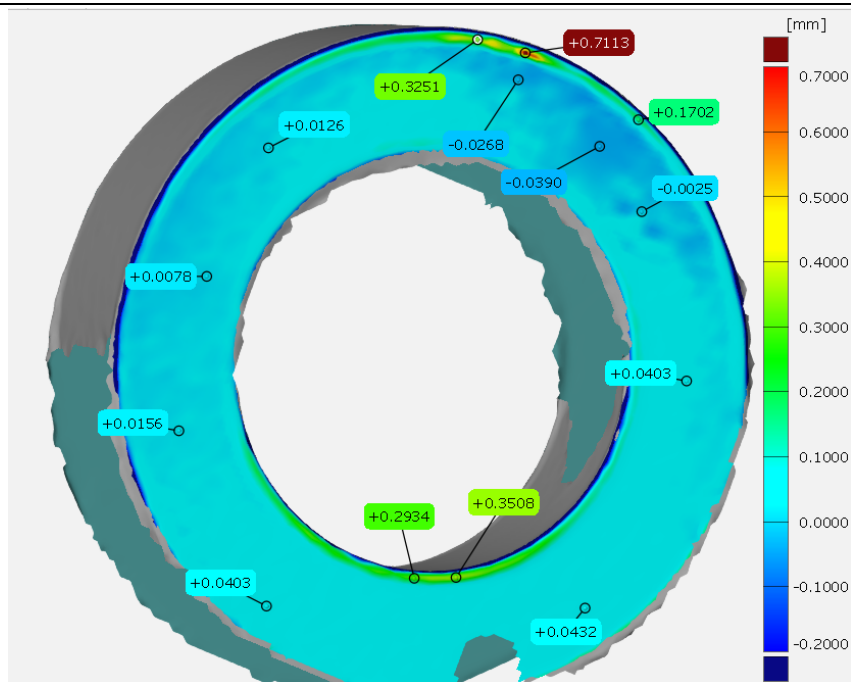


Figura 116. Visualización de distancias a la superficie de la cara 2 del anillo patrón. Escaneo 3.2. EinScan

9.3.4.7. Resumen de tolerancias obtenidas con el escáner EinScan para el anillo patrón

En la Tabla 7 se muestra el resumen de las tolerancias calculadas con el programa para el anillo patrón utilizando el escáner EinScan. La simbología empleada es equivalente a la del apartado “9.3.3.7. Resumen de tolerancias obtenidas con el escáner HP 3D Scan para el anillo patrón”.

Se puede observar que para cilindridad se obtiene el valor mínimo de tolerancia de 0.6885 mm y el máximo de 0.8825 mm. Para planitud de una cara, el mínimo es de 0.3976 mm y el máximo de 0.5494 mm. Por otro lado, en cuanto a paralelismo entre caras, el mínimo es de 0.4887 mm y el máximo de 0.6366 mm.

Nº escaneo	Cilindridad del cilindro interior	Planitud cara 1	Planitud cara 2	Paralelismo cara1/cara2
1.1	0.6885	—	—	—
1.2	—	0.5300	0.4227	0.5463
2.1	0.7435	—	—	—
2.2	—	0.5494	0.3976	0.6366
3.1	0.8825	—	—	—
3.2	—	0.4407	0.4119	0.4887

Tabla 7. Resumen de tolerancias de los escaneos realizados con EinScan para el anillo patrón

9.3.4.8. Evaluación de la tolerancia de cilindridad

Para evaluar la precisión y repetibilidad de los escaneos en la medición de la cilindridad del cilindro interior, se analizan los valores obtenidos en los tres escaneos. Se calcula la media de los valores de cilindridad obtenidos, obteniendo un valor de 0.7715. Adicionalmente, se calcula la desviación estándar y se obtiene que es de 0.1000.

Conclusión: El valor de la tolerancia de cilindridad es demasiado elevado, ya que el teórico es de 0.01 mm. La desviación estándar de 0.1000 mm indica que existen variaciones significativas entre los escaneos, lo que sugiere que la repetibilidad del sistema podría mejorarse, ya que las fluctuaciones en las mediciones son relativamente grandes.

9.3.4.9. Evaluación de la tolerancia de planitud de la cara 1

Para evaluar la precisión y repetibilidad de los escaneos en la medición de la planitud de la cara 1, se analizan los valores obtenidos en los tres escaneos. Se calcula la media de los valores de planitud obtenidos, obteniendo un valor de 0.5067. Adicionalmente, se calcula la desviación estándar y se obtiene que es de 0.0455.

Conclusión: La media de planitud de 0.5067 mm sugiere que el sistema de escaneo tiene una precisión baja en comparación con la CMM. Por otro lado, la desviación estándar de 0.0455 mm indica que, aunque el sistema es relativamente consistente, existen pequeñas fluctuaciones en los valores.

9.3.4.10. Evaluación de la tolerancia de paralelismo

Para evaluar la precisión y repetibilidad de los escaneos en la medición de la tolerancia de paralelismo entre la cara 1 y la cara 2, se analizan los valores obtenidos en los tres escaneos. Se calcula la media de los valores de paralelismo obtenidos, obteniendo un valor de 0.5572. Adicionalmente, se calcula la desviación estándar y se obtiene que es de 0.0616.

Conclusión: El valor promedio de paralelismo de 0.5572 mm sugiere que el sistema de escaneo presenta también una precisión inferior en comparación con la CMM. Sin embargo, la desviación estándar de 0.0616 mm refleja que, a pesar de la menor precisión, el sistema muestra una consistencia razonable con ligeras variaciones en los resultados.

9.3.5. Comparación de las tolerancias de HP 3D Scan, EinScan y CMM en el escaneo del anillo patrón

En la Tabla 8 se presenta el resumen de la media y desviación típica de las tolerancias utilizando la CMM, el escáner óptico HP 3D Scan y el escáner EinScan.

		CMM	HP 3D SCAN	EINSCAN
Cilindricidad del cilindro interior	MEDIA	0.00471	1.03097	0.7715
	DESVIACIÓN TÍPICA	0.000438	0.257	0.1000
Planitud cara 1	MEDIA	0.00887	0.2608	0.5067
	DESVIACIÓN TÍPICA	0.003778	0.05772	0.0455
Paralelismo cara1/cara2	MEDIA	0.01342	0.4598	0.5572
	DESVIACIÓN TÍPICA	0.005666	0.07703	0.0616

Tabla 8. Comparación de las tolerancias utilizando la CMM, el escáner HP 3D Scan y el escáner EinScan

Viendo los valores de la Tabla 8, la CMM muestra una mayor precisión en todas las mediciones (cilindricidad, planitud, y paralelismo), con medias de las tolerancias mucho más bajas que las obtenidas con el escáner HP y EinScan. Además, también demuestra una mejor repetibilidad, evidenciada por las desviaciones típicas mucho menores en comparación con las obtenidas por el escáner HP y EinScan.

Comparando ahora los otros dos escáneres ópticos, el escáner EinScan es superior en términos de precisión y repetibilidad para la cilindricidad del cilindro interior. Por otro lado, HP 3D Scan es mejor en términos de precisión para la planitud de la cara 1 y el paralelismo entre las caras 1 y 2, aunque EinScan muestra una mejor repetibilidad en estos casos.

9.4. Pieza de carrocería

En este apartado se verifica la precisión de los escáneres HP 3D Scan y EinScan respecto a la CMM, que se utiliza como base, empleando como pieza la pieza de carrocería. Al no tratarse de una pieza patrón, la estabilidad dimensional, por el tipo de material y forma geométrica no está garantizada en absoluto.

9.4.1. Medida de puntos con la CMM en la superficie de la pieza de carrocería

Se han realizado 10 mediciones en la superficie, y en cada una de ellas se han palpado 8 puntos. En total se han palpado 80 puntos. Para cada conjunto de puntos se ha calculado la media y la desviación típica. En el **ANEXO E** se recopilan las coordenadas de todos los puntos.

A modo de resumen, en la Tabla 9 se recopilan los valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto.

Punto	MEDIA X	DESV. TIP. X	MEDIA Y	DESV. TIP. Y	MEDIA Z	DESV. TIP. Z
1	-122.5504	0.0950	-71.7491	0.1259	27.9826	0.1374
2	-123.3786	0.0591	-23.8362	0.1349	34.5845	0.0869
3	-58.8441	0.0514	-4.8022	0.0937	39.7701	0.0409
4	-73.7815	0.1403	-123.0064	0.0791	23.4600	0.2200
5	-64.3021	0.1458	-129.0569	0.0709	22.6809	0.2288
6	-94.2599	0.1431	-126.8447	0.0924	21.0722	0.2242
7	-91.3257	0.0497	-1.0933	0.1161	39.6706	0.0544
8	-91.5513	0.0835	-55.5152	0.1071	33.3528	0.1069

Tabla 9. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto

9.4.2. Reconstrucción de la superficie para comparación con otros sistemas

Para poder comparar en GOM-Inspect los escaneos de puntos hechos en la CMM con los escaneos obtenidos de otras técnicas, se debe reconstruir una superficie a partir de la nube de puntos (ver Figura 117)

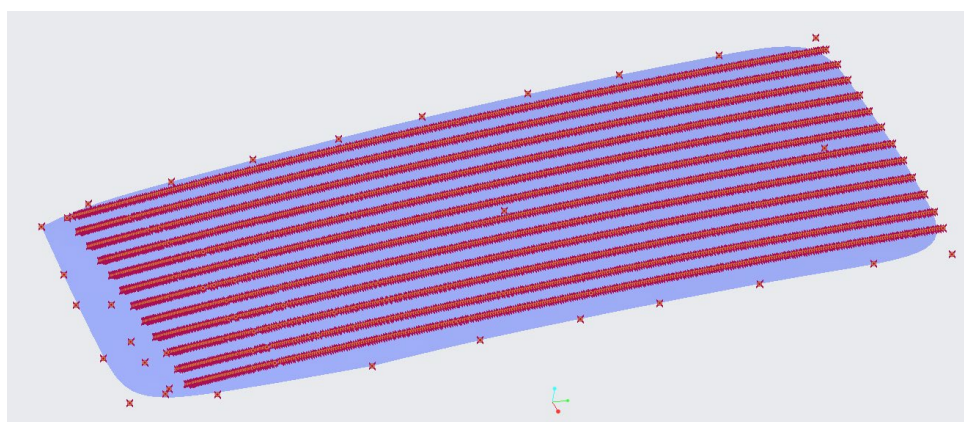


Figura 117. Superficie reconstruida a partir de la nube de puntos

Esta reconstrucción se usará como modelo de referencia en GOM-Inspect, para que se comparen los escaneos de las otras técnicas respecto al de la CMM.

9.4.3. Tolerancias de HP 3D Scan en el escaneo de la pieza de carrocería

Se va a buscar los puntos tomados para evaluar la precisión en la CMM al escaneo realizado mediante el escáner HP 3D Scan. Esto se va a realizar en el programa GOM-inspect, y para ello, es necesario tener ambas superficies superpuestas una encima de la otra.

Se prueba en primer lugar a realizar un alineamiento de piezas mediante sistema de coordenadas, es decir, puesto que el sistema de coordenadas se encuentra en el mismo punto, hacer que coincidan. Sin embargo, debido a posibles errores muy pequeños en la construcción del sistema de coordenadas, ocurre una variación del ángulo respecto al eje x (ver Figura 118), lo que hace que las superficies estén más separadas de lo que deberían.

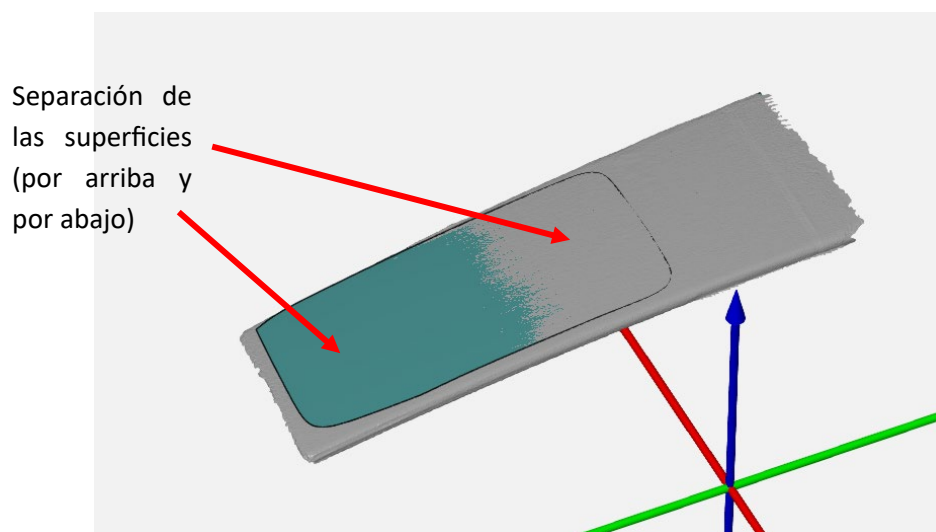


Figura 118. Problema de alineación por sistemas de coordenadas

Al ver que esto ocurre en todos los escaneos, se concluye que se trata de un **error sistemático**.

Para ver mejor el problema, se representa en la Figura 119 la separación entre superficie de referencia (base) y la del escaneo HP mediante un diagrama de gradiente de colores, en el que se muestran diferentes etiquetas con las separaciones de la superficie escaneada. Colores más cálidos indican que la superficie está por encima de lo que debería, y colores más fríos indican que la superficie se encuentra por debajo de lo que debería.

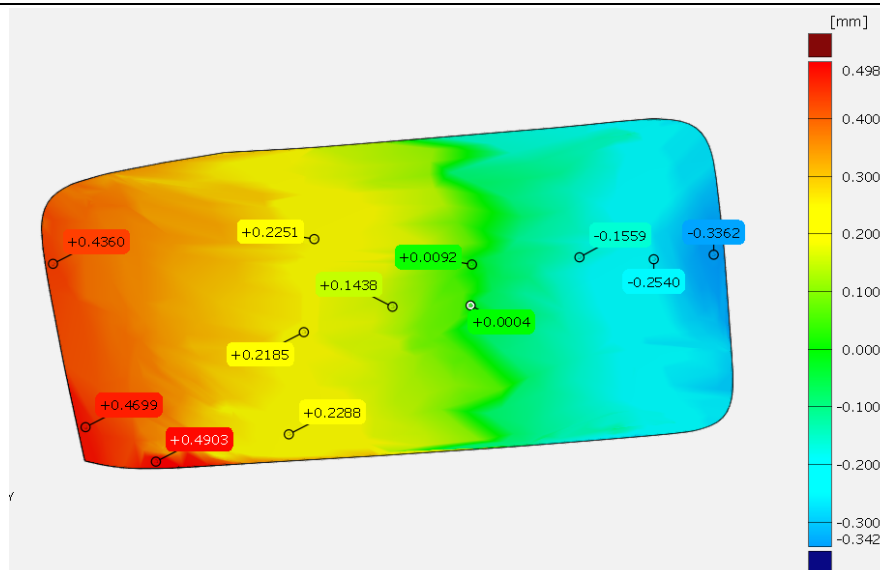


Figura 119. Problema de alineación por sistemas de coordenadas. Visualización de distancias

Para solucionar este problema se propone realizar un *best-fit*, que consiste en ajustar las superficies mediante la selección de varios puntos de contacto en ambas. Al realizar esto se consigue minimizar el efecto del error sistemático (ver Figura 120)

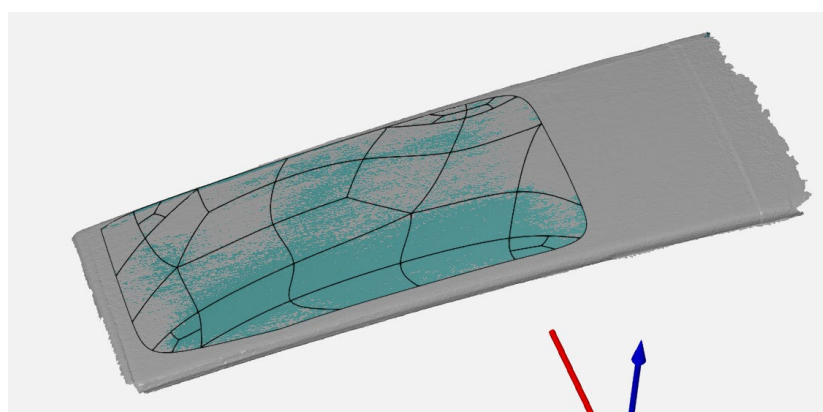


Figura 120. Ajuste de superficies en GOM-Inspect con *best-fit*

Las coordenadas de los puntos palpados en la CMM que se van a buscar en los escaneos realizados con el escáner HP son las que se muestran en la Tabla 10.

Punto	X	Y	Z
1	-122.532	-71.7446	28.07885
2	-123.373	-23.8264	34.64304
3	-58.8422	-4.76983	39.79548
4	-73.7498	-122.991	23.58473
5	-64.2685	-129.039	22.79761
6	-94.2274	-126.838	21.20253
7	-91.3249	-1.07065	39.69457
8	-91.5364	-55.4974	33.42192

Tabla 10. Coordenadas de los puntos palpados en la CMM que se van a buscar en los escaneos realizados con el escáner HP

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

El proceso comienza, situando los puntos en sus coordenadas en la superficie de referencia (ver Figura 121), y tras esto, se mide la distancia de estos puntos a la superficie procedente del escaneo con el equipo HP 3D Scan. El proceso para medir las distancias en GOM Inspect, se encuentra detallado en el ANEXO F.

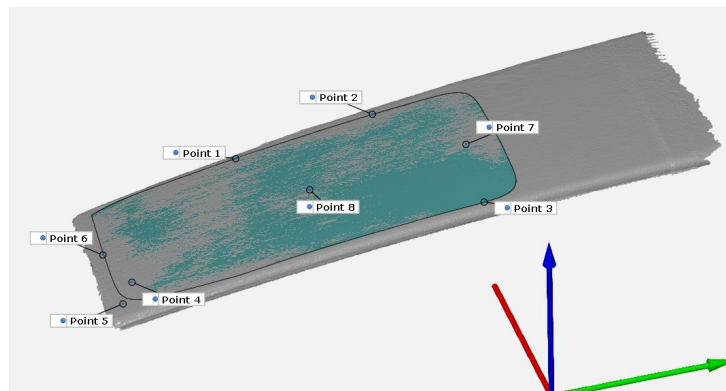


Figura 121. Ubicación de los puntos seleccionados del escaneo de la CMM para comparación

A continuación, se muestran gráficamente las desviaciones de los 8 puntos en los 3 escaneos realizados mediante HP 3D Scan en la Figura 122, Figura 124, Figura 126. Posteriormente, en la Tabla 11 se recopilan todos los valores

9.4.3.1. Escaneo 1 de la pieza de carrocería con HP 3D Scan

En la Figura 122 se presentan las desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 1 realizado mediante HP 3D Scan en la pieza de carrocería. Se observa que todas las desviaciones son muy próximas a cero, lo cual implica que la superficie se adapta bastante bien en esos puntos. El punto que peor se adapta es el 1, con una desviación de 0.1458 mm.

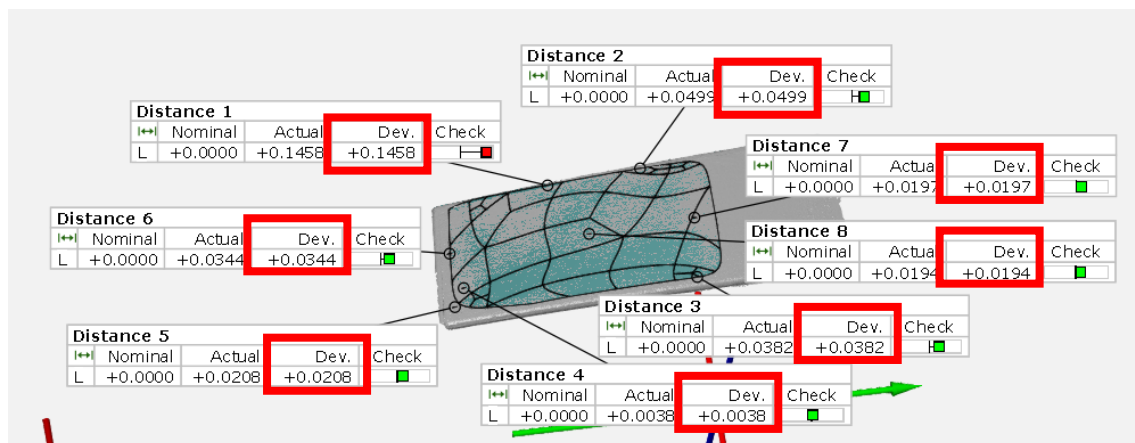


Figura 122. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 1 realizado mediante HP 3D Scan

En la Figura 123 se representa la distancia entre los puntos de la superficie escaneada y la superficie de referencia. Los valores positivos (colores más cálidos) indican que la superficie escaneada se encuentra por encima de la superficie de referencia y los negativos (colores más fríos) que se encuentra por debajo. Cuanto más verde el color, significa que la superficie escaneada es más próxima a la de referencia.

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Adicionalmente, se visualiza la distancia máxima por arriba (*Max distance*), de 0.1999 mm y la distancia máxima por debajo (*Min distance*), de -0.146 mm.

Se puede observar que existen ondulaciones en la superficie, es decir, algunas partes están por encima de la de referencia y otras por debajo.

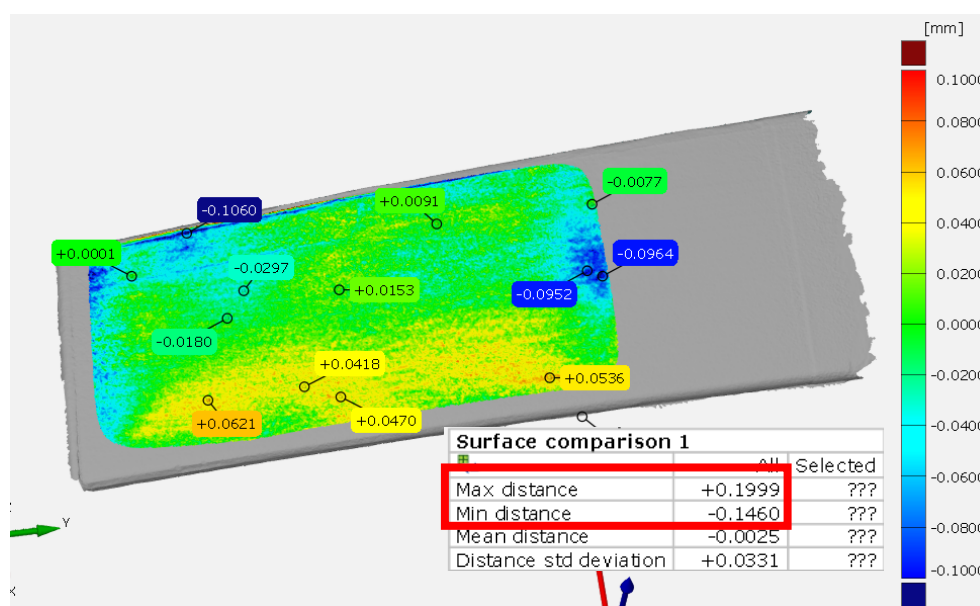


Figura 123. Distancias entre el escaneo 1 de la pieza de carrocería realizado mediante HP 3D Scan y la superficie de referencia

A partir de este análisis se extrae:

1. Distancia máxima por arriba o *Max distance* (D_{max})
2. Distancia máxima por abajo o *Min distance* (D_{min})

La tolerancia de forma de superficie se puede calcular como la diferencia entre estas dos distancias máximas:

$$\text{Tolerancia}_{sup} = D_{max} - D_{min} = 0.1999 + 0.146 = 0.3459 \text{ mm}$$

9.4.3.2. Escaneo 2 de la pieza de carrocería con HP 3D Scan

En la Figura 124 se presentan las desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 2 realizado mediante HP 3D Scan en la pieza de carrocería. Se observa de nuevo que las desviaciones son muy próximas a cero, excepto la del punto 1, que es de 0.2097 mm

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

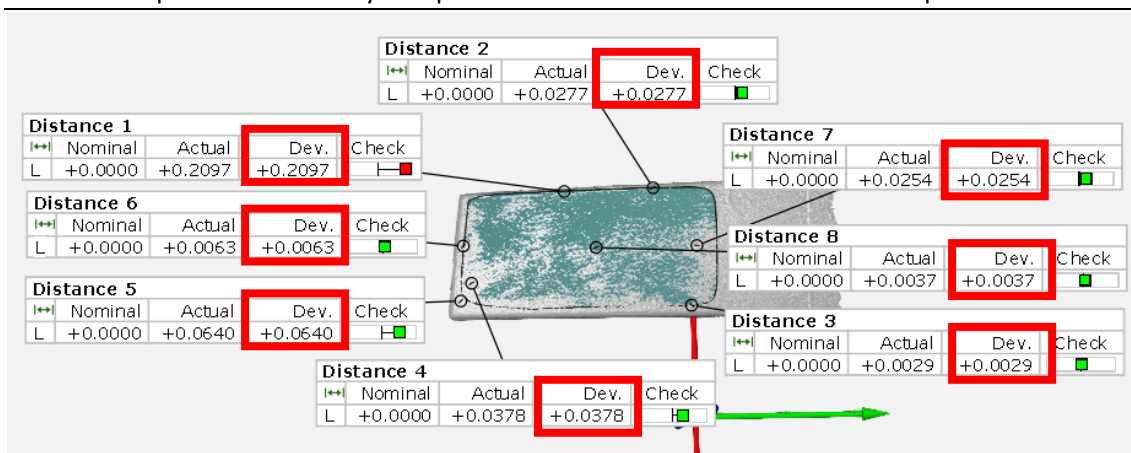


Figura 124. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 2 realizado mediante HP 3D Scan

En la Figura 125 se representa la distancia entre los puntos de la superficie escaneada y la superficie de referencia. Se detecta un máximo de 0.1998 mm y un mínimo de -0.1255 mm. Los colores verdes indican las zonas que mejor se adaptan a la superficie de referencia.

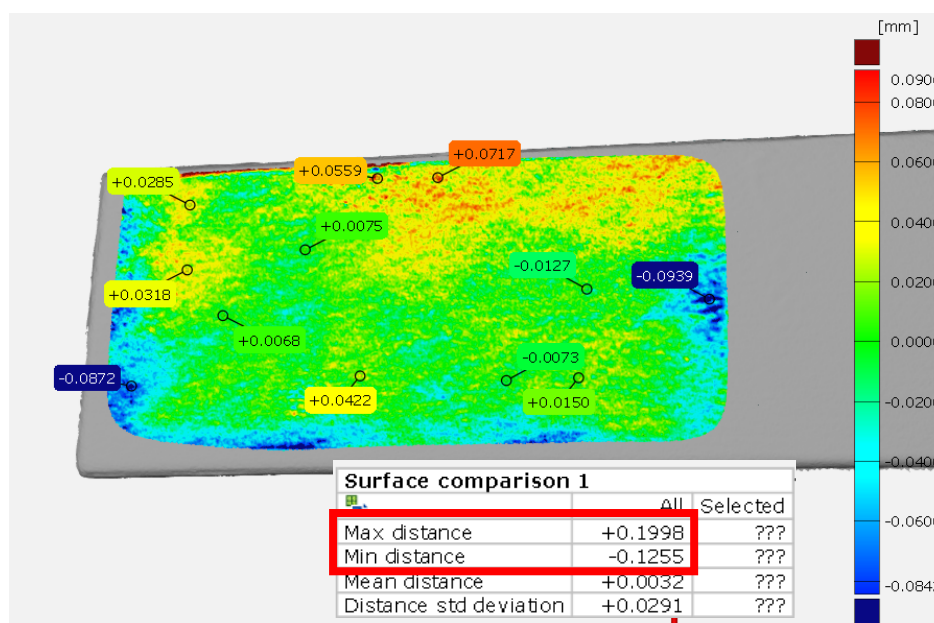


Figura 125. Distancias entre el escaneo 2 de la pieza de carrocería realizado mediante HP 3D Scan y la superficie de referencia

La tolerancia de forma de superficie se puede calcular como la diferencia entre las dos distancias máximas:

$$\text{Tolerancia}_{\text{sup}} = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = 0.1998 + 0.1255 = 0.3253 \text{ mm}$$

9.4.3.3. Escaneo 3 de la pieza de carrocería con HP 3D Scan

En la Figura 126 se presentan las desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 3 realizado mediante HP 3D Scan en la pieza de carrocería. Las desviaciones de nuevo son todas bastante próximas a cero.

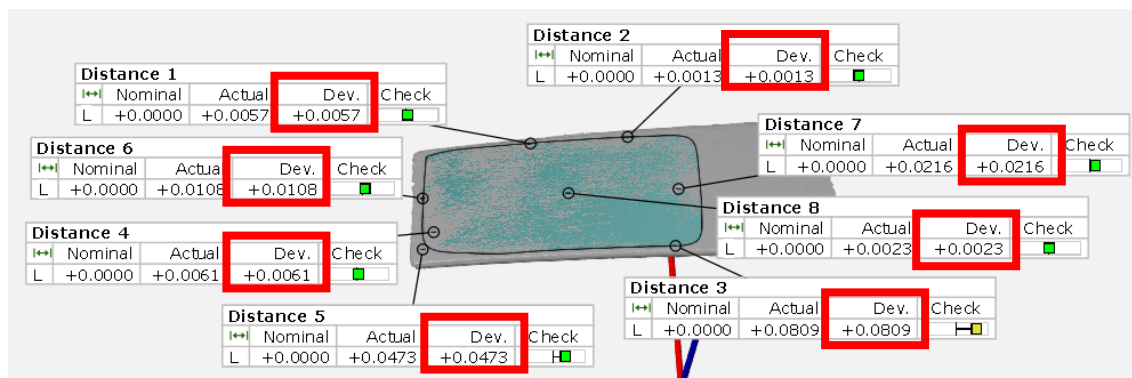


Figura 126. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 3 realizado mediante HP 3D Scan

En la Figura 127 se representa la distancia entre los puntos de la superficie escaneada y la superficie de referencia. El máximo es de 0.1047 mm y el mínimo de -0.1439, siendo la zona de color verde la que mejor se adapta a la superficie de referencia.

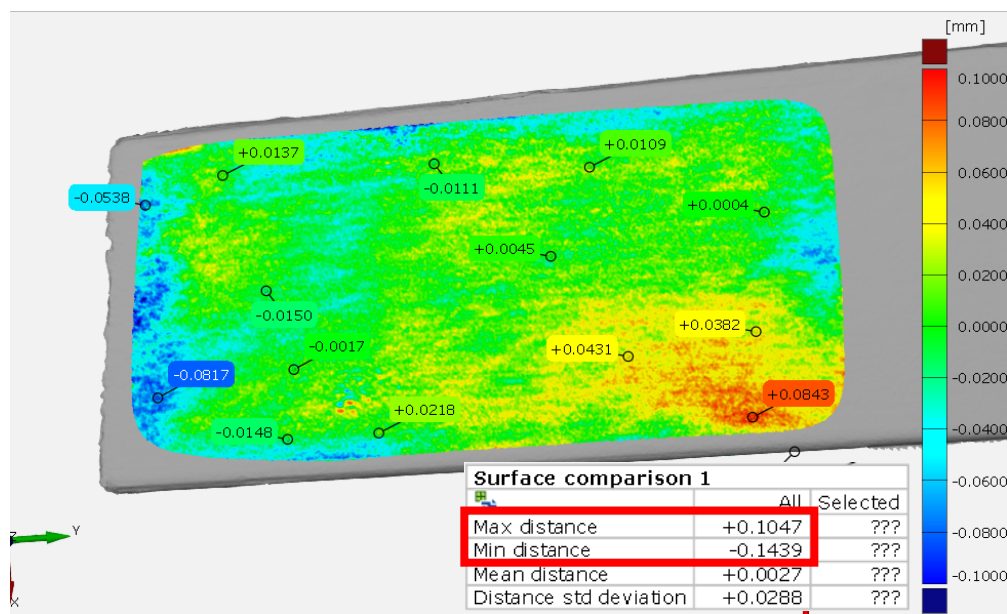


Figura 127. Distancias entre el escaneo 3 de la pieza de carrocería realizado mediante HP 3D Scan y la superficie de referencia

La tolerancia de forma de superficie se puede calcular como la diferencia entre las dos distancias máximas:

$$Tolerancia_{sup} = D_{max} - D_{min} = 0.1047 + 0.1439 = 0.2486 \text{ mm}$$

9.4.3.4. Evaluación del escáner HP 3D Scan con el método de las diferencias puntuales

En la Tabla 11, se muestra el resumen de desviaciones para cada punto en cada escaneo

Punto	Desviación escaneo 1 (mm)	Desviación escaneo 2 (mm)	Desviación escaneo 3 (mm)
1	0.1458	0.2097	0.0057
2	0.0499	0.0277	0.0013
3	0.0382	0.0029	0.0809
4	0.0038	0.0378	0.0061
5	0.0208	0.064	0.0473
6	0.0344	0.0063	0.0108
7	0.0197	0.0254	0.0216
8	0.0194	0.0037	0.0023

Tabla 11. Desviaciones para cada punto en cada escaneo en el escáner HP

Para evaluar la precisión a partir de las desviaciones de los 8 puntos en los 3 escaneos, se analiza tanto la media como la desviación típica del valor de la desviación de cada punto. En la Tabla 12 se muestran estos valores.

Punto	MEDIA	DESV TIP
1	0.1204	0.104345
2	0.0263	0.02433
3	0.040667	0.039058
4	0.0159	0.019001
5	0.044033	0.021784
6	0.017167	0.015093
7	0.022233	0.002902
8	0.008467	0.009494

Tabla 12. Medias y desviaciones típicas del valor de la desviación de cada punto

El valor medio de la desviación más grande es para el punto 1 de 0.1204. Todas las desviaciones de los puntos, menos la del punto 1, tienen una magnitud de varias centésimas de milímetro (todas menores a 0.05 mm) por lo que se puede concluir que la magnitud de la desviación 1 parece estar muy influenciada por el método de ajuste utilizado (*best-fit*). En este tipo de ajuste tiene en cuenta todos los puntos de las superficies implicadas, por lo que estas deberían tener un tamaño lo más similar posible, para minimizar los desajustes debidos a las diferencias de tamaño. Por lo tanto, en general, puede afirmarse que, con las condiciones de escaneo y procesado de las nubes de puntos utilizadas, el HP 3D Scan tiene una precisión que ronda los 0.05 mm.

9.4.3.5. Evaluación del escáner HP 3D Scan a partir de la tolerancia de forma de superficie

Si en vez de centrarse en solo los 8 puntos se mira el conjunto global de la superficie escaneada, hay que fijarse en la tolerancia de forma de superficie obtenida.

En la Tabla 13 se presenta el resumen de las tolerancias de forma de superficie obtenidas con el escáner HP 3D Scan.

Nº escaneo	Valor de la tolerancia de forma de superficie (mm)
1	0.3459
2	0.3253
3	0.2486

Tabla 13. Resumen de las tolerancias de forma de superficie obtenidas con el escáner HP 3D Scan para la pieza de carrocería

Para evaluar la precisión y repetibilidad del escáner HP 3D Scan en la medición de la tolerancia de forma de superficie, se analizan los valores obtenidos en los tres escaneos. La media de los valores de tolerancia de forma de superficie es de 0.3066 mm, y la desviación estándar de 0.0501 mm

La media de 0.3066 mm sugiere que el escáner HP 3D Scan tiene una precisión moderada en la medición de la tolerancia de forma de superficie. La desviación estándar de 0.0501 mm indica que el escáner es relativamente consistente, aunque existen pequeñas fluctuaciones en los valores.

El valor máximo obtenido es 0.3459 mm, lo que representa la mayor tolerancia de forma de superficie que el escáner HP alcanza (peor resultado) en los escaneos realizados.

Este valor máximo de 0.3459 mm indica que todos los puntos de la superficie escaneada se encuentran, como máximo, dentro del espacio contenido por dos superficies idénticas y paralelas, situadas por encima y por debajo de la superficie ideal, separadas una distancia igual al valor de la tolerancia.

9.4.4. Tolerancias de EinScan Pro 2X en el escaneo de la pieza de carrocería

9.4.4.1. Condiciones de mallado

Los parámetros utilizados para la creación de la malla son los parámetros recomendados por el programa:

1. Número máximo de triángulos: 2500000
2. Rellenar agujeros pequeños con perímetro de agujero 10
3. Remover picos

La función de cada parámetro se puede consultar en el apartado “6.2.2. Parámetros, interfaz y resultados de escaneo” en el capítulo 6.

9.4.4.2. Escaneo 1 de la pieza de carrocería con EinScan

En la Figura 128 se presentan las desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 1 realizado mediante EinScan en la pieza de carrocería. Todos los puntos marcados se adaptan bastante bien a la superficie de referencia al ser su desviación muy cercana a cero.

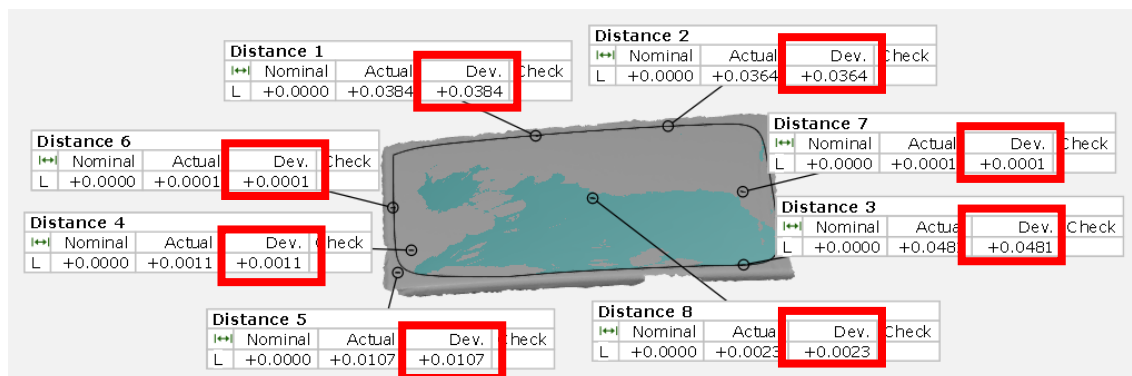


Figura 128. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 1 realizado mediante EinScan

En la Figura 129 se representa la distancia entre los puntos de la superficie escaneada y la superficie de referencia. Se observa un máximo de 0.0555 mm y un mínimo de -0.1 mm.

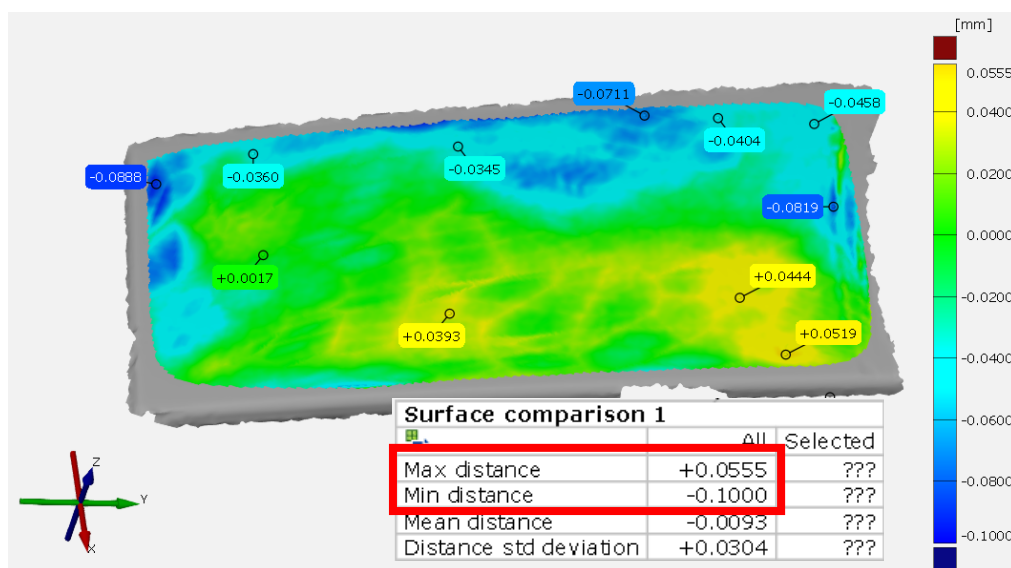


Figura 129. Distancias entre el escaneo 1 de la pieza de carrocería realizado mediante EinScan y la superficie de referencia

La tolerancia de forma de superficie se puede calcular como la diferencia entre las dos distancias máximas:

$$\text{Tolerancia}_{\text{sup}} = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = 0.0555 + 0.1000 = 0.1555 \text{ mm}$$

9.4.4.3. Escaneo 2 de la pieza de carrocería con EinScan

En la Figura 130 se presentan las desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 2 realizado mediante EinScan en la pieza de carrocería. Las desviaciones mostradas son muy cercanas a cero, lo que implica buen ajuste de la superficie escaneada en esos puntos concretos.

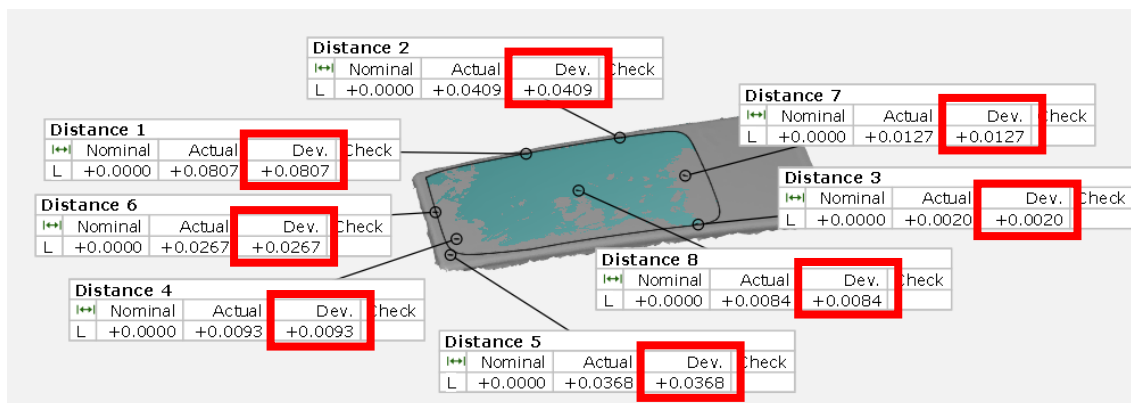


Figura 130. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 2 realizado mediante EinScan

En la Figura 131 se representa la distancia entre los puntos de la superficie escaneada y la superficie de referencia. El valor máximo es de 0.0814 mm y el mínimo de -0.0934 mm.

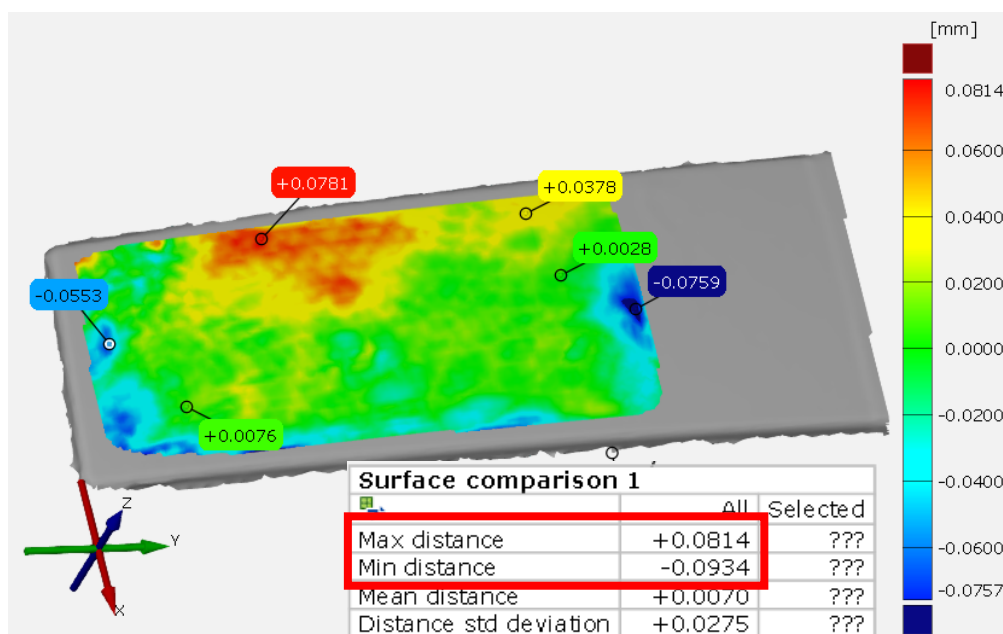


Figura 131. Distancias entre el escaneo 2 de la pieza de carrocería realizado mediante EinScan y la superficie de referencia

La tolerancia de forma de superficie se puede calcular como la diferencia entre las dos distancias máximas:

$$\text{Tolerancia}_{\text{sup}} = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = 0.0814 + 0.0934 = 0.1748 \text{ mm}$$

9.4.4.4. Escaneo 3 de la pieza de carrocería con EinScan

En la Figura 132 se presentan las desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 3 realizado mediante EinScan en la pieza de carrocería. Los valores de estas desviaciones son otra vez cercanos a cero, implicando un buen ajuste de la superficie escaneada en esos puntos.

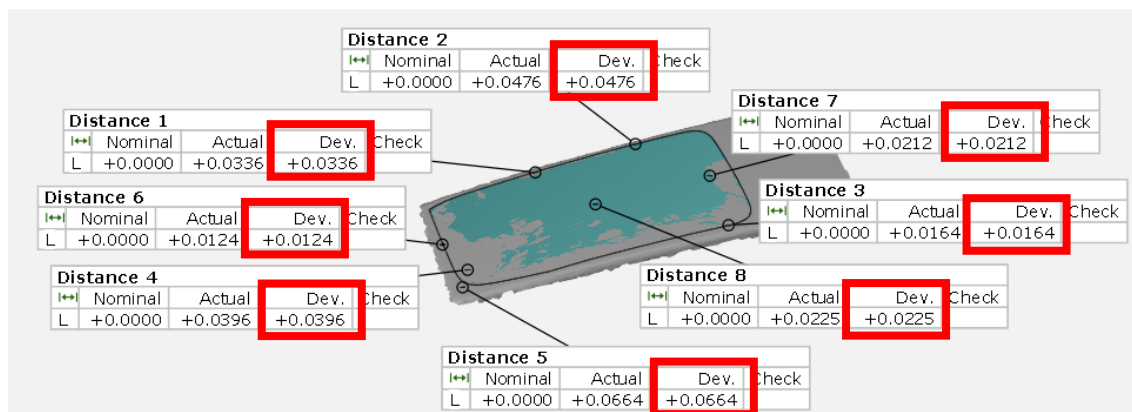


Figura 132. Desviaciones de los 8 puntos en el escaneo 3 realizado mediante EinScan

En la Figura 133 se representa la distancia entre los puntos de la superficie escaneada y la superficie de referencia. El máximo es de 0.0607 mm y el mínimo de -0.1087 mm.

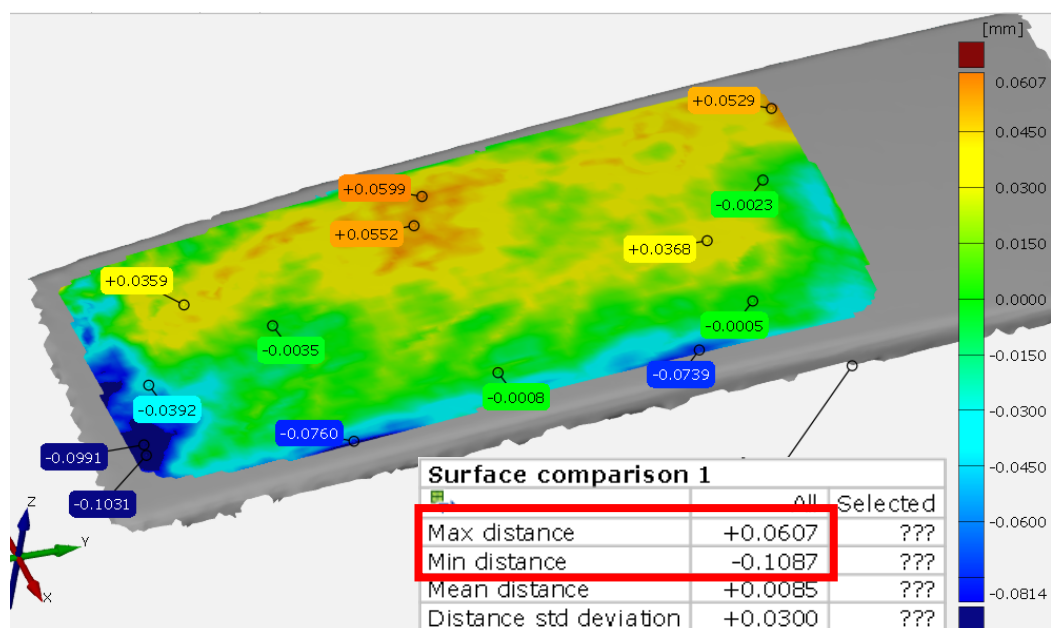


Figura 133. Distancias entre el escaneo 3 de la pieza de carrocería realizado mediante EinScan y la superficie de referencia

La tolerancia de forma de superficie se puede calcular como la diferencia entre las dos distancias máximas:

$$\text{Tolerancia}_{\text{sup}} = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = 0.0607 + 0.1087 = 0.1694 \text{ mm}$$

9.4.4.5. Evaluación del escáner EinScan con el método de las diferencias puntuales

En la Tabla 14, se muestra el resumen de desviaciones para cada punto en cada escaneo

Punto	Desviación escaneo 1 (mm)	Desviación escaneo 2 (mm)	Desviación escaneo 3 (mm)
1	0.0384	0.0807	0.0336
2	0.0364	0.0409	0.0476
3	0.0481	0.002	0.0164
4	0.0011	0.0093	0.0396
5	0.0107	0.0368	0.0664
6	0.0001	0.0267	0.0124
7	0.0001	0.0127	0.0212
8	0.0023	0.0084	0.0225

Tabla 14. Desviaciones para cada punto en cada escaneo en el escáner EinScan

Para evaluar la precisión a partir de las desviaciones de los 8 puntos en los 3 escaneos, se analiza tanto la media como la desviación típica del valor de la desviación de cada punto. En la Tabla 15 se muestran estos valores.

Punto	MEDIA	DESV TIP
1	0.0509	0.0259
2	0.0416	0.0056
3	0.0222	0.0236
4	0.0167	0.0203
5	0.0380	0.0279
6	0.0131	0.0133
7	0.0113	0.0106
8	0.0111	0.0104

Tabla 15. Medias y desviaciones típicas del valor de la desviación de cada punto

Análisis de Precisión: Los puntos 6, 7 y 8 muestran las medias más bajas (0.0131 mm, 0.0113 mm y 0.0111 mm, respectivamente), lo que sugiere que el escaneo ha sido ajustado mejor en estos puntos.

Análisis de Repetibilidad: Los puntos 2, 7 y 8 tienen las desviaciones típicas más bajas (0.0056 mm, 0.0106 mm y 0.0104 mm, respectivamente), lo que sugiere que el escáner es más repetible en estos puntos. El punto 5 presenta una desviación típica alta (0.0279 mm), lo que sugiere menos consistencia en las mediciones.

Conclusión: El escáner EinScan muestra una precisión y repetibilidad razonables si se analizan estos puntos individuales, pues es una precisión de entre 10 y 50 micras, que a su vez viene influenciado por el método de ajuste de las superficies. Sin embargo, que para estos puntos individuales haya una precisión razonable, no quiere decir que para el resto de los puntos no estudiados la haya. Por este motivo se deben estudiar las tolerancias de forma de superficie sin referencia, lo cual se realiza a continuación.

9.4.4.6. Evaluación del escáner EinScan a partir de la tolerancia de forma de superficie

En la Tabla 16 se presenta el resumen de las tolerancias de forma de superficie, sin referencia, obtenidas con el escáner EinScan.

Nº escaneo	Valor de la tolerancia de forma de superficie (mm)
1	0.1555
2	0.1748
3	0.1694

Tabla 16. Resumen de las tolerancias de forma de superficie obtenidas con el escáner HP 3D Scan para la pieza de carrocería

Para evaluar la precisión y repetibilidad del escáner EinScan en la medición de la tolerancia de forma de superficie, se analizan los valores obtenidos en los tres escaneos. La media de los valores de tolerancia de forma de superficie es de 0.1666 mm y la desviación típica de 0.0099 mm.

La media de 0.1666 mm sugiere que el escáner EinScan tiene una precisión razonable en la medición de la tolerancia de forma de superficie. La desviación estándar de 0.0098 mm indica que el escáner es bastante consistente, con pequeñas fluctuaciones en los valores.

El valor máximo obtenido es 0.1748 mm, lo que representa la mayor tolerancia alcanzada (peor resultado) en los escaneos realizados.

Este valor máximo de 0.1748 mm, al igual que en el escáner HP, indica que todos los puntos de la superficie escaneada se encuentran, como máximo, dentro del espacio contenido por dos superficies idénticas a la superficie ideal y paralelas, situadas por encima y por debajo de la ideal, separadas una distancia igual al valor de la tolerancia.

9.4.5. Comparación de las tolerancias de HP 3D Scan, EinScan en el escaneo de la pieza de carrocería

En la Tabla 17 se recopilan los valores de la tolerancia de forma de superficie, sin referencias, obtenidas con el escáner HP 3D Scan y el escáner EinScan en el escaneo de la superficie de la pieza de carrocería.

Nº escaneo	Valor de la tolerancia de forma de superficie (mm) para el escáner HP 3D Scan	Valor de la tolerancia de forma de superficie (mm) para el escáner EinScan
1	0.3459	0.1555
2	0.3253	0.1748
3	0.2486	0.1694

Tabla 17. Tolerancias de forma de superficie de HP 3D Scan y EinScan en el escaneo de la pieza de carrocería

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Anteriormente se ha calculado la media de la tolerancia de forma de superficie obtenida para ambos escáneres, teniendo que la de HP 3D Scan es de 0.3066 mm, y la de EinScan de 0.1666 mm.

Estos valores indican que el escáner EinScan muestra una mejor precisión que HP 3D SCAN en cuando a la tolerancia de forma de superficie se refiere.

Respecto a la repetibilidad, EinScan muestra una mejor repetibilidad con una desviación estándar más baja, 5 veces menor que la del escáner HP.

Los valores máximos de tolerancia obtenidos son de 0.3459 mm para HP 3D Scan y de 0.1748 mm para EinScan, y además el valor máximo de EinScan es menor que el mínimo obtenido con el escáner HP (0.2486), lo cual indica que el escáner EinScan se ha comportado mejor en todos los casos, ofreciendo una mayor precisión que el escáner HP.

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un análisis exhaustivo de las diferentes técnicas de escaneo que pueden llevar a cabo las máquinas de medir por coordenadas (CMM), tanto con modelo CAD como sin él.

Se ha identificado un problema en la CMM utilizada al realizar un escaneo por barrido de superficies en Camio, y se ha diseñado un algoritmo para resolver este inconveniente y permitir el escaneo de superficies 3D suaves por contacto continuo, aunque con ciertas limitaciones. Este algoritmo podrá ser optimizado en el futuro.

Posteriormente, se han comparado diferentes tolerancias en la medición de una pieza de carrocería y un anillo patrón, utilizando una CMM y los escáneres ópticos de luz estructurada HP 3D Scan y Einscan Pro 2X. Los resultados han evidenciado que la CMM proporciona mediciones significativamente más precisas, gracias a su capacidad para realizar mediciones por contacto, lo que minimiza los errores asociados a la captura de datos óptica en el espacio tridimensional.

Se ha comprobado que el escáner EinScan Pro 2X proporciona, en general, mejores resultados en términos de precisión que el HP 3D Scan, aunque con un precio más elevado. Para aplicaciones específicas, como el escaneo de superficies y cilindros, el escáner EinScan ha demostrado mayor precisión, mientras que, para la verificación de superficies planas, ambos escáneres ofrecen resultados similares, con una ligera ventaja para el HP 3D Scan.

En cuanto a las características individuales de cada escáner, el HP 3D Scan destaca por su facilidad de uso y versatilidad para escanear objetos de diferentes tamaños y formas. Sin embargo, presenta desventajas como la necesidad de calibración frecuente, el tamaño del equipo y su dependencia de condiciones de iluminación óptimas para obtener buenos resultados. Por otro lado, el EinScan Pro 2X ofrece una buena portabilidad, versatilidad, y alta velocidad de escaneo, aunque también es menos preciso que la CMM y puede tener dificultades con superficies reflectantes o transparentes.

En conclusión, para aplicaciones que exigen alta precisión y consistencia, la CMM es claramente superior. Si bien los escáneres de luz estructurada como el HP 3D Scan y el EinScan Pro 2X son más rápidos y adecuados para ciertos tipos de análisis y visualización, sus limitaciones en términos de precisión y repetibilidad los hacen menos adecuados para mediciones geométricas exigentes. Dentro de este rango, el EinScan Pro 2X ha demostrado ser superior en cuanto a precisión general frente al HP 3D Scan.

CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA

- Creaform. (3 de Mayo de 2021). Recuperado el 9 de Junio de 2024, de Creaform 3D: <https://www.creaform3d.com/blog/es/que-es-una-cmm-todo-lo-que-necesita-saber-sobre-las-maquinas-de-medicion-por-coordenadas-y-sus-tipos/>
- Fernandes, A. Z. (s.f.). *Exactitud y precisión*. Recuperado el 23 de Julio de 2024, de diferenciador.com: <https://www.diferenciador.com/diferencia-entre-exactitud-y-precision/>
- GD&T Basics . (18 de Diciembre de 2014). *Profile of a surface*. Recuperado el 7 de Junio de 2024, de GD&T Basics: <https://www.gdandtbasics.com/profile-of-a-surface/>
- Keyence. (s.f.). *Fundamentos de GD&T*. Recuperado el 7 de Julio de 2024, de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/gd-and-t/type/form-tolerance.jsp>
- Keyence. (s.f.). *Máquinas de Medición por Coordenadas*. Recuperado el 9 de Junio de 2024, de Keyence: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/3d.jsp>
- LK Metrology. (s.f.). Recuperado el 14 de Abril de 2024, de CAMIO software: https://www.lkmetrology.com/lk_newsite/products/software/camio/
- LK Metrology. (s.f.). CAMIO 8.6 Basic User Guide.
- Machine MFG. (3 de Agosto de 2023). Recuperado el 7 de Julio de 2024, de Comprender los fundamentos de la tolerancia al paralelismo: Guía completa: <https://www.machinemfg.com/es/parallelism-tolerance/>
- Minitab. (s.f.). *¿Qué son la repetibilidad y la reproducibilidad?* Recuperado el 23 de Julio de 2024, de Minitab.com: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/gage-r-r-and-wheeler-s-emp-studies/what-are-repeatability-and-reproducibility/>
- Quiminet. (28 de Agosto de 2015). Recuperado el 9 de Junio de 2024, de Quiminet: <https://www.quiminet.com/articulos/que-es-una-maquina-de-medicion-por-coordenadas-4146025.htm>
- RapidDirect. (13 de Marzo de 2021). Recuperado el 9 de Junio de 2024, de RapidDirect: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/what-is-cmm-machine/>
- Top3DShop. (19 de Agosto de 2020). *EinScan Pro 2X Review: Parts, Specs, Software, Upgrades and More*. Recuperado el 26 de Agosto de 2020, de Top3DShop: <https://top3dshop.com/blog/einscan-pro-2x-3d-scanner-review>
- UNE. (1999). *UNE 82009-2:1999. Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado*.

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

P.1. Equipos utilizados, consumibles y energía

P.1.1. Amortización de Equipos

En la Tabla 18 se calcula el coste total de amortización de los diferentes equipos utilizados, teniendo en cuenta el coste inicial de cada equipo, su vida útil estimada en horas, el coste por hora de operación, y las horas de uso previstas para el proyecto. Al multiplicar el coste por hora por las horas de uso, se obtiene el coste por equipo, que es el valor que contribuye al coste total del proyecto.

Nota: el coste horario de utilizar la CMM suele estar en torno a 40€/h

La suma de los costes de todos los equipos da un coste total de amortización de 2004.23 €.

Equipo	Coste aproximado (€)	Vida útil estimada (años)	Vida útil estimada (h)	Coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste por equipo (€)
Máquina de Medir por Coordenadas (CMM):	70000	20	175200.00	40.00	50	2,000.00 €
Escáner HP 3D SCAN	6950	15	131400.00	0.05	15	0.79 €
Einscan Pro 2X	8000	15	131400.00	0.06	15	0.91 €
Máquina de Impresión 3D Blackbelt	6500	10	87600.00	0.07	34	2.52 €
TOTAL						2,004.23 €

Tabla 18. Coste total de amortización de equipos

P.1.2. Consumibles

La Tabla 19 y Tabla 20 detallan el cálculo del coste del filamento colorFabb nGen negro utilizado para imprimir el soporte de la pieza de carrocería. La Tabla 19 calcula el coste volumétrico del filamento considerando el precio, peso y densidad que ofrece el fabricante. Puede consultarse en:

https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_nGen.pdf

La Tabla 20 aplica este coste volumétrico al volumen de filamento utilizado en la impresión, resultando en un coste total de 46.68 €.

Consumible	Densidad (g/cm ³)	Peso del hilo (g)	Coste (€)	Coste del gramo (€/g)	Coste volumétrico (€/cm ³)
Filamento colorFabb nGen negro	1.2	2200	79.09 €	0.03595	0.04314

Tabla 19. Coste volumétrico del filamento

Consumible	Coste por cm ³ (€/cm ³)	Volumen de la pieza (cm ³)	%material (infill)	Volumen utilizado (cm ³)	Coste Total (€)
Filamento colorFabb nGen negro	0.04314	5410	20.00%	1082	46.68 €

Tabla 20. Coste total del material para impresión del soporte

Como concepto adicional de consumibles (Tabla 21), se incluye un *item* adicional bajo el concepto de “varios”, para designar a útiles como tornillería, alcohol, Cebralín, etc. Se considera un coste estimado de 15€

Consumible	Coste (€)
VARIOS (tornillería, alcohol, Cebralín, etc)	15.00 €

Tabla 21. Otros consumibles (VARIOS)

P.1.3. Uso de Software

Como para el desarrollo de este trabajo ha sido necesario emplear diferentes *softwares*; aunque la UPV posee la licencia de los que no son gratuitos, hay que repercutir el coste por su uso en el coste total. En la Tabla 22 se calcula el coste por uso del software, que asciende a 14.22 €.

Software	Coste de la licencia (€)	Duración de la licencia (años)	Duración de la licencia (h)	Coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste por uso(€)
CAMIO 8.6	1,200.00 €	2	17280	0.07	60	4.17 €
SolidWorks	3,480.00 €	1	8640	0.40	10	4.03 €
Catia V5	4,700.00 €	1	8640	0.54	7	3.81 €
GOM Inspect 2019	0.00 €	-	-	0.00	10	- €
PTC Creo	2,000.00 €	1	8640	0.23	4	0.93 €
Cura (Creality Belt, Blackbelt Cura)	0.00 €	-	-	0.00	2	- €
Rhinoceros	1,200.00 €	sin caducidad	-	0.03	1	0.03 €
Autodesk Autocad	2,342.00 €	1	8640	0.27	2	0.54 €

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Software	Coste de la licencia (€)	Duración de la licencia (años)	Duración de la licencia (h)	Coste por hora (€/h)	Horas de uso (h)	Coste por uso(€)
Microsoft Office	69.00 €	1	8640	0.01	1200	0.72 €
TOTAL						14.22 €

Tabla 22. Coste por uso de software

P.1.3. Energía

En la Tabla 23 se calcula el coste de energía asociado al uso de los equipos, considerando su potencia estimada (en kW), horas de uso, y el precio de la energía (en €/kWh). Para cada equipo, se multiplica la potencia por las horas de uso para obtener el consumo total de energía en kWh, que luego se multiplica por el precio de la energía para determinar el coste energético en euros. El coste total de energía para todos los equipos es de 45.76 €.

Equipo	Potencia estimada (kW)	Horas de uso (h)	Consumo total (kWh)	Precio de la energía (€/kWh)	Coste energía (€)
Máquina de Medir por Coordenadas (CMM)	5	50	250	0.17	42.50 €
Escáner HP 3D SCAN	0.3	15	4.5	0.17	0.77 €
Einscan Pro 2X	0.3	15	4.5	0.17	0.77 €
Máquina de Impresión 3D Blackbelt	0.3	34	10.2	0.17	1.73 €
TOTAL					45.76 €

Tabla 23. Coste de energía asociado al uso de los equipos

P.2. Mano de Obra

En la Tabla 24 se detallan los costes de la mano de obra del proyecto. Se consideran tres trabajadores: Ingeniero Junior (Autor del TFM), Ingeniero Senior (Tutor del TFM) y Técnico de Taller. La tabla incluye la tasa horaria en euros por hora (€/h), valores que se han extraído de la **Disposición 5873 del BOE núm. 73 de 2024:**

<https://www.boe.es/boe/dias/2024/03/23/pdfs/BOE-A-2024-5873.pdf>

A partir de las horas dedicadas se calcula el coste total en euros (€) de cada trabajador. El coste total de la mano de obra del proyecto es de 4980.73 €.

Trabajador	Salario Bruto anual (€/año)	Tasa horaria (€/h)	Horas dedicadas (h)	Coste total (€)
Ingeniero Junior (Autor)	25000	13.02	300	3,906.25 €
Ingeniero Senior (Tutor)	40000	20.83	50	1,041.67 €
Técnico de Taller	21000	10.94	3	32.81 €
TOTAL				4,980.73 €

Tabla 24. Coste de la mano de obra del proyecto

P.3. Coste total del proyecto

En la Tabla 25 se presenta el desglose de los gastos del proyecto. El total de todos estos gastos asciende a 7115.48 €.

Concepto	Coste (€)
Coste total de amortización de equipos	2,004.23 €
Filamento colorFabb nGen negro	46.68 €
VARIOS (tornillería, alcohol, Cebalín, etc)	15.00 €
Uso de software	14.22 €
Coste de la mano de obra	4,980.73 €
Coste de la energía	45.76 €
GASTOS TOTALES	7,115.48 €

Tabla 25. Desglose de los gastos del proyecto

En la Tabla 26 se incluyen dos conceptos adicionales relacionados con el proyecto: el beneficio y el IVA. El beneficio se ha calculado como el 10% del coste total del proyecto, y representa la ganancia adicional que se obtiene por la gestión y ejecución del proyecto. Por otro lado, el IVA del 21% es el impuesto que se añade al coste total, conforme a la normativa fiscal vigente.

Otros conceptos	Coste (€)
Beneficio (10%)	710.66 €
IVA (21%)	1,492.39 €

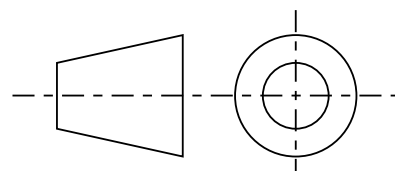
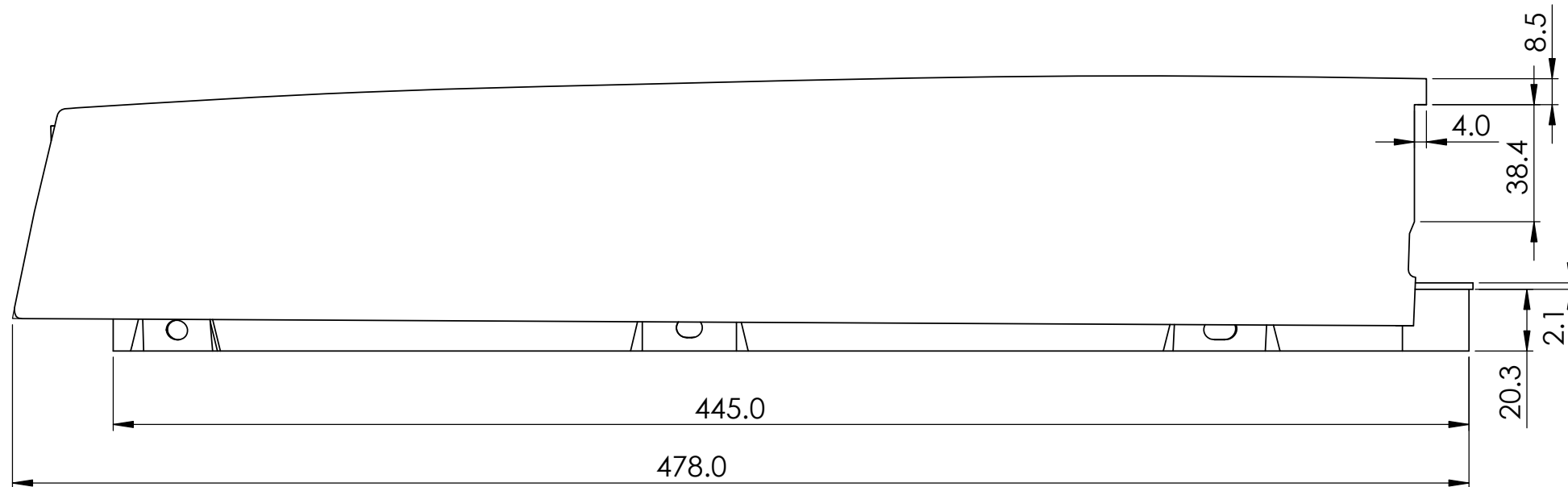
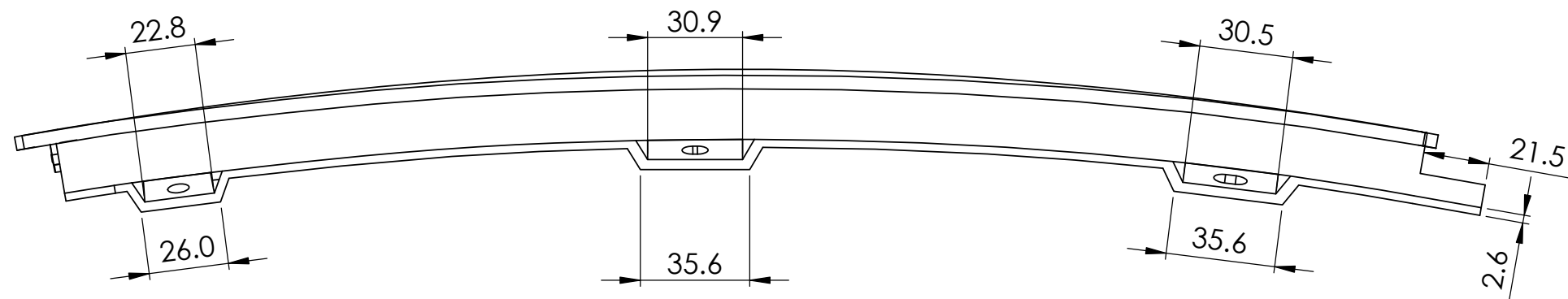
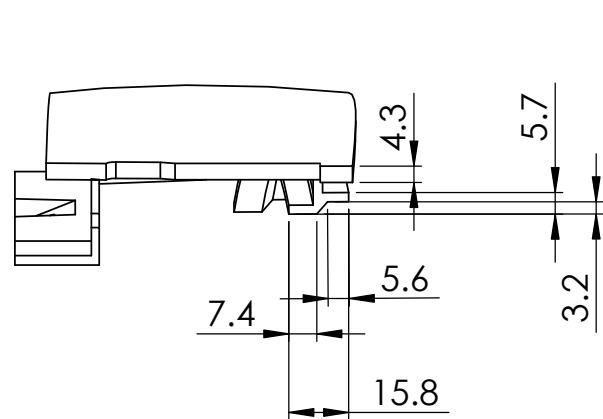
Tabla 26. Porcentaje de beneficio e IVA

En la Tabla 27 se presenta el coste total del proyecto como la suma de los gastos totales, el beneficio del 10% y el IVA del 21%. El coste total del proyecto resulta en 9309.67 €.



Concepto	Coste (€)
GASTOS TOTALES	7,115.48 €
Beneficio (10%)	710.66 €
IVA (21%)	1,492.39 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	9,309.67 €

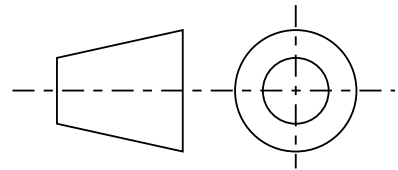
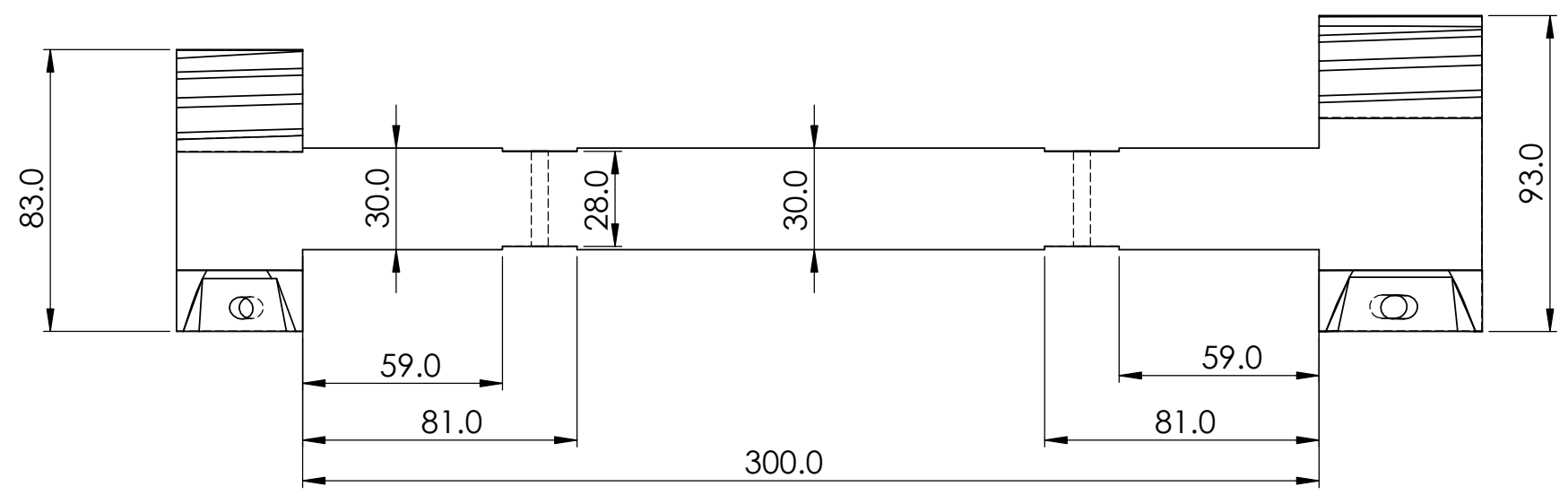
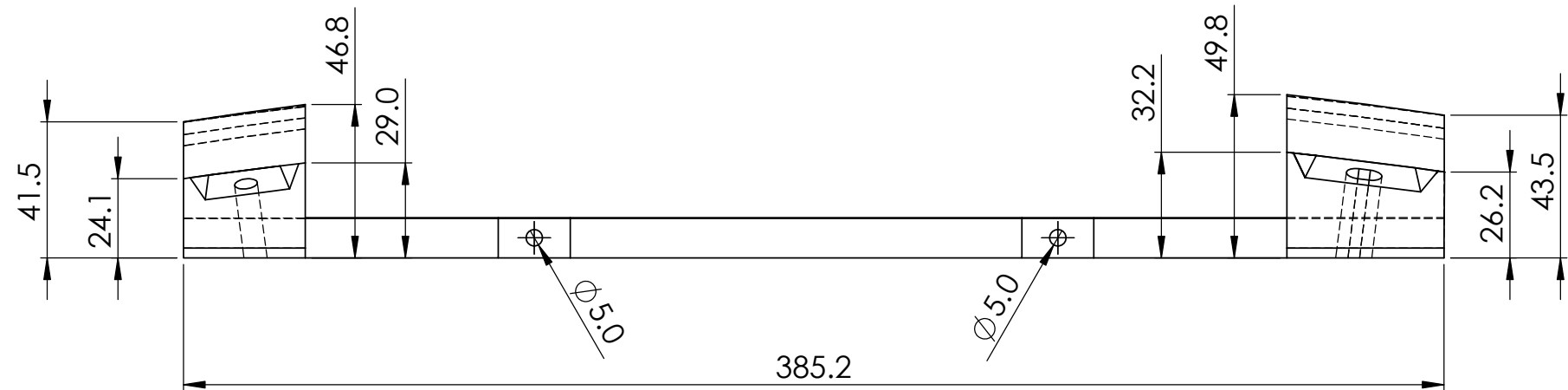
Tabla 27. Coste total del proyecto

PLANOS





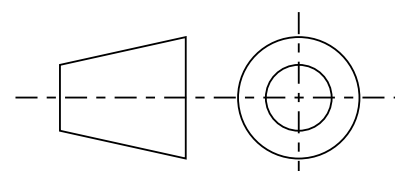
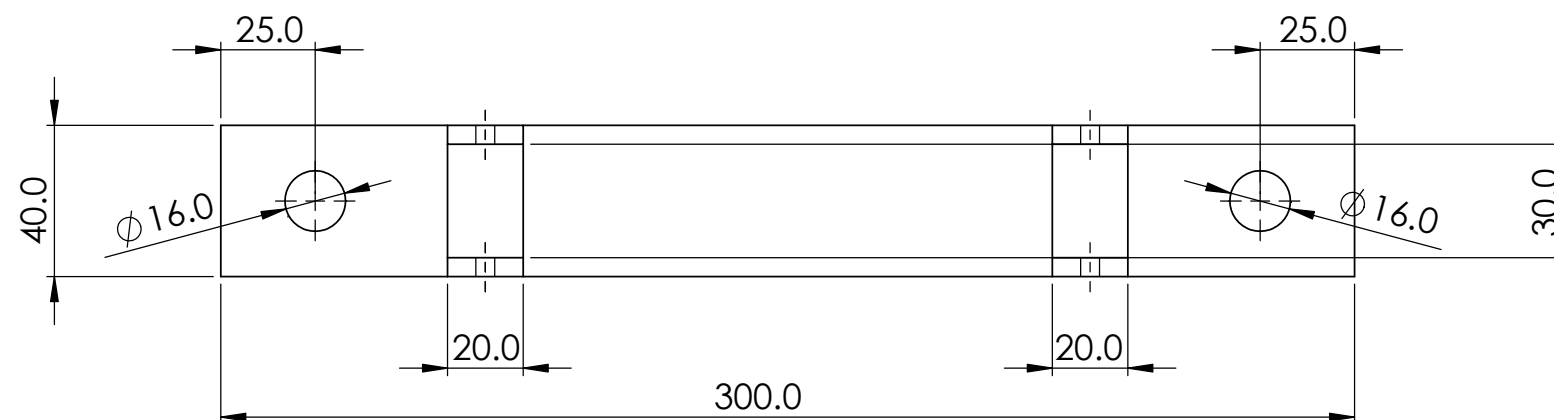
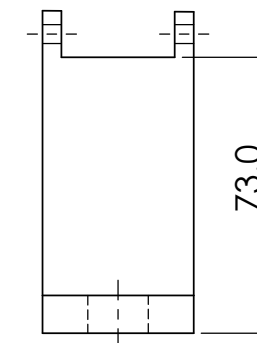
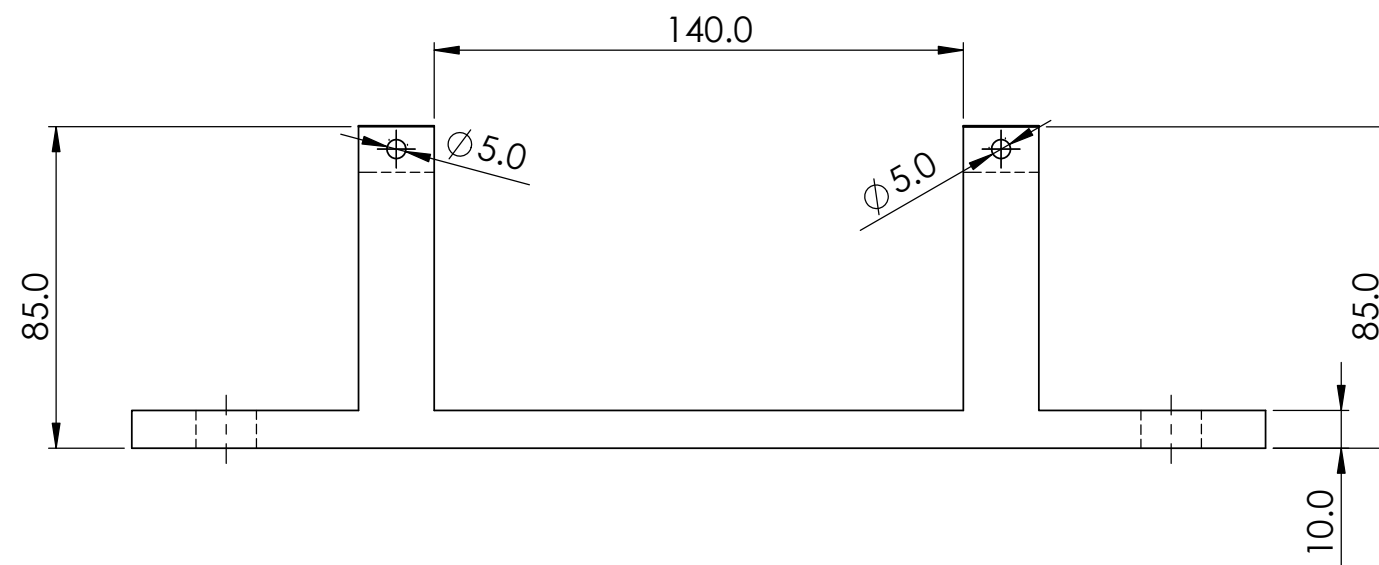
**Resto de cotas en modelo CAD

TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA	Proyecto: Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	Plano: Pieza de carrocería	Unidades: mm	Tolerancias generales: DIN ISO 2768-mk	Fecha: Septiembre 2024	Nº Plano: 1
		Autor: Carlos Ariza Cólera	Material: ABS		Escala: 1:2	





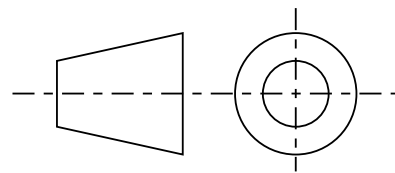
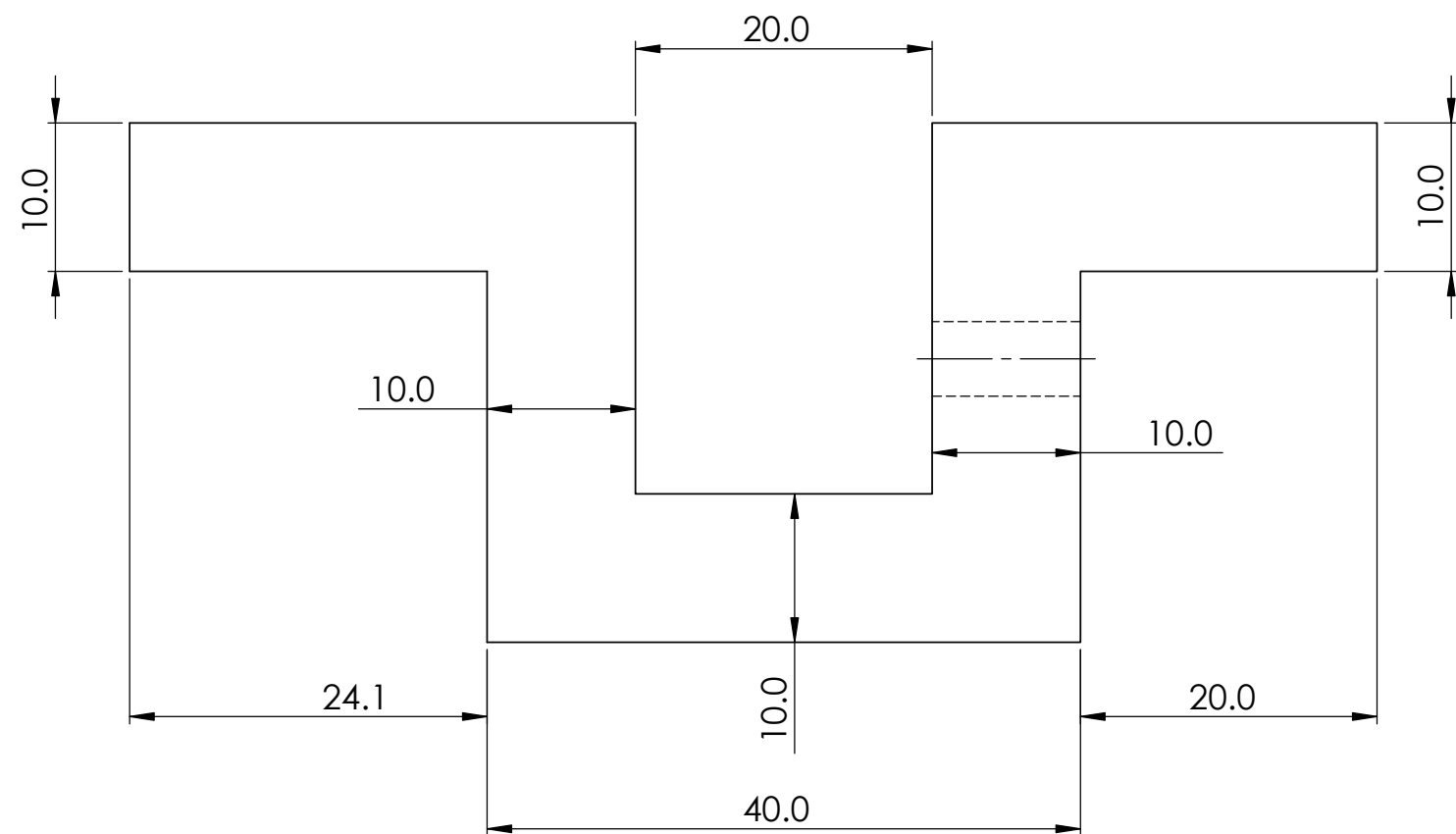
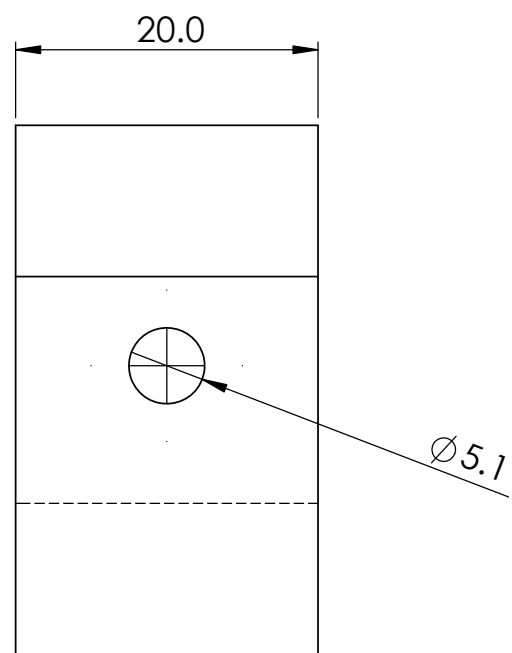
**Resto de cotas en modelo CAD



TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA	Proyecto: Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	Plano: Soporte superior	Unidades: mm	Tolerancias generales: DIN ISO 2768-mk	Fecha: Septiembre 2024	Nº Plano: 2
		Autor: Carlos Ariza Cólera	Material: ABS		Escala: 1:2	

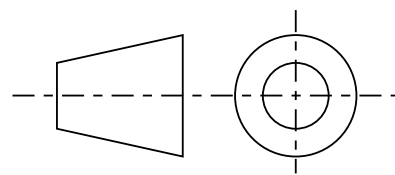
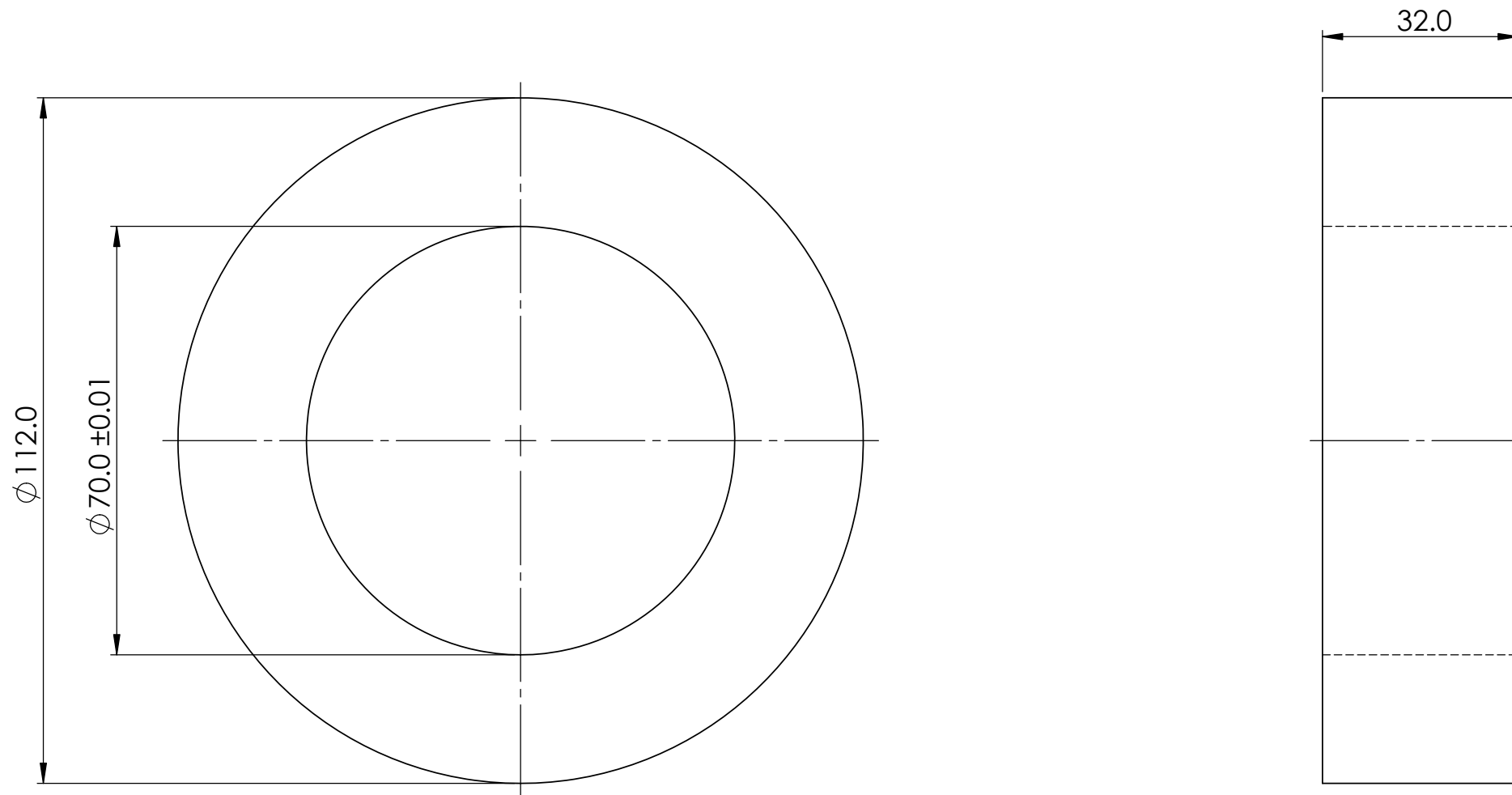




**Resto de cotas en modelo CAD

<p>TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA</p>	<p>Proyecto: Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas</p>	<p>Plano: Soporte inferior</p> <p>Autor: Carlos Ariza Cólera</p>	<p>Unidades: mm</p> <p>Material: ABS</p>	<p>Tolerancias generales: DIN ISO 2768-mk</p>	<p>Fecha: Septiembre 2024</p> <p>Escala: 1:2</p>	<p>Nº Plano: 3</p>
--	--	--	--	---	--	--------------------



TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA	Proyecto: Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	Plano: Soporte del sistema de coordenadas	Unidades: mm	Tolerancias generales: DIN ISO 2768-mk	Fecha: Septiembre 2024	Nº Plano: 4
		Autor: Carlos Ariza Cólera	Material: ABS		Escala: 2:1	



TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA	Proyecto: Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas	Plano: Anillo Patrón	Unidades: mm	Tolerancias generales: DIN ISO 2768-mk	Fecha: Septiembre 2024	Nº Plano: 5
		Autor: Carlos Ariza Cólera	Material: Acero revenido y templado	Escala: 1:1		

PLIEGO DE CONDICIONES

PLIEGO DE CONDICIONES

PC.1. Objeto del pliego de condiciones

El objetivo de este documento es establecer las condiciones técnicas, económicas y administrativas bajo las cuales se llevará a cabo el estudio de escaneo 3D utilizando una máquina de medir por coordenadas (CMM), así como la posterior comparación de las tolerancias obtenidas con otras técnicas de escaneo óptico. Este pliego define los derechos, deberes y responsabilidades compartidas entre las partes involucradas en el proyecto, garantizando que se alcancen las soluciones propuestas para los desafíos técnicos planteados.

PC.2. Documentos que definen el proyecto

El presente proyecto se compone de los siguientes documentos:

- Memoria técnica
- Presupuesto
- Planos
- Pliego de condiciones
- Anexos

Este conjunto de documentos constituye las especificaciones técnicas que fundamentan la ejecución y adecuado desarrollo del proyecto de escaneo 3D y comparación de tolerancias.

Cualquier aspecto mencionado en alguno de estos documentos y no referido en los demás deberá ser ejecutado como si estuviera debidamente especificado en todos ellos.

La omisión o descripción incorrecta en este pliego de condiciones o en los planos de detalles esenciales para la correcta realización del proyecto, conforme a lo propuesto en los mismos o según las prácticas habituales, no exime al contratista de la obligación de llevarlos a cabo como si hubieran sido claramente definidos desde un principio.

PC.3. Condiciones Generales

PC.3.1. Ejecución del proyecto

Para la correcta ejecución del presente proyecto se deberán seguir las siguientes directrices:

1. **Cumplimiento de Especificaciones:** Se deberá adherirse a las especificaciones e indicaciones técnicas descritas en la Memoria Técnica del proyecto y en los anexos correspondientes. Estos documentos proporcionan los detalles metodológicos y los requisitos técnicos esenciales para la correcta realización del estudio y la evaluación de los resultados.
2. **Metodología y Procedimientos:** La metodología para el escaneo 3D con la CMM y las técnicas ópticas, así como los procedimientos para la comparación de tolerancias, se encuentran descritos en detalle en la memoria técnica. En los anexos se podrá encontrar información adicional útil para llevar a cabo las mediciones y análisis.

3. **Documentación y Registro:** Se debe mantener un registro detallado de todos los procesos de escaneo y comparación, incluyendo datos brutos, configuraciones de equipo, y cualquier incidencia ocurrida. Esta documentación será esencial para la validación y revisión de los resultados obtenidos.
4. **Revisión y Validación:** Los resultados del escaneo y la comparación de tolerancias deben ser revisados y validados conforme a los criterios establecidos en la Memoria Técnica. Cualquier desviación significativa respecto a las expectativas debe ser analizada y documentada, proponiendo las acciones correctivas necesarias.

El seguimiento riguroso de estas directrices garantizará que el proyecto se ejecute de manera eficaz y se logren los objetivos planteados con precisión y calidad.

PC.3.2. Condiciones facultativas

En la ejecución de este proyecto, participan los siguientes actores:

- **Empresa cliente.** Es la entidad que encarga la realización del proyecto y proporciona los recursos financieros necesarios para su ejecución. Su responsabilidad incluye la revisión y aceptación de los entregables del proyecto, así como la supervisión general del cumplimiento de los objetivos establecidos.
- **Empresa ejecutora.** Es la entidad responsable de llevar a cabo el proyecto, desde la planificación inicial hasta la entrega final. Posee el conocimiento técnico necesario y es la encargada de aplicar las metodologías de escaneo 3D y análisis comparativo según las especificaciones acordadas.

PC.3.2.1. Obligaciones y derechos de la empresa ejecutora

El incumplimiento de los siguientes derechos y obligaciones por parte de la empresa encargada del proyecto puede llevar a la terminación del contrato:

- **Adherencia a los Requerimientos.** La empresa ejecutora debe cumplir estrictamente con los requerimientos técnicos y las especificaciones acordadas con la empresa cliente.
- **Confidencialidad.** La empresa ejecutora tiene la obligación de mantener la confidencialidad de toda la información proporcionada por el cliente, así como de los datos generados durante el desarrollo del proyecto.
- **Informes de Progreso.** Se debe mantener al cliente informado sobre el progreso en las diferentes etapas del proyecto, asegurando la transparencia y la comunicación efectiva.
- **Acceso a Información.** La empresa ejecutora tiene derecho a solicitar y recibir toda la información necesaria para la correcta realización y puesta en marcha del proyecto.

PC.3.2.2. Obligaciones y derechos de la empresa cliente

El cliente, por su parte, también tiene derechos y obligaciones que, de no cumplirse, podrían resultar en la terminación del contrato:

- **Cumplimiento de Acuerdos.** La empresa cliente debe cumplir con todas las condiciones acordadas contractualmente, incluyendo cualquier modificación que se acuerde durante el desarrollo del proyecto.
- **No Interferencia.** La empresa cliente no deberá interferir en el desarrollo normal del proyecto, respetando en todo momento el trabajo técnico de la empresa ejecutora.

- **Derecho a Información.** El cliente tiene derecho a recibir actualizaciones regulares sobre el estado del proyecto y a ser consultado en decisiones clave.
- **Decisión sobre el Proyecto.** El cliente puede tomar decisiones relacionadas con el inicio, el ritmo y la calidad de las distintas fases del proyecto, siempre y cuando se respeten los plazos y términos establecidos en el contrato.

PC.3.2.3. Plazos de Ejecución del Proyecto

Una vez que se haya determinado la fecha de inicio del proyecto, se establecerá, mediante acuerdo firmado, un plazo final para la conclusión del mismo. Este plazo será acompañado de un plan detallado que será entregado al cliente, describiendo las etapas de ejecución y los hitos clave a alcanzar a lo largo del proyecto.

PC.3.3. Condiciones económicas

Este apartado establece y regula las relaciones económicas entre la empresa cliente y la empresa ejecutora a lo largo de la ejecución del proyecto.

PC.3.3.1. Garantía de Cumplimiento

La empresa cliente deberá depositar un porcentaje del coste total estimado del proyecto como garantía al momento de firmar el contrato. Este importe, fijado en un 10% del presupuesto total, se descontará de la cantidad final a abonar una vez se hayan alcanzado y verificado los objetivos establecidos en el proyecto.

PC.3.3.2. Ajustes de Precios

Cualquier coste adicional que no haya sido contemplado en el presupuesto inicial, y que surja durante el desarrollo o la ejecución del proyecto, deberá ser aprobado por la empresa cliente antes de su implementación.

PC.3.3.3. Mejoras y Cambios

Las modificaciones o mejoras sugeridas por la empresa cliente después de la firma del contrato serán costeadas por la misma. En caso de que la empresa desarrolladora proponga mejoras por iniciativa propia, estas no afectarán al presupuesto acordado inicialmente, a menos que se acuerde lo contrario por ambas partes.

PC.3.3.4. Pago del Proyecto

El cliente dispondrá de un plazo de 60 días para realizar el pago total del proyecto, incluyendo tanto el importe presupuestado como cualquier coste adicional previamente aprobado. Las condiciones y la modalidad de pago serán acordadas mutuamente por ambas partes antes del inicio del proyecto.

PC.3.4. Condiciones Legales

Este apartado establece las condiciones legales que deberán cumplir todas las partes involucradas en el desarrollo del presente proyecto, así como el tipo de contrato y las responsabilidades asociadas.

PC.3.4.1. Tipo de Contrato

El contrato aplicable a este proyecto será un **contrato a precio fijo**. Esto implica que el precio acordado no podrá ser alterado una vez firmado el contrato, salvo en casos excepcionales.

PC.3.4.2. Resolución de Conflictos y Jurisdicción Competente

En caso de que surjan desacuerdos entre las partes, el responsable designado para la gestión del contrato actuará como mediador en un primer intento de resolver la disputa. Si no se alcanza una solución, ambas partes designarán un representante para intentar llegar a un acuerdo. En última instancia, si el conflicto no se resuelve, las partes tendrán que someter el caso a la jurisdicción competente para su resolución judicial.

PC.3.4.3. Responsabilidades de la Empresa Desarrolladora

La empresa encargada de la ejecución del proyecto deberá asumir las siguientes responsabilidades durante la vigencia del contrato:

- **Solvencia Económica.** Debe mantener la capacidad financiera necesaria para cumplir con todas las obligaciones contractuales.
- **Cumplimiento Legal.** Debe asegurar que la situación laboral y legal de todos sus empleados se encuentra en conformidad con las normativas vigentes.
- **Calidad del Trabajo.** Debe garantizar que el trabajo realizado cumple con los estándares de calidad acordados.
- **Cumplimiento de Plazos.** Debe respetar los plazos de entrega y ejecución establecidos en el contrato.

PC.3.4.4. Terminación del Contrato

Las siguientes circunstancias pueden justificar la terminación del contrato:

- **Retraso Injustificado.** Retrasos significativos en la ejecución del proyecto sin causa justificada.
- **Abandono del Proyecto.** La suspensión o abandono de los trabajos de ejecución sin previo aviso ni justificación.
- **Razones Administrativas.** Causas administrativas que imposibiliten la continuación del proyecto.
- **Causas de Fuerza Mayor.** Fallecimiento del responsable principal del proyecto o cualquier evento que imposibilite legalmente su continuación.

Si la empresa cliente decidiera rescindir el contrato de manera unilateral, deberá abonar a la empresa desarrolladora el coste de los trabajos completados hasta la fecha, así como el 50% del valor de los trabajos pendientes de realización.

PC.4. Condiciones Técnicas

En este apartado se especifican las características técnicas requeridas para los equipos y herramientas utilizados en el proyecto, así como los criterios técnicos que deben cumplirse para llevar a cabo proyecto.

PC.4.1. Especificaciones informáticas

En este apartado se detallan las características recomendables de los equipos informáticos a emplear en el desarrollo del proyecto, así como el software utilizado para su ejecución.

PC.4.1.1. Especificaciones de Hardware

Aunque no son los requisitos mínimos, se recomienda que el equipo utilizado para el desarrollo del proyecto cuente con especificaciones técnicas similares a las siguientes:

- **Memoria RAM:** 16gb
- **Procesador:** Intel Core i7
- **Sistema operativo:** Windows 10
- **Tarjeta gráfica:** Nvidia Geforce 940MX
- **Disco duro:** SSD 1TB

PC.4.1.2. Software empleado

A continuación, se muestra una lista del software empleado para el desarrollo del proyecto:

- Solidworks 2023
- PTC Creo Parametric 9.0.7.0.
- Catia V5-6R2016
- Camio 8.6
- GOM-Inspect 2019
- BlackBelt Cura 3.6.2.
- Rhino 7
- Autodesk Autocad 2025
- Microsoft Office

Todas las aplicaciones informáticas utilizadas en la ejecución del proyecto deben contar con una licencia académica o profesional, o ser software de libre distribución.

PC.4.2 Aspectos Técnicos y Operativos

Este apartado proporciona una visión integral de los elementos técnicos y operativos esenciales para la correcta ejecución del proyecto de escaneo 3D. Aquí se detallan las directrices para la gestión y manejo de archivos CAD, se describen los equipos utilizados, se especifican las características técnicas de los escaneos realizados y se aborda el material empleado para el soporte de las piezas.

PC.4.2.1. Gestión y manejo de archivos CAD

En relación al uso de archivos CAD durante la ejecución y desarrollo del proyecto, se establecen las siguientes pautas:

- Los archivos CAD de las piezas diseñadas se guardarán en el formato específico del software utilizado, así como en el formato estándar STEP, y en formatos STL y gcode para la impresión 3D.
- Para los ficheros de escaneo, los archivos de la nube de puntos generados por la CMM se almacenarán en formato IGES, mientras que los escaneos realizados con HP 3D Scan y EinScan se guardarán en formatos STL e IGES.
- Si en el documento de Planos de este proyecto faltaran dimensiones, estas podrán verificarse mediante un visor CAD.

PC.4.2.2. Equipos empleados

Para el proyecto, se utilizan equipos avanzados que garantizan precisión y eficiencia en la captura de datos. A continuación, se detallan los equipos utilizados, destacando que no es necesario que sean estas versiones exactas, pero sí con especificaciones similares.

- Máquina de medición por coordenadas Nikon Altera 10.7.6
- Impresora 3D
- HP 3D Scan
- Einscan Pro 2X 2020

PC.4.2.3. Características de los Escaneos

En este apartado se especifican las características que deben cumplir los escaneos realizados para garantizar la precisión y comparabilidad en la evaluación de tolerancias entre las distintas técnicas utilizadas.

Eliminación de Partes No Necesarias. Durante el proceso de escaneo y análisis, será necesario eliminar todas las partes que no sean relevantes para la comparación de tolerancias. Esta limpieza de datos asegura que únicamente las áreas críticas y de interés se incluyan en el análisis, evitando la influencia de otros elementos que puedan afectar a los resultados.

Uniformidad en la Nube de Puntos. Para asegurar la comparabilidad entre los diferentes métodos de escaneo, la nube de puntos generada por cada técnica deberá tener una densidad de puntos similar. Esto implica que el número de puntos en las nubes generadas por las distintas técnicas (HP 3D Scan y EinScan) debe ser comparable para permitir una evaluación equitativa y precisa de las tolerancias. Las discrepancias significativas en la densidad de puntos pueden comprometer la validez de la comparación y deben ser minimizadas a través de ajustes en los parámetros de escaneo o procesamiento de datos.

PC.4.2.4. Material del Soporte

En el desarrollo del proyecto, el soporte para la pieza de carrocería es un componente que sirve para asegurar una correcta alineación y estabilidad durante el proceso de escaneo y medición. El material seleccionado para la fabricación del soporte es el filamento colorFabb nGen negro, sin embargo, se puede emplear otro material, ya que las propiedades no son críticas.

PC.5. Relación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En el contexto global actual, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas proporcionan una hoja de ruta crucial para enfrentar los desafíos ambientales, sociales y económicos. La integración de estos objetivos en los proyectos industriales no solo refuerza el compromiso con un futuro más sostenible, sino que también impulsa la innovación y la eficiencia en los procesos.

El presente proyecto, que utiliza una máquina de medir por coordenadas (CMM) y técnicas ópticas avanzadas, se alinea con varios ODS relevantes, reflejando un enfoque integral hacia la sostenibilidad. Este apartado explora cómo el proyecto contribuye a varios de los ODS y se evaluarán tanto los beneficios tangibles, como los intangibles.

PC.5.1. ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Contribución del Proyecto:

El proyecto promueve la innovación tecnológica al utilizar técnicas avanzadas de medición y análisis. Esto fomenta el desarrollo de infraestructuras sostenibles al mejorar la precisión en la fabricación y el diseño de productos, lo que puede resultar en procesos más eficientes y menos desperdicio de recursos.

Beneficios:

- **Tangibles:** Mejora en la calidad de los productos fabricados, reducción de costes operativos y optimización de procesos industriales.
- **Intangibles:** Fomento de una cultura de innovación en la industria, fortalecimiento de la competitividad y creación de un entorno propicio para la investigación y el desarrollo.

PC.5.2. ODS 12: Producción y Consumo Responsables

Contribución del Proyecto:

El proyecto contribuye a prácticas de producción responsables al permitir un análisis más preciso de los materiales y procesos, lo que puede llevar a una reducción en el uso de recursos y generación de residuos.

Beneficios:

- **Tangibles:** Disminución de la cantidad de desechos generados durante el proceso de producción y optimización del uso de materiales.
- **Intangibles:** Conciencia ambiental entre los participantes del proyecto y promoción de prácticas sostenibles en la industria, lo que puede influir en la adopción de políticas más responsables.

PC.5.3. ODS 13: Acción por el Clima

Contribución del Proyecto:

Al mejorar la eficiencia en los procesos de producción y reducir el desperdicio de recursos, el proyecto contribuye indirectamente a la mitigación del cambio climático. La optimización de procesos puede resultar en una menor huella de carbono asociada a la producción industrial.

Beneficios:

- **Tangibles:** Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a través de procesos más eficientes.
- **Intangibles:** Sensibilización sobre la importancia de la sostenibilidad y el cambio climático, promoviendo un enfoque más responsable hacia la producción industrial.

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL BÁSICO DE USO DE CAMIO

A.1. Aspectos generales y puesta en marcha

A.1.1. Procedimiento de trabajo

1. Situar la pieza en la máquina ("*locate cartesian*")
2. Cargar el palpador adecuado
3. Establecer el sistema de coordenadas de la pieza "cero pieza" (en modo manual).
4. Medición de geometría (en modo automático)
5. Cálculo de tolerancias

A.1.2. Recomendaciones para hacer copias de programas

Al hacer una **copia de un programa** de camio, **borrar siempre el archivo *.btc**, ya que, si no se borra, se sobrescribirá el archivo original. Este archivo contiene los directorios de todos los ficheros necesarios. Al borrarlo, el programa simplemente pedirá la localización de los mismos.

A.1.3. Establecer una ubicación de una pieza en la máquina

Para trasladar una pieza y tenerla en esa posición siempre que se abra el fichero, se debe clicar en: **Model → Locate Cartesian** (ver Figura de anexo 1)

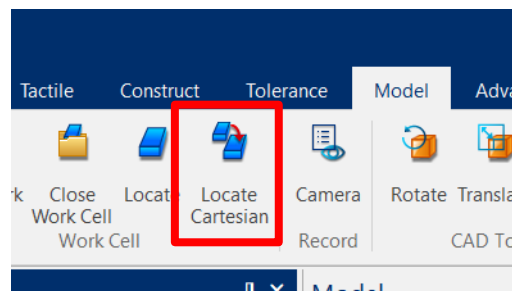


Figura de anexo 1. Ubicación del comando "Model →Locate Cartesian"

Y modificar los valores deseados en "*rotate*" y "*translate*" para situar la pieza en la posición deseada (ver Figura de anexo 2)

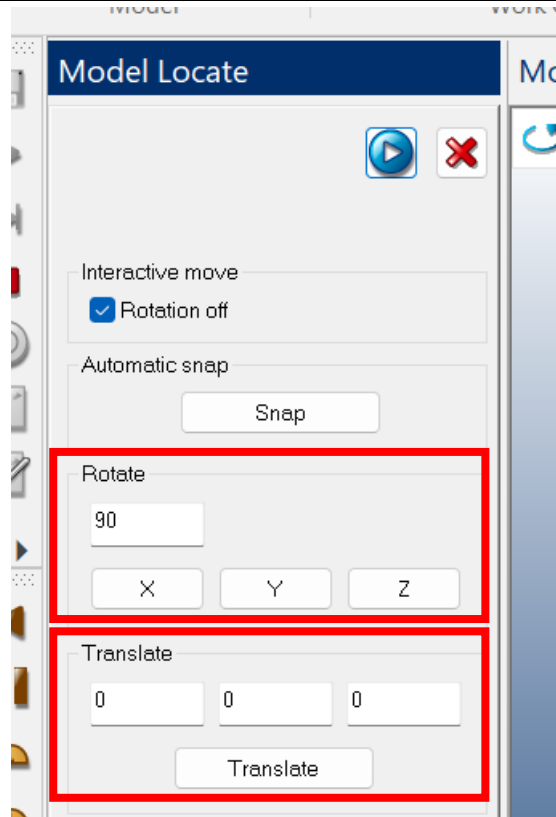




Figura de anexo 2. Modificación de los valores “rotate” y “translate”

Pinchar en  para aplicar los cambios y sobre el icono de aceptar en verde 

A.1.4. Importación de los palpadores calibrados

Clicar “Import” en la ventana de “Sensors” (ver Figura de anexo 3)

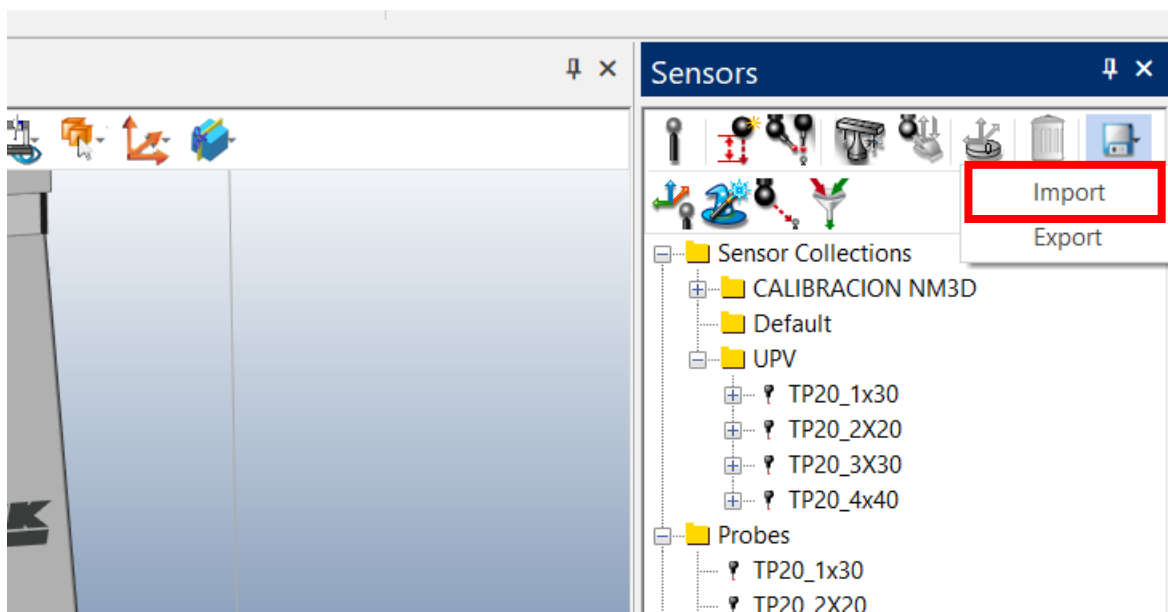


Figura de anexo 3. Opción “Import” en la ventana de “Sensors”

Seleccionar *MachineData.machxml* marcando la casilla de *Machine description* (ver Figura de anexo 4)

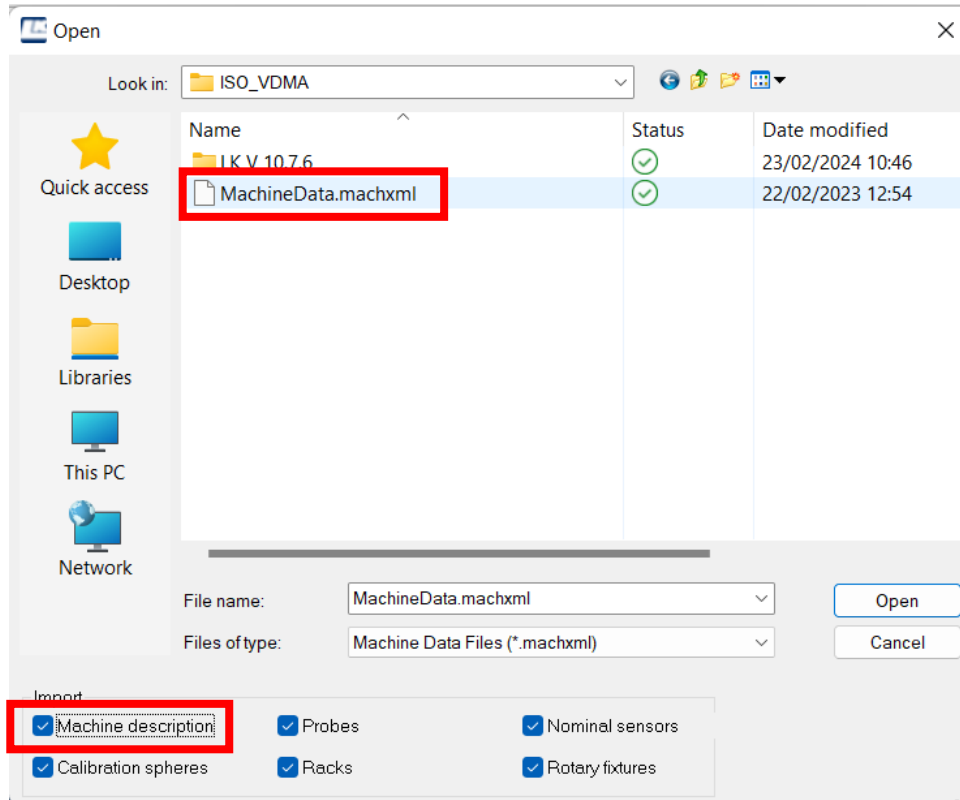


Figura de anexo 4. Fichero *MachineData.machxml*

A.1.5. Cargar el palpador adecuado

1. Clic derecho y pulsar "RECALL" al Sensor adecuado (ver Figura de anexo 5)
2. Clic derecho y pulsar "SELECT" (ver Figura de anexo 5)

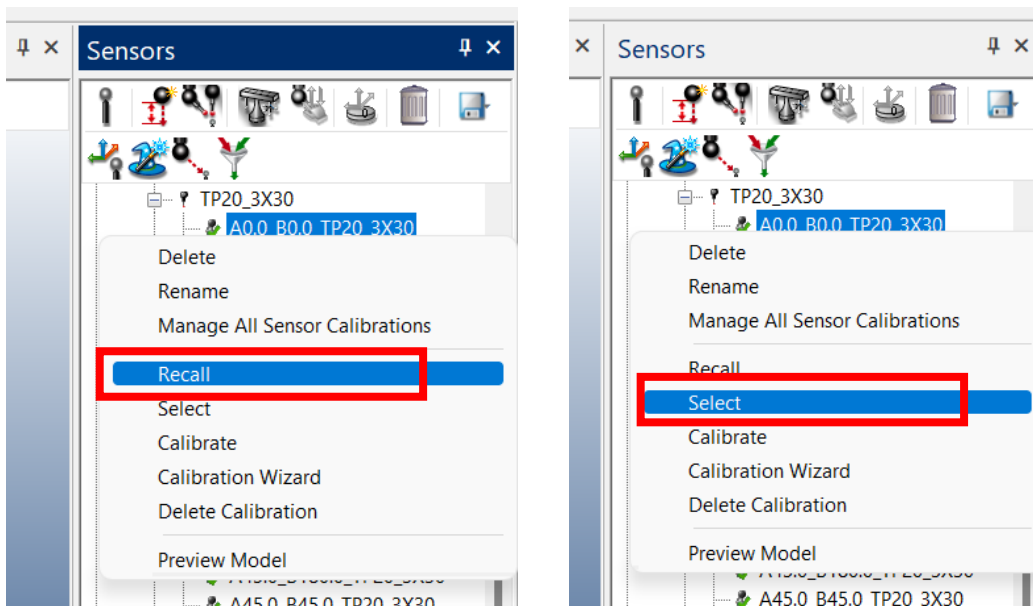


Figura de anexo 5. Cargar el palpador adecuado

A.1.6. Definición de origen de la pieza (“cero pieza”). Método *Plane-Line-Point Alignment*

Paso 1. Construcción de un plano

Clicar **Tactile** → **Point** (ver Figura de anexo 6)

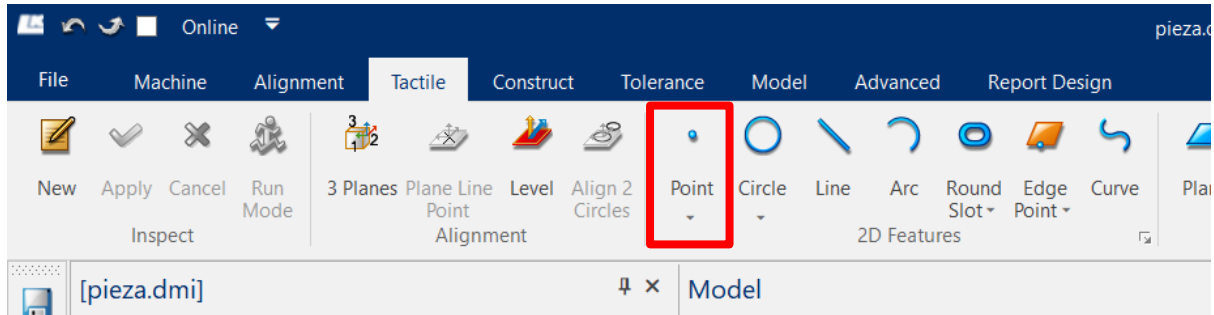


Figura de anexo 6. Tactile → Point

Marcar 3 puntos sobre una cara (ver Figura de anexo 7)

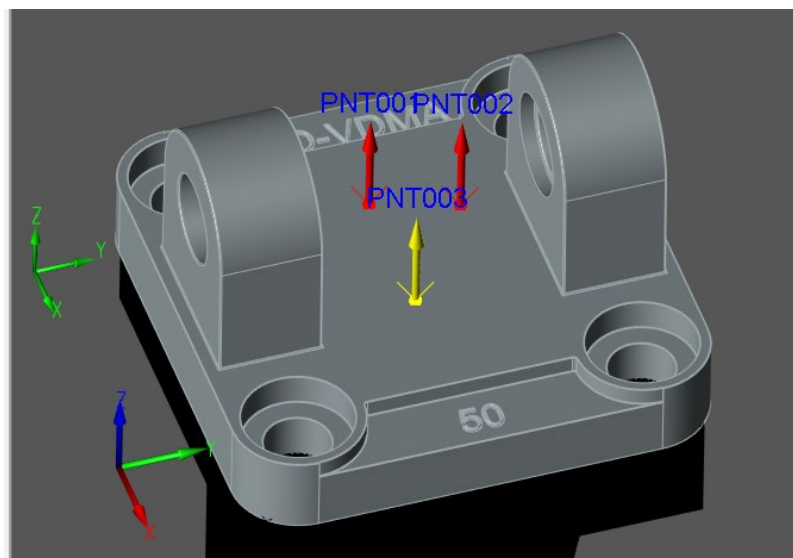


Figura de anexo 7. Selección de 3 puntos sobre una cara

Clicar *Apply* (ver Figura de anexo 8)

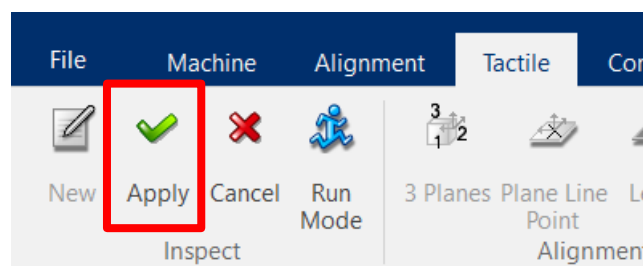


Figura de anexo 8. Opción de *apply* para confirmar

Construir un plano con los tres puntos **Construct** → **Plane** (ver Figura de anexo 9)

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

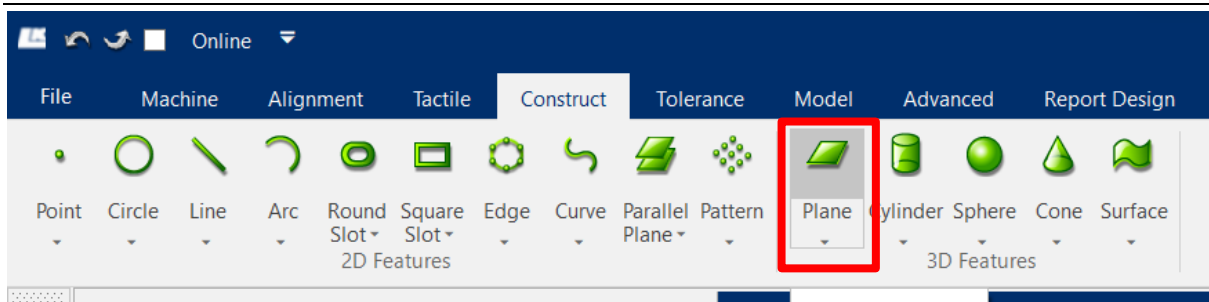


Figura de anexo 9. Construct →Plane

Seleccionar los 3 puntos y aplicar (ver Figura de anexo 10)

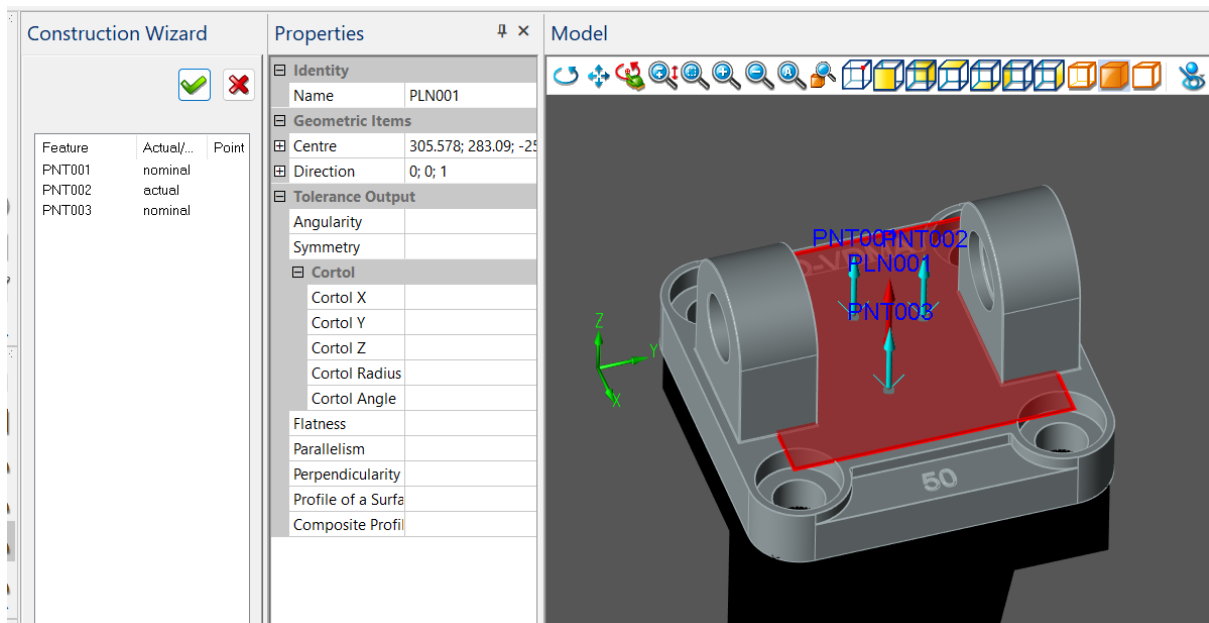


Figura de anexo 10. Crear un plano con 3 puntos

Paso 2. Construcción de una línea

Clicar **Tactile** → **Point** (ver Figura de anexo 11)

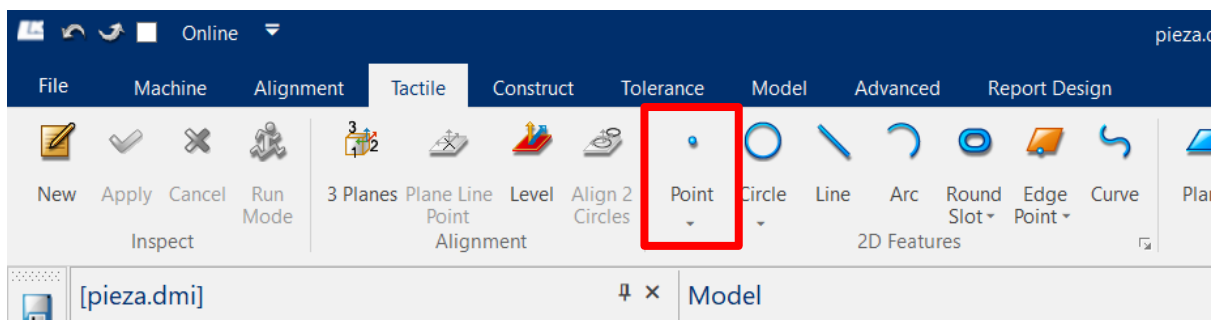


Figura de anexo 11. Tactile → Point

Crear 2 puntos sobre otra cara y aplicar (ver Figura de anexo 12)

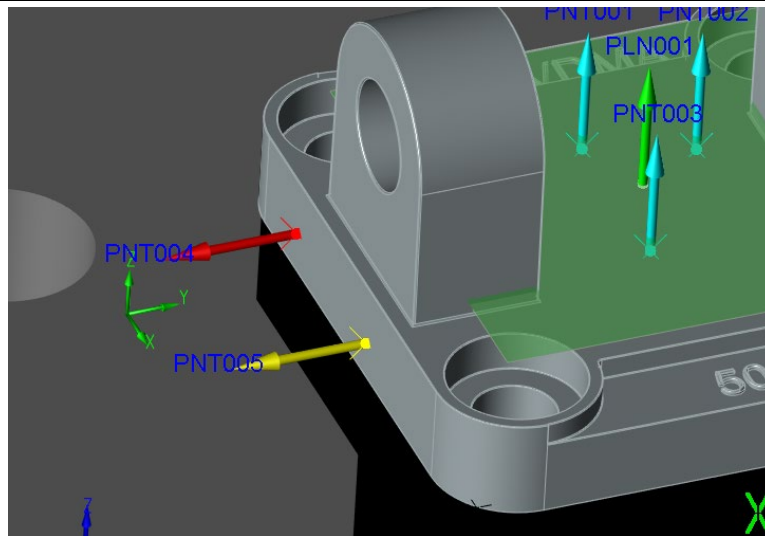


Figura de anexo 12. Selección de 2 puntos sobre una cara

Construir una línea con los dos puntos Construct →Line (ver Figura de anexo 13)

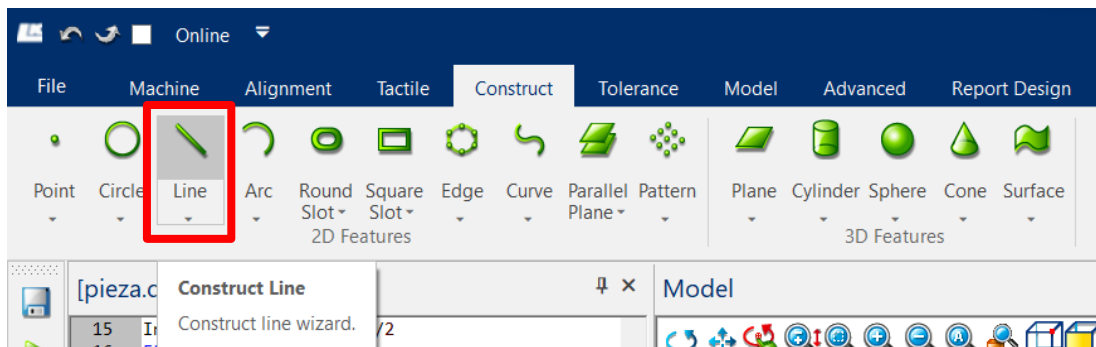


Figura de anexo 13. Construct →Line

Seleccionar los 2 puntos y aplicar (ver Figura de anexo 14)

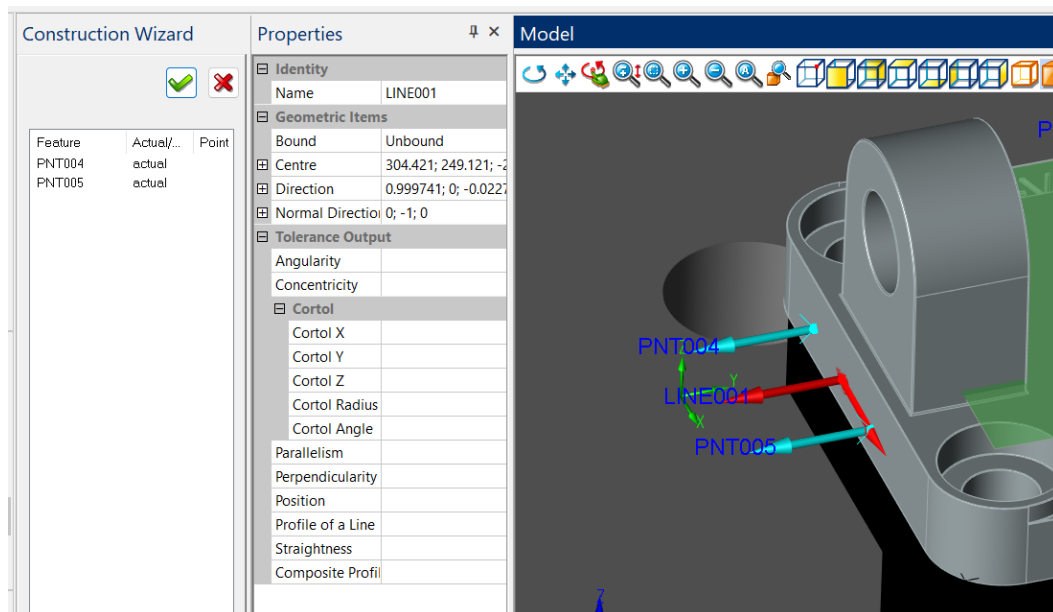


Figura de anexo 14. Creación de una línea a partir de 2 puntos

Paso 3. Punto

Selección de un punto en otra cara **Tactile** → **point** (ver Figura de anexo 15)



Figura de anexo 15. Tactile → point

Se selecciona el punto (PNT006) (ver Figura de anexo 16)

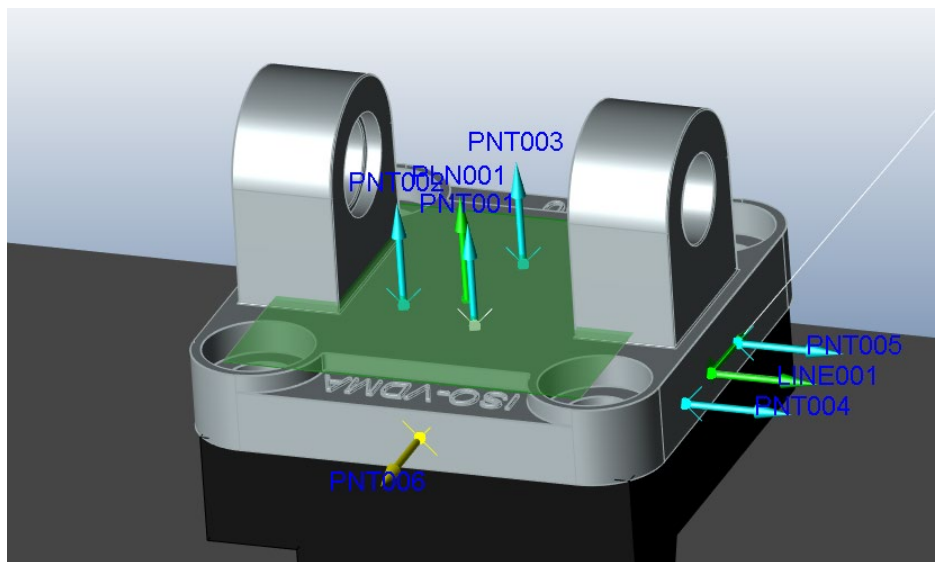


Figura de anexo 16. Selección del punto para el método *PLP Alignment*

Paso 4. Plane Line Point Alignment (PLP- Alignment)

Se clic **Alignment** → **3-2-1 Alignment** (ver Figura de anexo 17)

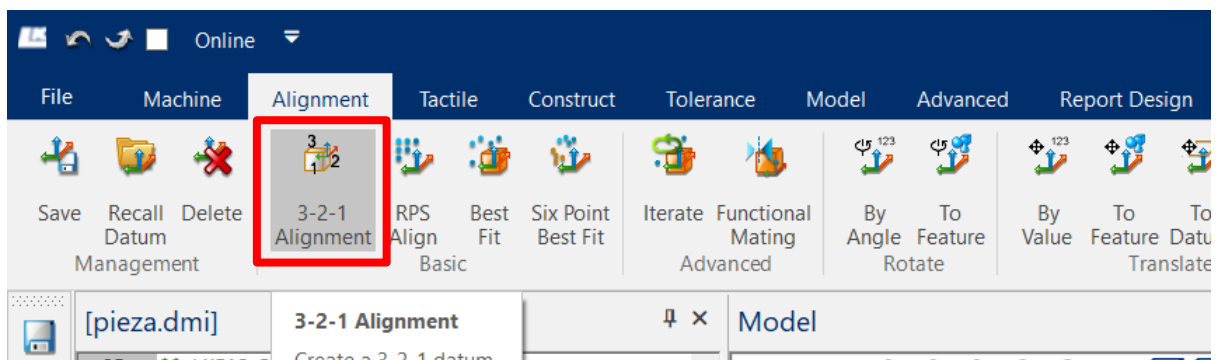


Figura de anexo 17. Alignment → 3-2-1 Alignment

Se seleccionan los 3 *datums* (plano, línea, punto) creados y se configuran (ver Figura de anexo 18)

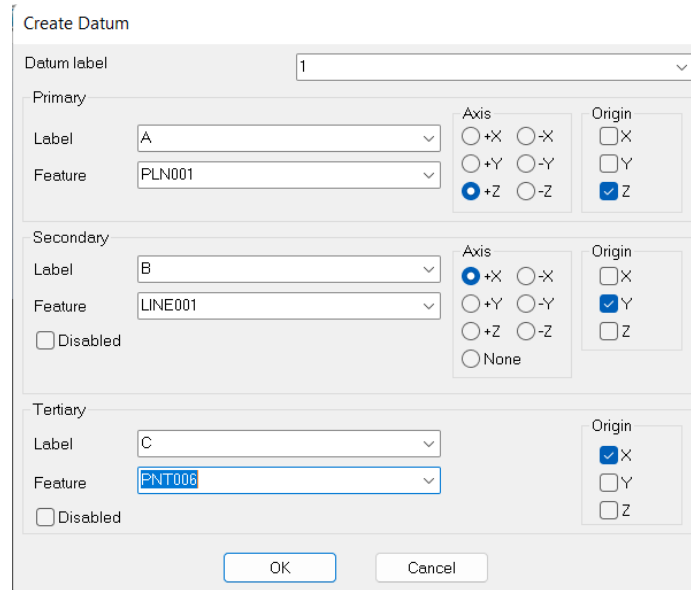


Figura de anexo 18. Configuración de los 3 datums (plano, línea, punto) creados

- El **elemento de referencia A** se utilizará como el elemento de referencia primario. Este elemento de referencia puede ser establecido mediante la medición de un plano. Este plano luego puede ser utilizado para controlar la rotación en los ejes X e Y y el origen en el eje Z.
- El **elemento de referencia B** se utilizará como el elemento de referencia secundario. Este elemento de referencia se establecerá mediante la medición de una línea. Esta línea luego puede ser utilizada para controlar la rotación en el eje X y el origen en el eje Y.
- El **elemento de referencia C** se utilizará como el elemento de referencia terciario. Esto se establecerá mediante la medición de un punto. Este elemento luego puede ser utilizado para establecer el origen en el eje X.

Finalmente, el sistema de coordenadas “cero pieza” es creado (ver Figura de anexo 19)

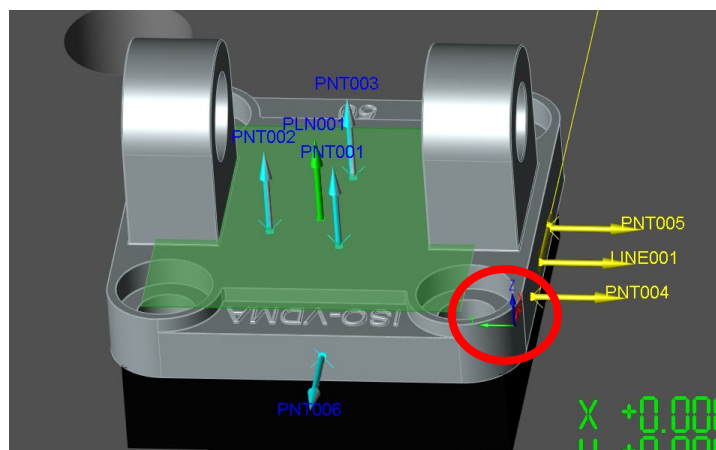


Figura de anexo 19. Sistema de coordenadas creado “Cero pieza”

Otros métodos alternativos que existen para crear sistemas de coordenadas son:

- *Plane & Two Circles Alignment*
- *Cylinder Plane Circle Alignment*
- *Six Point Alignment*

A.2. Medición de geometría mediante “Canned Cycles”

A.2.1. Medición de un círculo (modo automático)

Clicar **Tactile** → **Modal** → **Mode** (ver Figura de anexo 20)

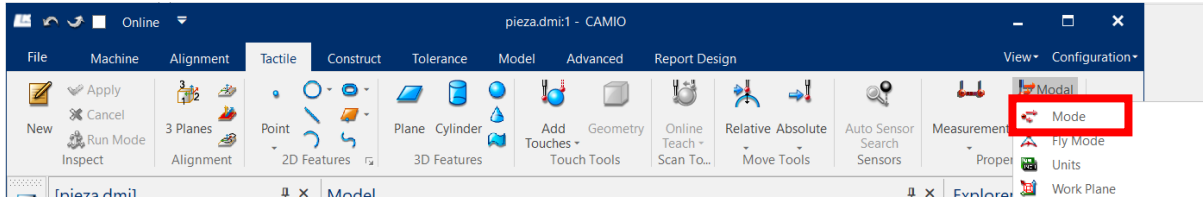


Figura de anexo 20. Tactile → Modal → Mode

Cambiar a Modo automático (ver Figura de anexo 21)

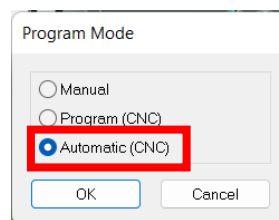


Figura de anexo 21. Cambio a modo automático

Clicar **Tactile** → **Circle** para seleccionar un círculo (ver Figura de anexo 22)



Figura de anexo 22. Tactile → Circle

Seleccionar el círculo y aplicar (ver Figura de anexo 23)

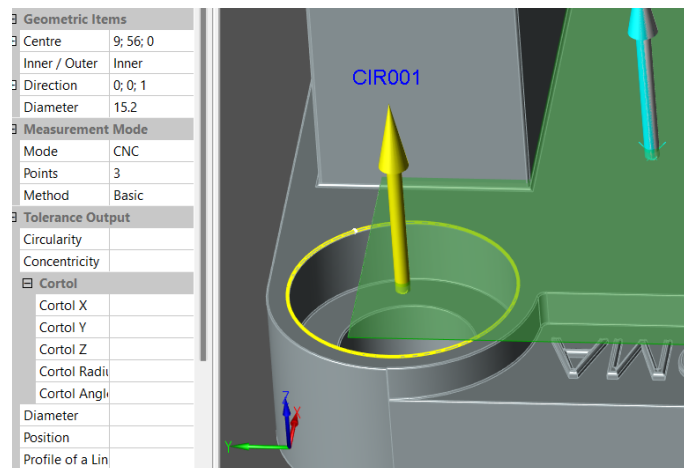


Figura de anexo 23. Selección de círculo en el CAD

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

La máquina realiza el palpado (ver Figura de anexo 24) y tras esto es necesario retirar la sonda a una posición segura.

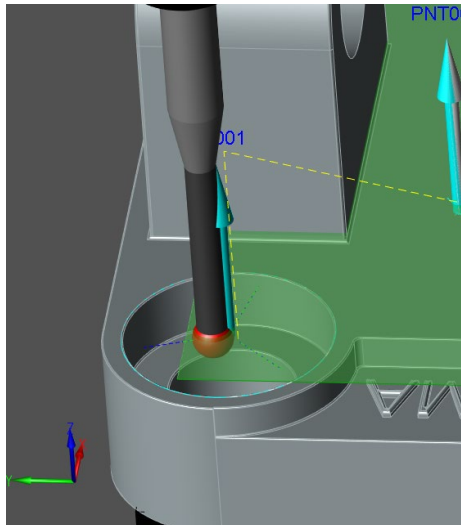


Figura de anexo 24. Palpado del círculo

Clickar **Tactile** → **Relative** → **Axis Offset** para mover la sonda (ver Figura de anexo 25)

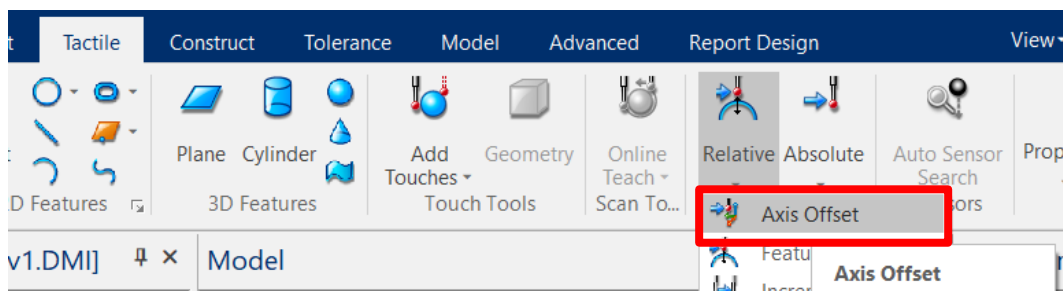



Figura de anexo 25. Tactile → Relative → Axis Offset

Marcar el desplazamiento para desplazar la sonda de palpado a una posición segura y aplicar  (ver Figura de anexo 26)

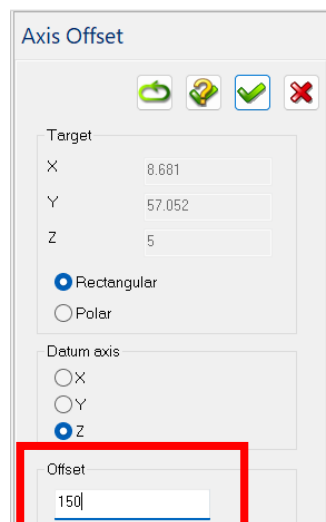


Figura de anexo 26. Selección del *offset* para mover la sonda

A.3. Verificación de tolerancias

A.3.1. Verificación de tolerancia de paralelismo

Paralelismo entre dos planos definidos por 6 puntos cada uno

Plano 1

Seleccionar 6 puntos de un plano mediante **Tactile** → **Point** (ver Figura de anexo 27)

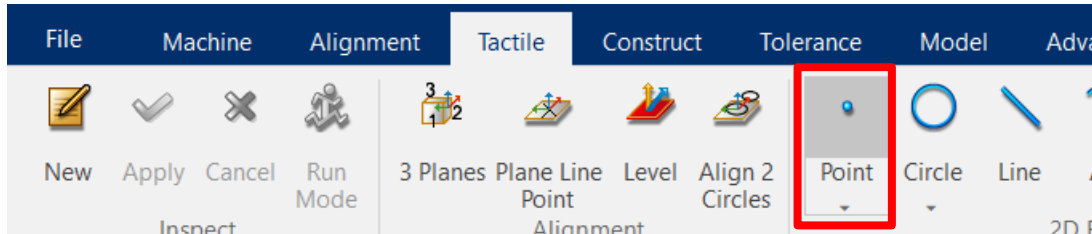


Figura de anexo 27. Tactile → Point

Seleccionar los puntos y clicar *apply* para que la sonda mida (ver Figura de anexo 28)

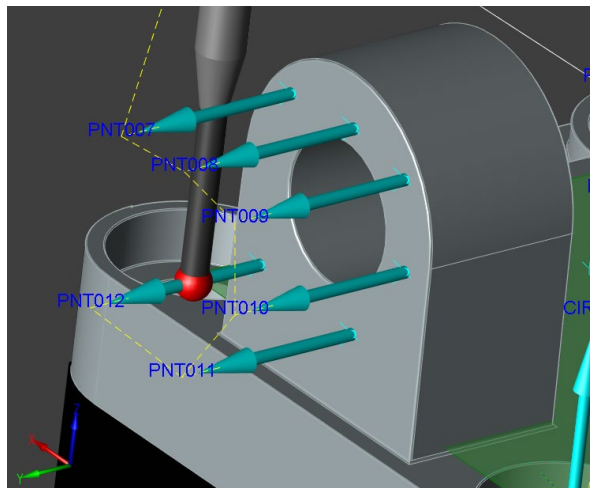


Figura de anexo 28. Selección de puntos sobre una cara

Construir un plano mediante **Construct** → **Plane** (ver Figura de anexo 29) y seleccionar los 6 puntos (ver Figura de anexo 30)

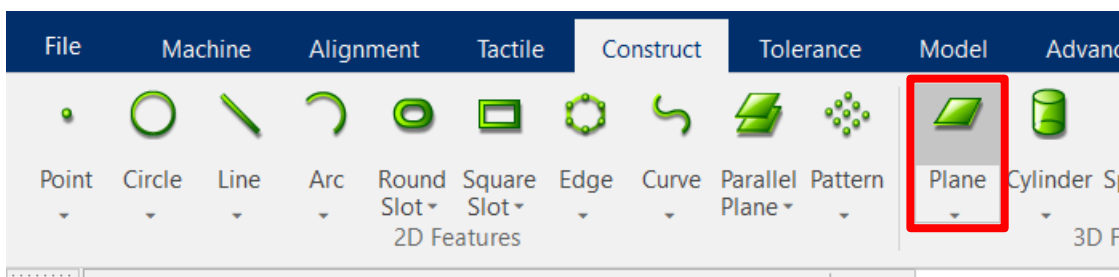


Figura de anexo 29. Construct → Plane

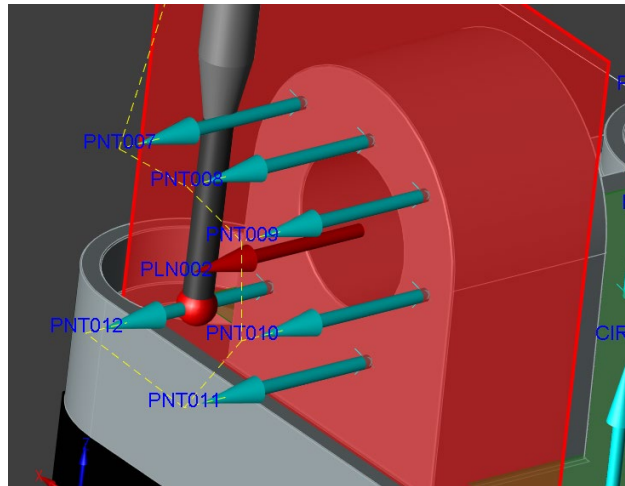


Figura de anexo 30. Construcción de un plano con 6 puntos palpados

Tras esto se desplaza la sonda de palpado a una posición segura Tactile → Relative → Axis Offset (ver Figura de anexo 31)

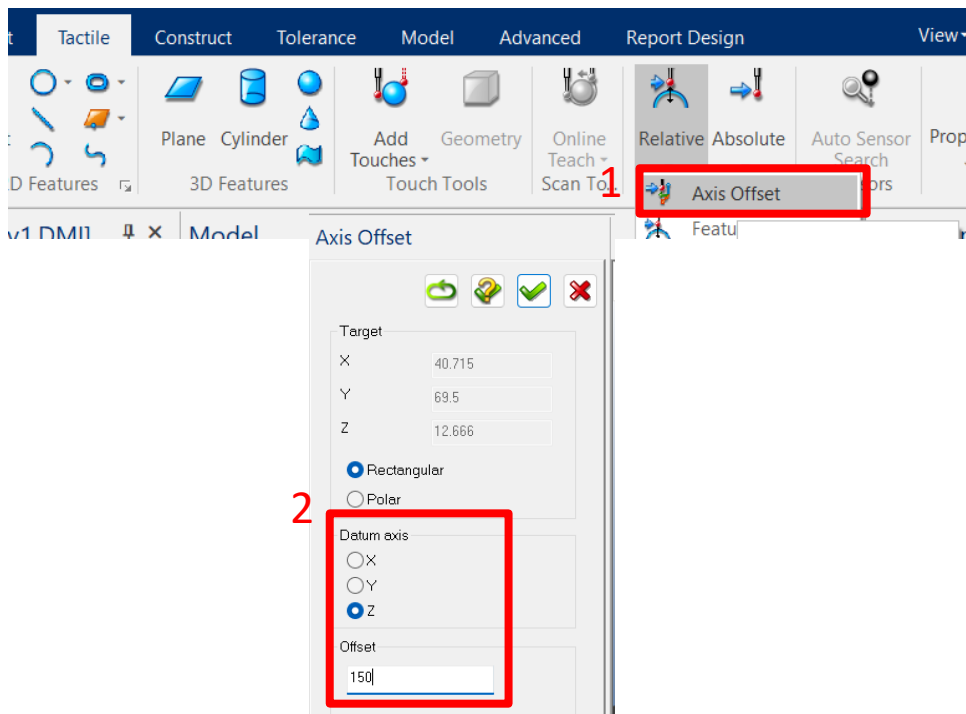


Figura de anexo 31. Llevar la sonda a una posición segura con Tactile → Relative → Axis Offset

Plano 2

Se hace lo mismo para el plano 2

Tolerancia de paralelismo entre PLN002 Y PLN003

Clicar **Alignment** → **Datum Definition** (ver Figura de anexo 32)

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

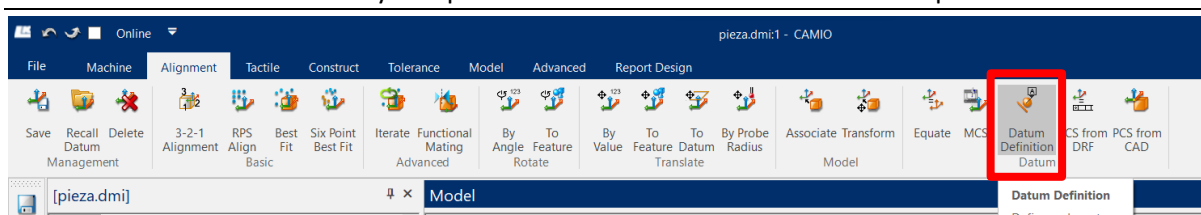


Figura de anexo 32. Alignment → Datum Definition

Asignar la etiqueta “A” a uno de los planos, en este caso PLN002, y clicar OK (ver Figura de anexo 33).
Nota: si ya se ha asignado anteriormente una etiqueta “A” a otra geometría, habrá que llamarlo con otra letra distinta.

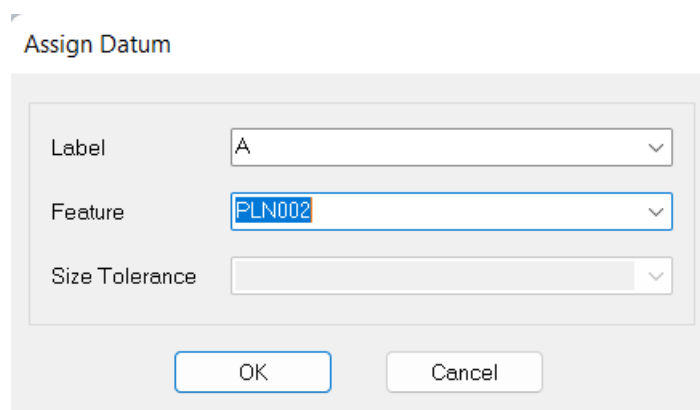


Figura de anexo 33. Asignación de la etiqueta “A” a uno de los planos

En *explorer* se hace click derecho en el otro plano con el que se va a verificar la tolerancia, en este caso PLN003, y se selecciona *Output*. (ver Figura de anexo 34)

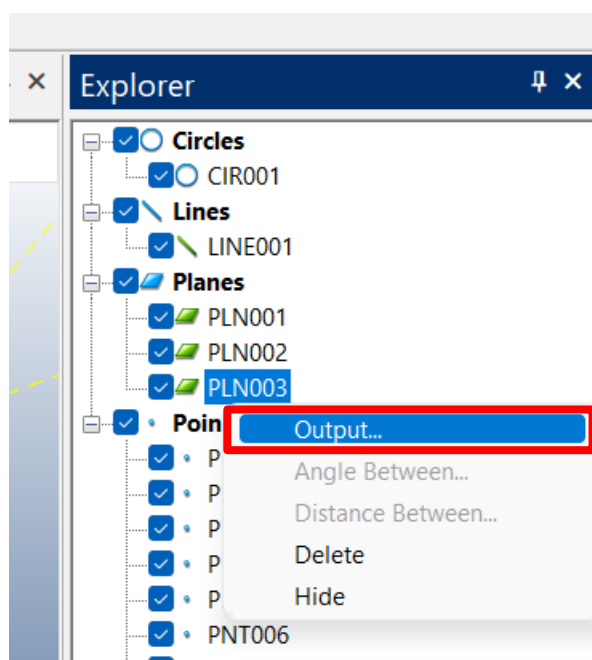


Figura de anexo 34. Selección de *output* en *explorer*

En el apartado de tolerancias se clicla “new” (ver Figura de anexo 35)

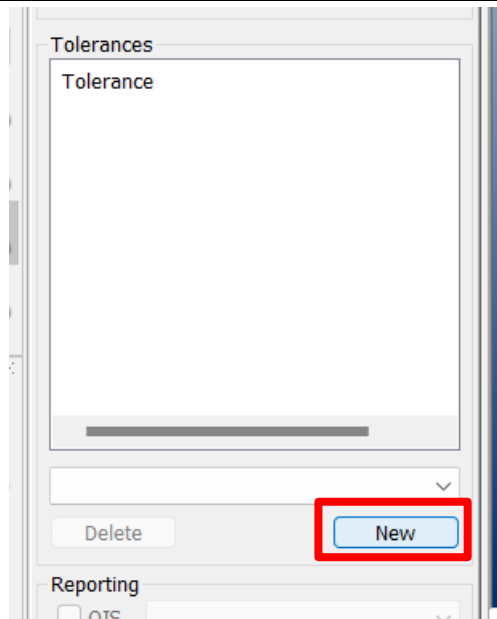


Figura de anexo 35. Selección de “new” en el apartado de tolerancias

Se selecciona la tolerancia de paralelismo (ver Figura de anexo 36)

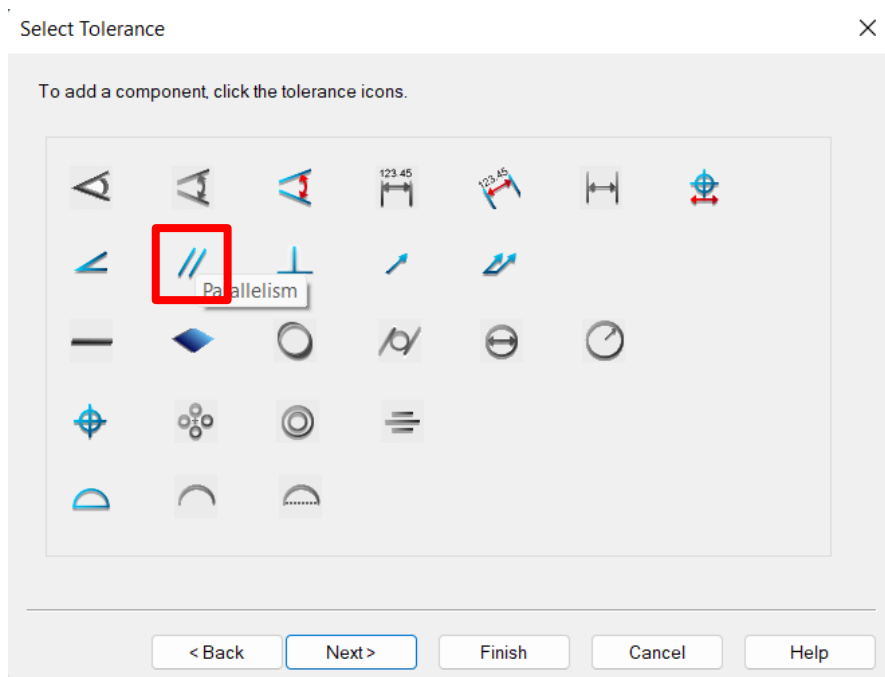


Figura de anexo 36. Selección de la tolerancia de paralelismo

Se rellena con los valores adecuados y se pulsa ok (ver Figura de anexo 37)

Nota:

MMC: Maximum Material Condition

LMC: Least Material Condition

RFS: Regardless of Feature Size

Parallelism Tolerance

Label: Paralelismo

Tolerance: 0.25

Feature material condition:
 MMC LMC RFS

Primary datum:
 Feature nominal
 Feature actual
 Datum label

Datum material condition:
 MMC LMC RFS

Secondary datum:
 None
 Feature nominal
 Feature actual
 Datum label

Datum material condition:
 MMC LMC RFS

OK Cancel

Figura de anexo 37. Introducción de valores para definir la tolerancia de paralelismo

Se clic en “next” en la ventana de selección de tolerancias.

Se deja la opción de “Insert tolerance definitions into current DMIS program” y se clic “next” (ver Figura de anexo 38)

Select Program Mode


Produce a new template program for your measurement

Insert tolerance definitions into current DMIS program.

< Back Next > Finish Cancel Help

Figura de anexo 38. Selección de “Insert tolerance definitions into current DMIS program”

Y se clic en “finish”

Finalmente pinchar en  para insertar el código en el programa (ver Figura de anexo 39)

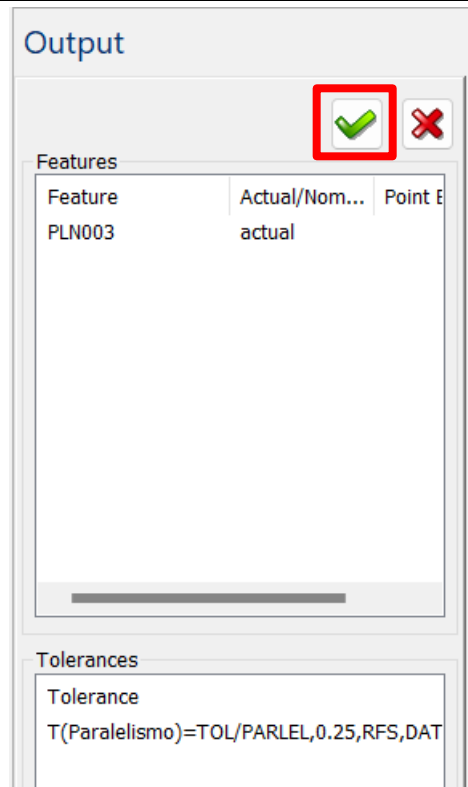


Figura de anexo 39. Inserción de la tolerancia de paralelismo en el programa

A.3.2. Tolerancia de distancia entre 2 caras

En la Figura de anexo 40 se puede consultar una las tolerancias generales para distancia entre 2 caras.

GENERAL TOLERANCES FOR LINEAR AND ANGULAR DIMENSIONS (DIN ISO 2768 T1)

LINEAR DIMENSIONS:

Permissible deviations in mm for ranges in nominal lengths	f (fine)	Tolerance class designation (description)		v (very coarse)
		m (medium)	c (coarse)	
0.5 up to 3	±0.05	±0.1	±0.2	-
over 3 up to 6	±0.05	±0.1	±0.3	±0.5
over 6 up to 30	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0
over 30 up to 120	±0.15	±0.3	±0.8	±1.5
over 120 up to 400	±0.2	±0.5	±1.2	±2.5
over 400 up to 1000	±0.3	±0.8	±2.0	±4.0
over 1000 up to 2000	±0.5	±1.2	±3.0	±6.0
over 2000 up to 4000	-	±2.0	±4.0	±8.0

Figura de anexo 40. Tabla de tolerancias generales para distancia entre 2 caras

Definición de 2 planos con 5 puntos cada uno

<p>Plano 1</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tactile → Point 2. Construct → Plane 3. Tactile → Relative → Axis Offset 	<p>Plano 2</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tactile → Point 2. Construct → Plane 3. Tactile → Relative → Axis Offset
--	--

Cálculo de la distancia entre planos (PLN004 y PLN005)

Clicar **Tolerance** → **Distance between** → **Evaluate Distance between** (ver Figura de anexo 41)

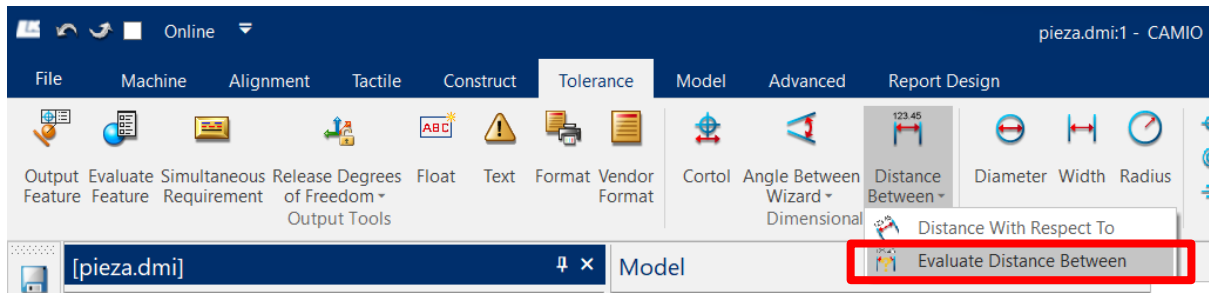


Figura de anexo 41. Tolerance → Distance between → Evaluate Distance between

Seleccionar los planos correspondientes y pulsar *Teach* (ver Figura de anexo 42)

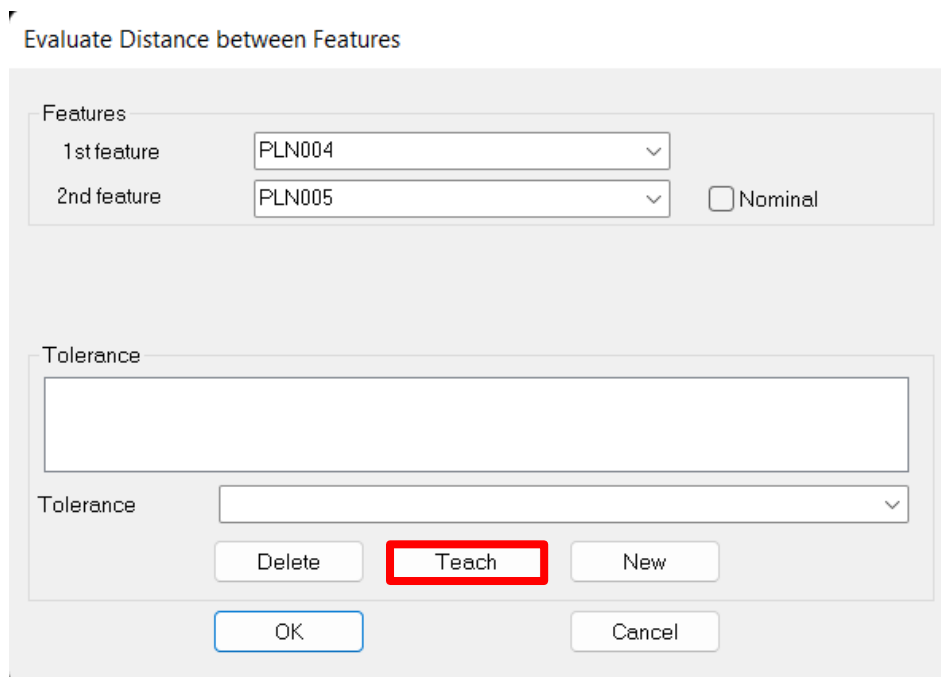


Figura de anexo 42. Evaluar distancia entre caras

Seleccionar el eje en el que se mide la distancia y pulsar ok (ver Figura de anexo 43)

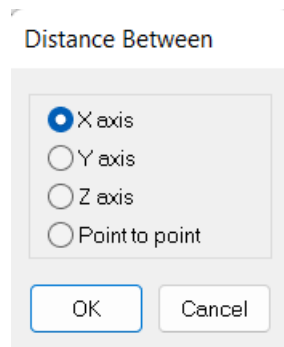


Figura de anexo 43. Selección del eje en el que se mide la distancia entre caras

Cambiar el nombre, escribir la tolerancia y pulsar ok (ver Figura de anexo 44)

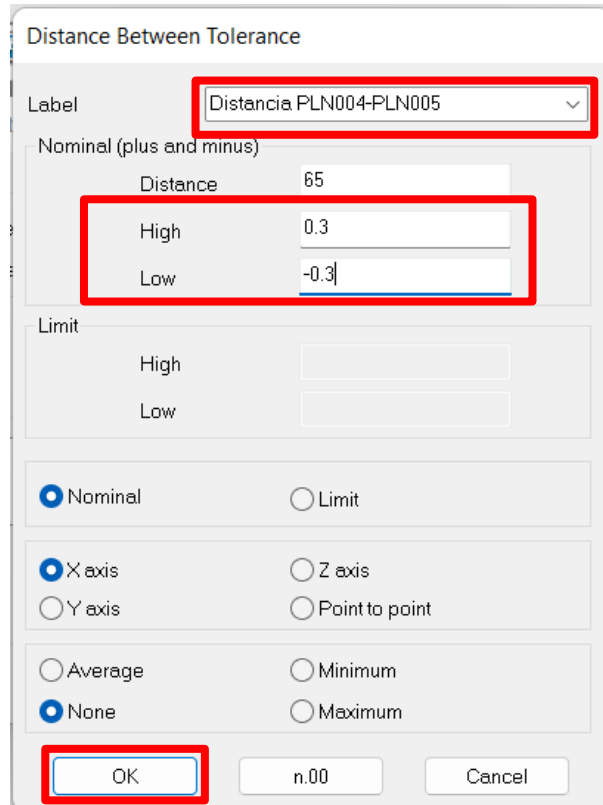


Figura de anexo 44. Definición de parámetros para la tolerancia de distancia entre caras

A.3.3. Tolerancia de concentricidad (coaxialidad) entre 2 cilindros

Cambio de la orientación del palpador al estar los cilindros en horizontal. Clicar *recall* y *select* en el palpador adecuado (ver Figura de anexo 45)

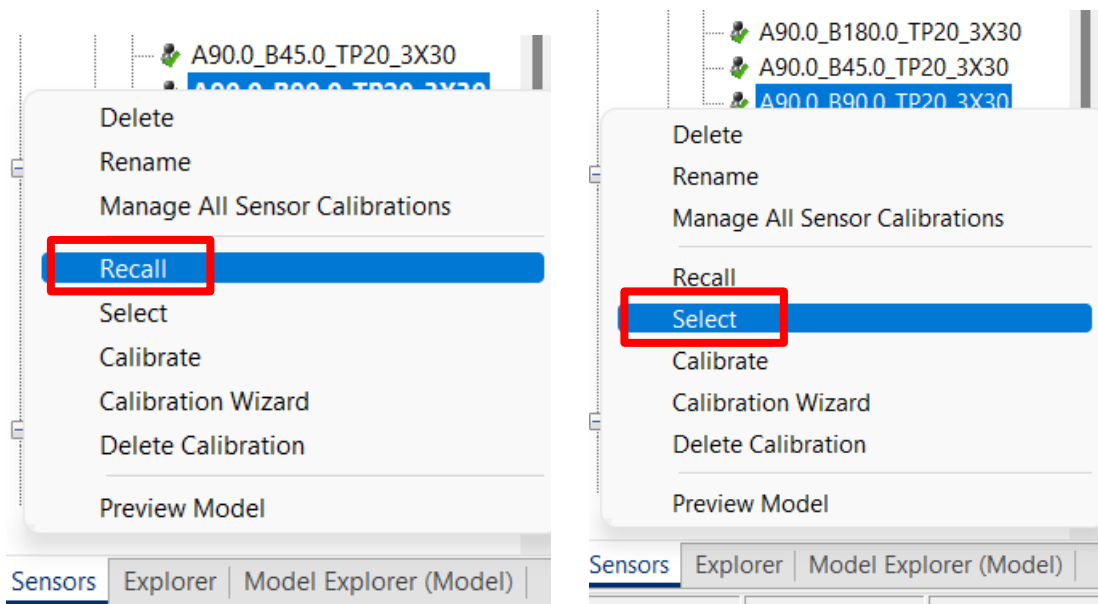


Figura de anexo 45. Cambio de la orientación del palpador

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Para cambiar el valor de la profundidad para la toma de datos:

Se clic en "settings" en la parte de debajo de la ventana (ver Figura de anexo 46)

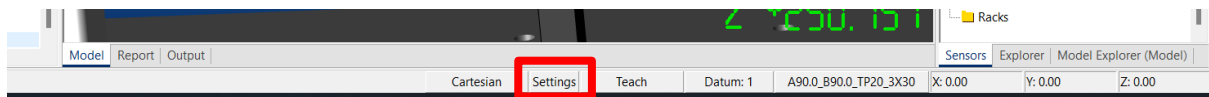


Figura de anexo 46. Settings

Y se cambia el valor de Depth a 2 (ver Figura de anexo 47)

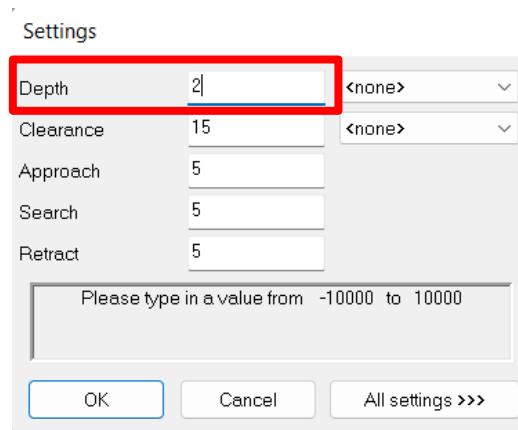


Figura de anexo 47. Cambio del valor de Depth

Se mide el primer cilindro mediante Tactile → Cylinder (ver Figura de anexo 48)

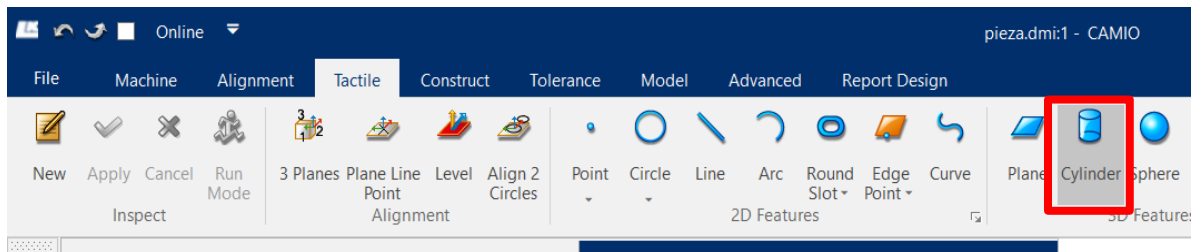


Figura de anexo 48. Tactile → Cylinder

Se selecciona el cilindro y se pulsa Apply. El cilindro es medido automáticamente (ver Figura de anexo 49)

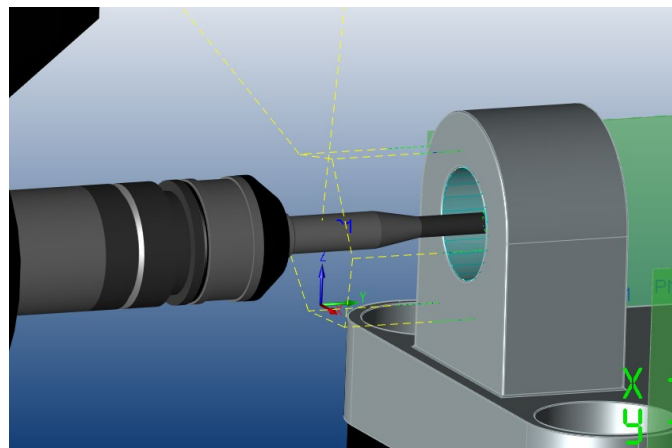


Figura de anexo 49. Medición automática de un cilindro

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Ahora es necesario sacar el palpador del interior del agujero mediante **Tactile** → **Relative** → **Axis offset**. Se lleva a una posición segura (ver Figura de anexo 50) y se cambia el palpador para medir el agujero opuesto

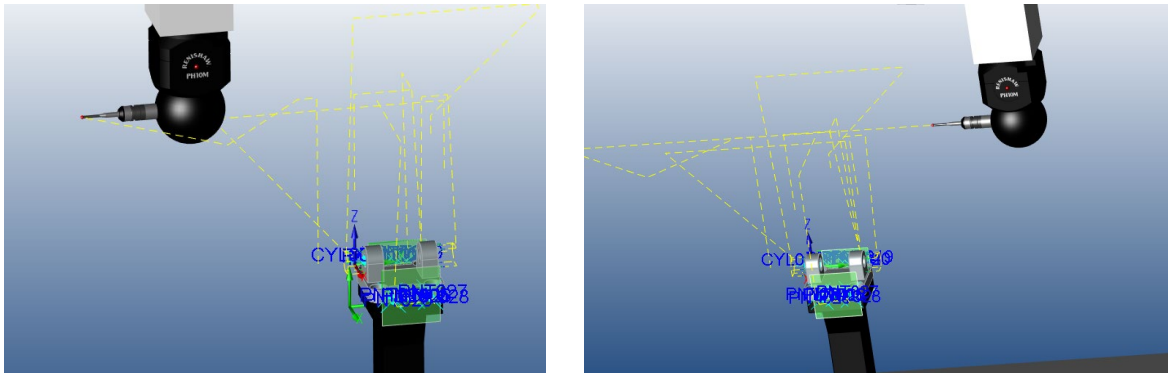


Figura de anexo 50. Movimiento del palpador a una posición segura

Se mide el segundo cilindro mediante **Tactile** → **Cylinder** y se saca el palpador

Cálculo de la coaxialidad del entre cilindros (CYL001 y CYL002)

Se clic **Alignment** → **Datum Definition** (ver Figura de anexo 51)

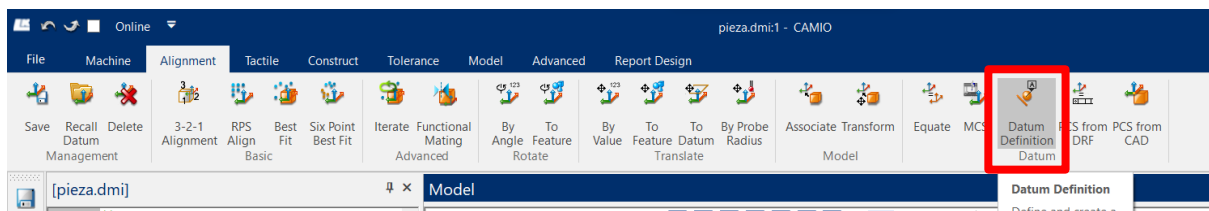


Figura de anexo 51. Alignment → Datum Definition

Asignar la etiqueta B a uno de los cilindros (ver Figura de anexo 52)

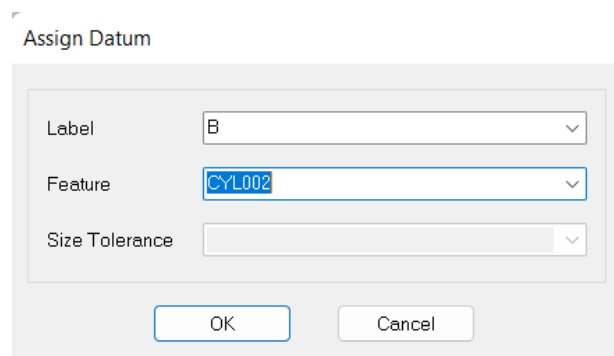


Figura de anexo 52. Asignación de la etiqueta B a uno de los cilindros

Seleccionar en el *explorer* el otro cilindro y clicar en "output" (ver Figura de anexo 53)

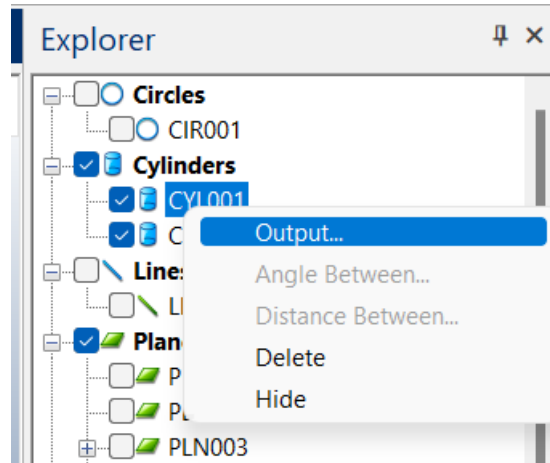


Figura de anexo 53. Selección de *output* en *explorer*

En el apartado de tolerancias clicar “new” y se selecciona la tolerancia de coaxialidad/concentricidad (ver Figura de anexo 54)

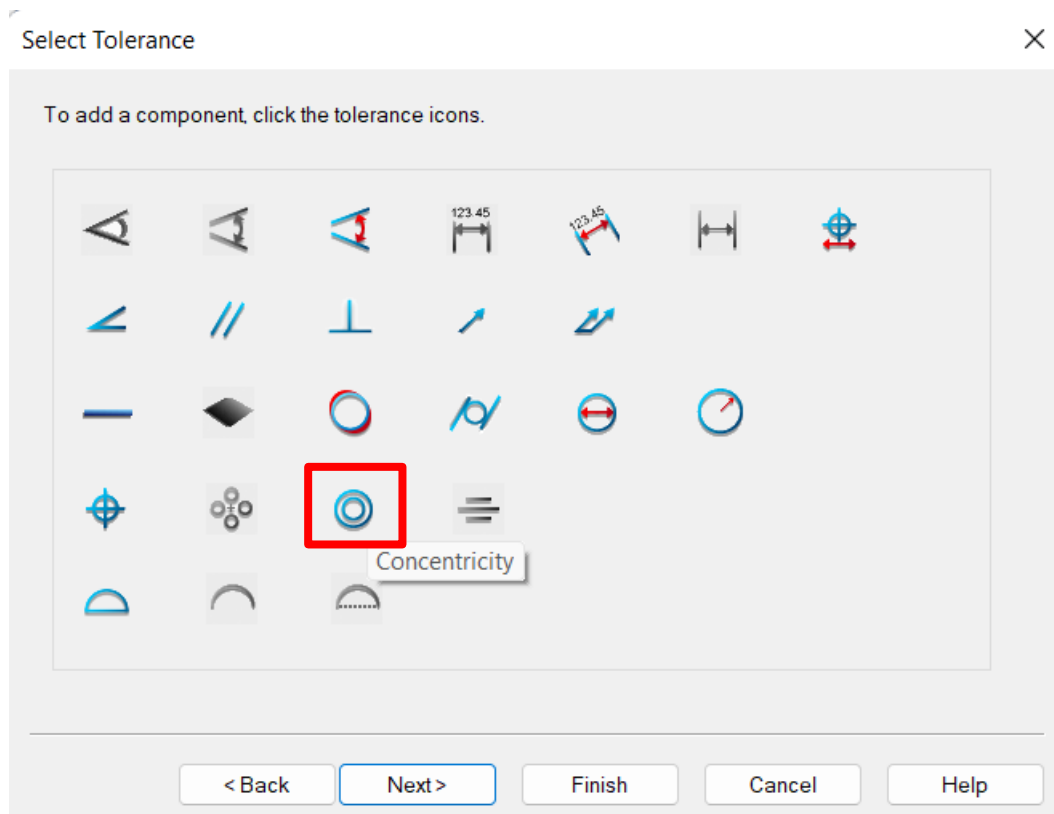


Figura de anexo 54. Selección de la tolerancia de coaxialidad/concentricidad

Cambiar el nombre de la etiqueta, establecer la tolerancia, seleccionar el *Datum feature B* que corresponde al otro cilindro y clicar *ok* (ver Figura de anexo 55)

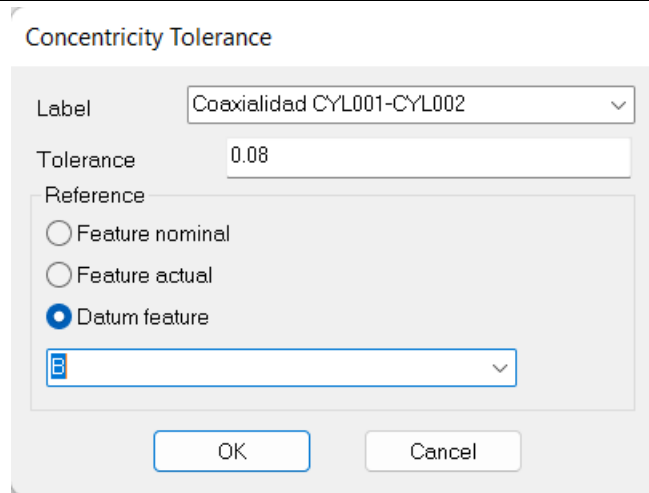



Figura de anexo 55. Parámetros de la tolerancia de concentricidad

Clicar *next* 2 veces, luego *finish* y después a  para insertar en el código en el programa (ver Figura de anexo 56)

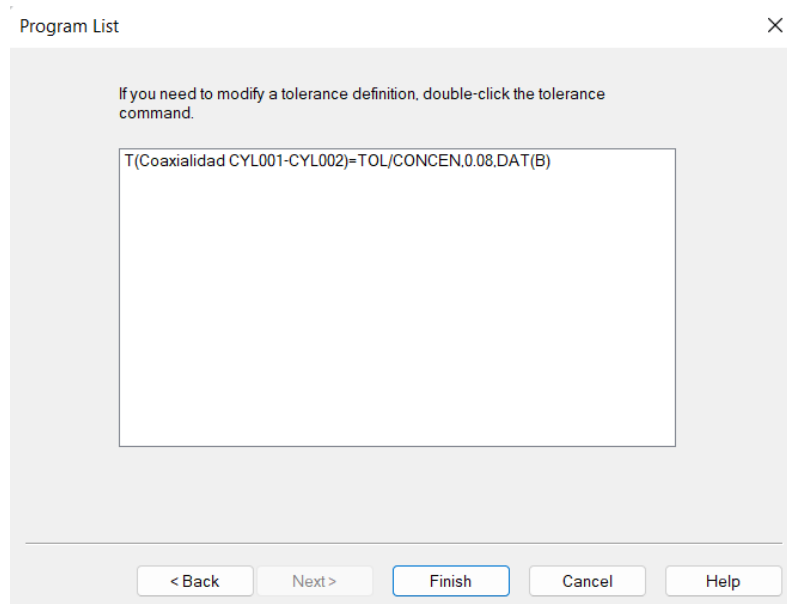


Figura de anexo 56. Inserción de la tolerancia en el programa

A.3.4. Tolerancia de forma de superficie

Añadir 15 puntos sobre una superficie (ver Figura de anexo 57) mediante **Tactile → Point**

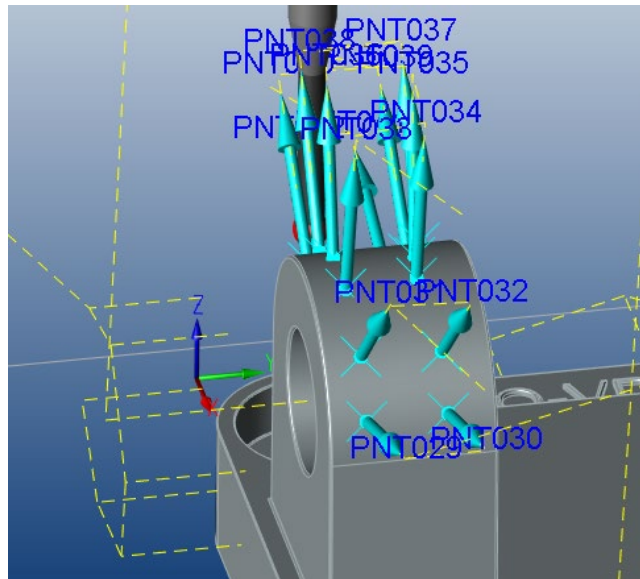


Figura de anexo 57. Adición de 15 puntos sobre una superficie mediante Tactile → Point

Desplazar la sonda de palpado a una posición segura y construir la superficie seleccionando los puntos mediante **Construct → Surface → Best fit** (ver Figura de anexo 58)

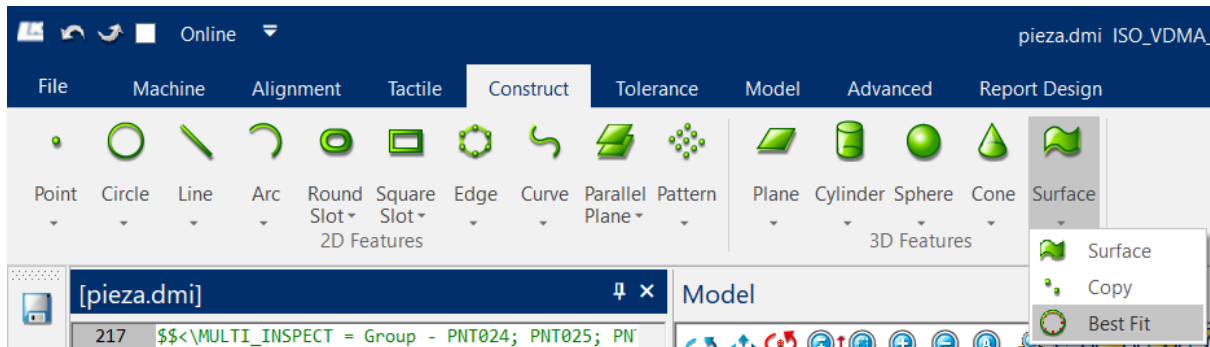


Figura de anexo 58. Construct → Surface → Best fit

Se seleccionan los puntos y se crea la superficie.

En *explorer* se hace *click* derecho en la superficie y se pulsa en “Output” (ver Figura de anexo 59)

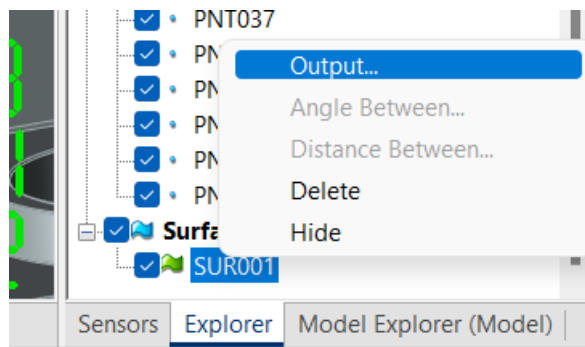


Figura de anexo 59. Selección de *output* en *explorer*

En la ventana de tolerancias se clic en "new" (ver Figura de anexo 60)

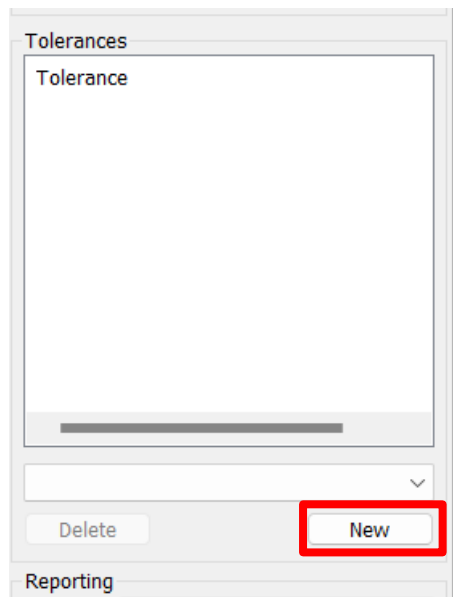


Figura de anexo 60. Creación de una nueva tolerancia

Se clic en *profile Surface* (ver Figura de anexo 61)

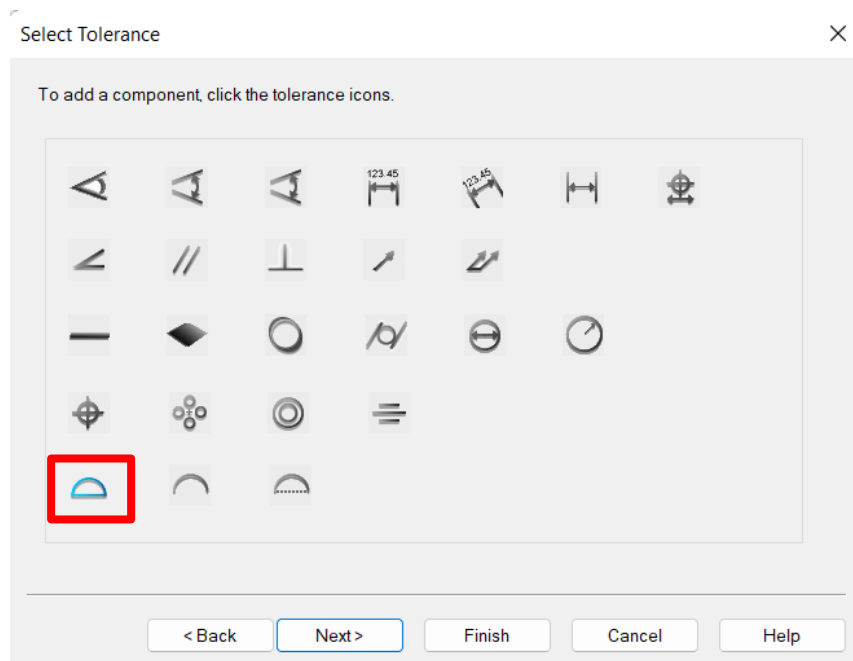


Figura de anexo 61. Tolerancia de *profile surface*

Se cambia el nombre del *label*, el valor de la tolerancia y se clic en ok (ver Figura de anexo 62) y después en *next* 2 veces, y se clic en *finish*

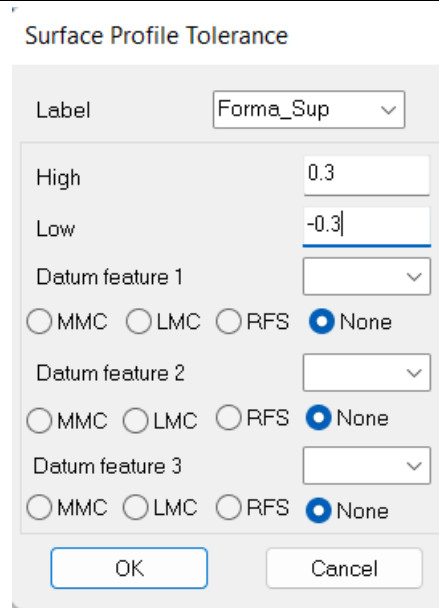


Figura de anexo 62. Parámetros de la tolerancia de perfil de superficie

A.3.5. Medición de una superficie mediante generación de puntos por rejilla

Se clicla **Tactile** → **New** (ver Figura de anexo 63)

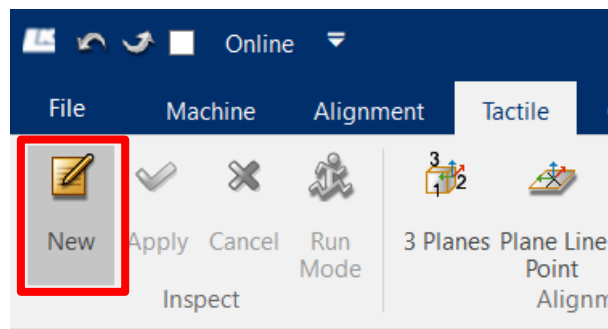


Figura de anexo 63. Tactile → New

Se selecciona la opción de geometría (ver Figura de anexo 64)

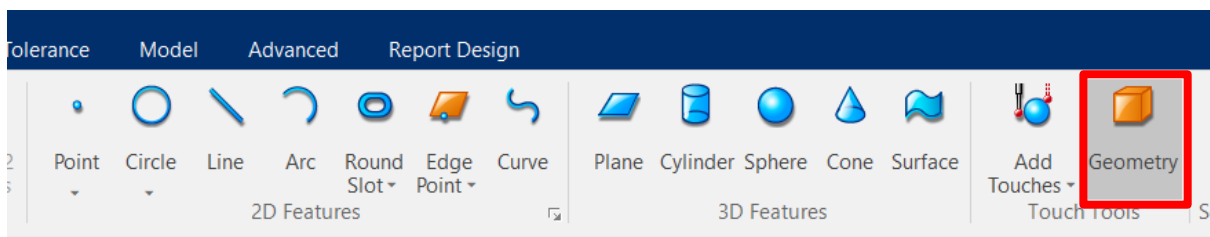


Figura de anexo 64. Selección de geometría

Se selecciona la superficie a medir (ver Figura de anexo 65)

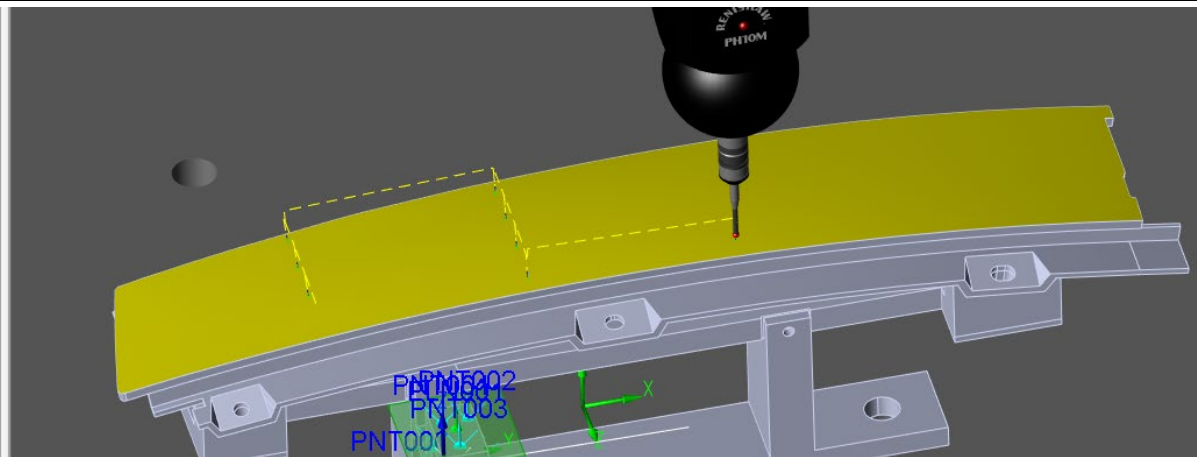


Figura de anexo 65. Selección de la superficie a medir

Se clica en el icono de ok (ver Figura de anexo 66)

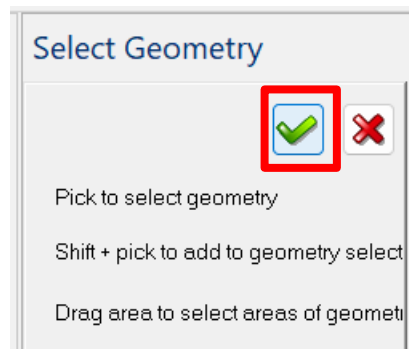


Figura de anexo 66. Icono de ok

Se va a **Tactile** → **Point** → **Points on a Grid** (ver Figura de anexo 67)

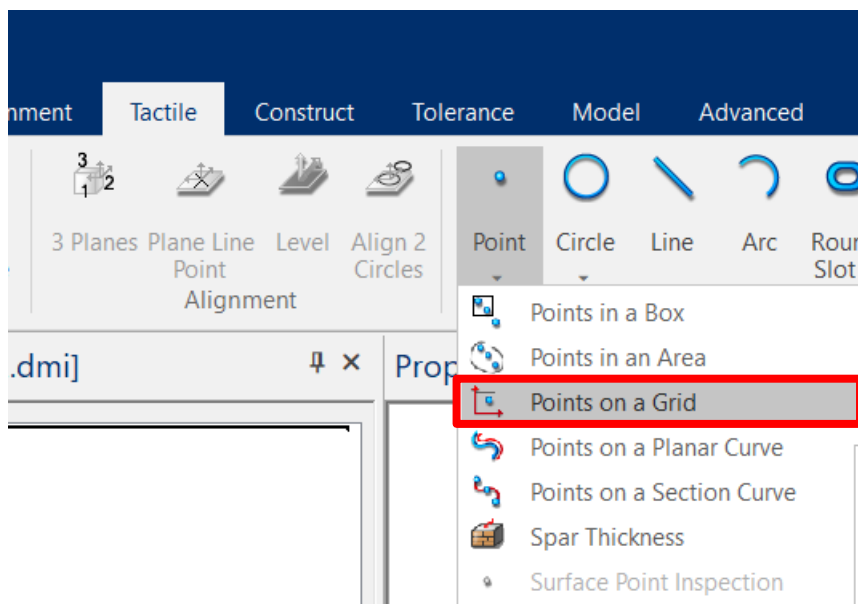


Figura de anexo 67. Tactile → Point → Points on a Grid

Se selecciona el número de incrementos que define la rejilla de puntos y se clica en el icono de *Build* (ver Figura de anexo 68)

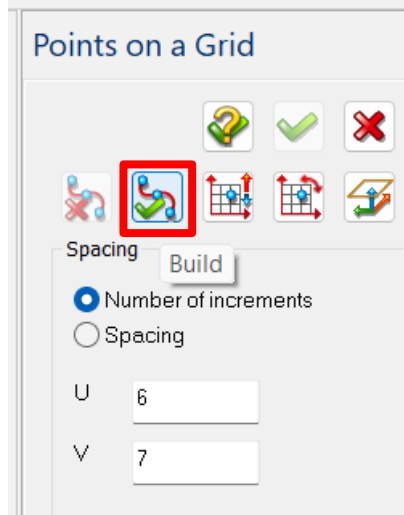


Figura de anexo 68. Creación de rejilla de puntos

Una vez este la rejilla generada, se puede visualizar (ver Figura de anexo 69)

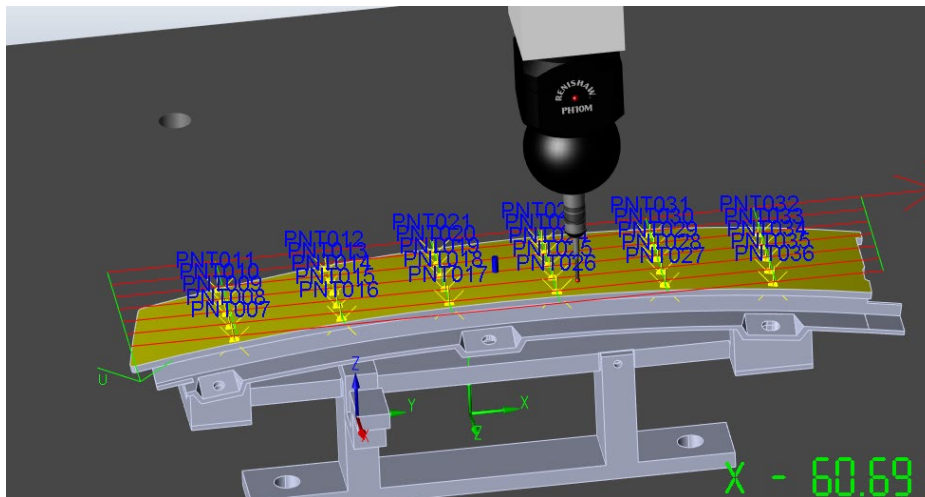


Figura de anexo 69. Visualización de los puntos en rejilla

Una vez se está conforme con la rejilla generada, se clic el icono de ok y se añade el código para el palpado de los puntos (ver Figura de anexo 70)

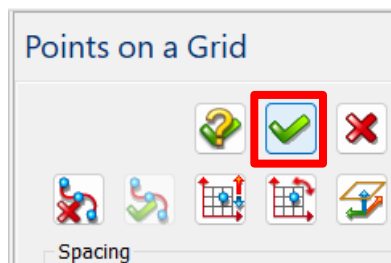


Figura de anexo 70. Creación definitiva de los puntos por rejilla

A.4. Escaneo por barrido

A.4.1. Escaneo por el método "Online Teach"

Este escaneo consiste en una curva de una superficie, indicando de forma manual 3 puntos del recorrido de la curva que se desea medir.

Primero se activa el modo SCAN, para ello, ir a **Tactile** → **Scan On/Off**, y poner a **On**. (ver Figura de anexo 71)

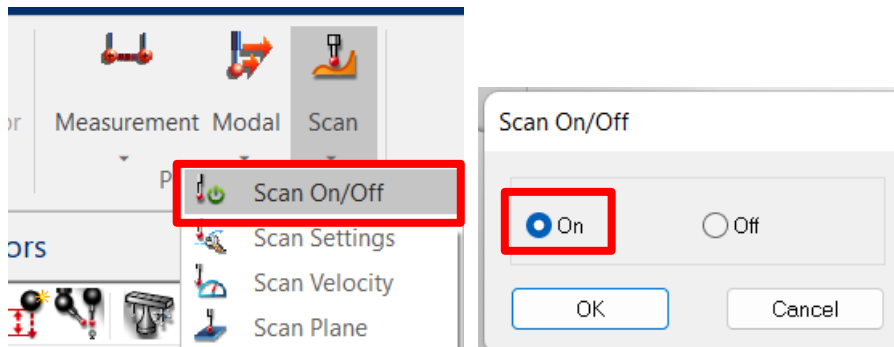


Figura de anexo 71. Activación del modo SCAN

En **Tactile** → **Scan Settings**, configurar la *Stop zone* como una esfera de radio 5 (ver Figura de anexo 72)

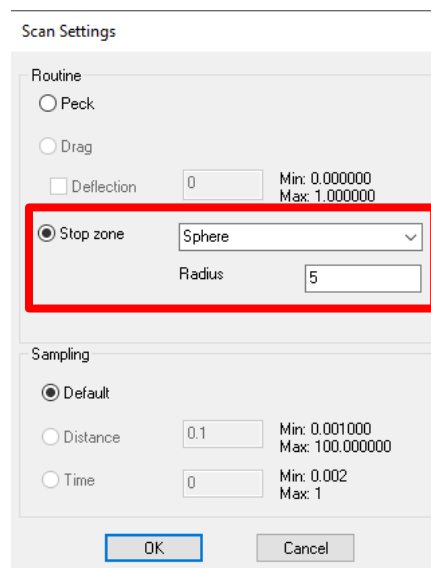


Figura de anexo 72. Stop zone. Sphere de radio 5

Ahora se va a proceder a medir puntos de interpolación para el escáner por barrido; para ello se va a **Tactile** → **Curve** (ver Figura de anexo 73)

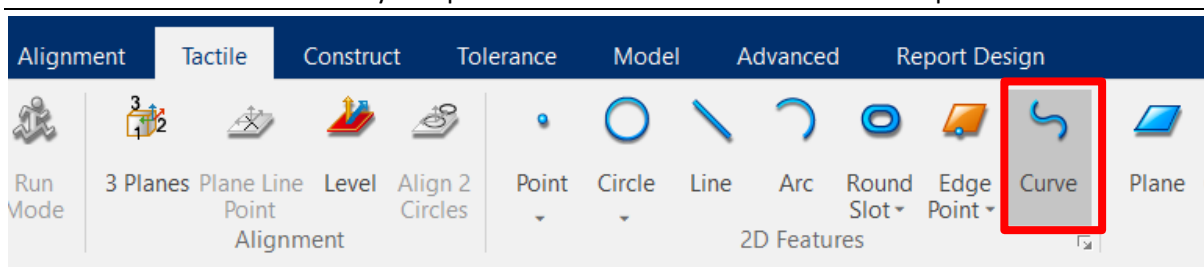


Figura de anexo 73. Tactile → Curve

Y después, con la máquina en *online*, **Tactile** → **Online Teach** → **Open Scan** (ver Figura de anexo 74)

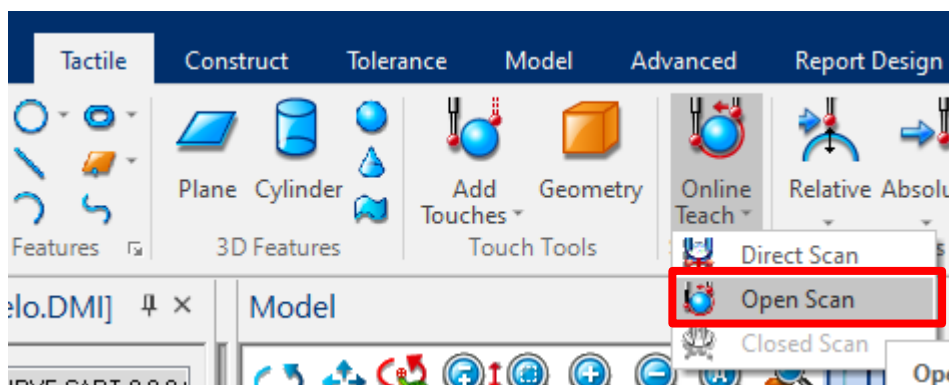


Figura de anexo 74. Tactile → Online Teach → Open Scan

A continuación, con la sonda se hace lo siguiente:

1. Palpar un primer punto, que será el primer punto del escaneo por barrido
2. Seleccionar un segundo punto cercano al primero, que será un punto de interpolación entre el primero y el último
3. Seleccionar el punto de fin, que será el último punto del escaneo por barrido

A.4.2. Escaneo por selección de línea prediseñada

El escaneo por barrido con línea prediseñada consiste en seleccionar una línea que ya exista en el modelo CAD (aunque se puede generar por cortes de sólido en Camio manualmente) y generar toques para el barrido.

Primero se activa el modo SCAN, para ello, se va a **Tactile** → **Scan On/Off**, y poner a **On**. (ver Figura de anexo 75)

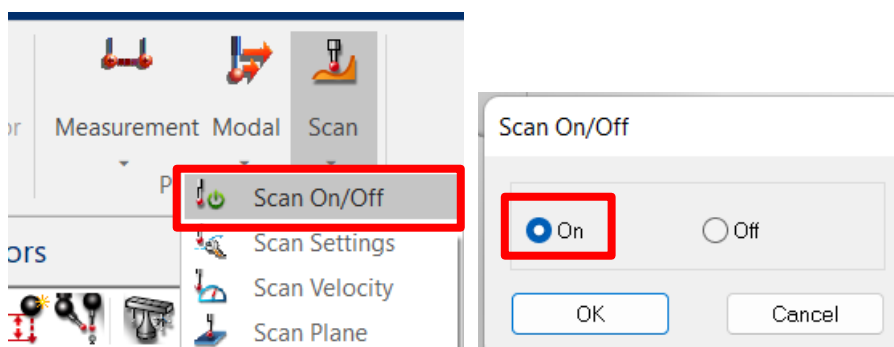


Figura de anexo 75. Activación del modo SCAN

En **Tactile** → **Scan Settings**, configurar la *Stop zone* como una esfera de radio 5 (ver Figura de anexo 76)

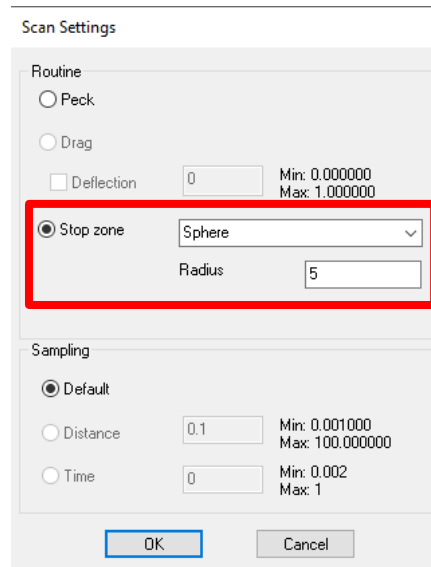


Figura de anexo 76. Stop zone. Sphere de radio 5

Si se desea medir una línea sobre una superficie, se puede crear a partir de cortes (*slices*) en el modelo, para ello, ir a **Model** → **Add Slice** (ver Figura de anexo 77)

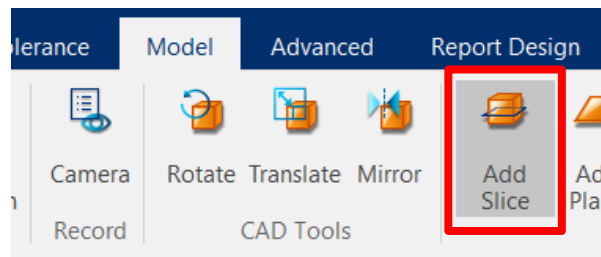


Figura de anexo 77. Model → Add Slice

Se selecciona un punto de la pieza donde se quiere realizar un corte, la normal del plano de corte, y se clicca en *Slice* (ver Figura de anexo 78)

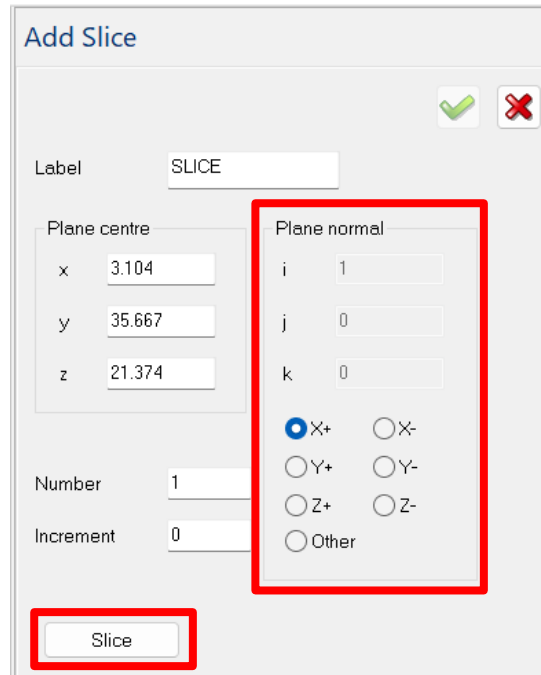



Figura de anexo 78. Configuración del plano de corte

Si se está conforme con el plano de corte, se pulsa  y en la pieza aparecerá una línea azul que representa el corte (ver Figura de anexo 79)

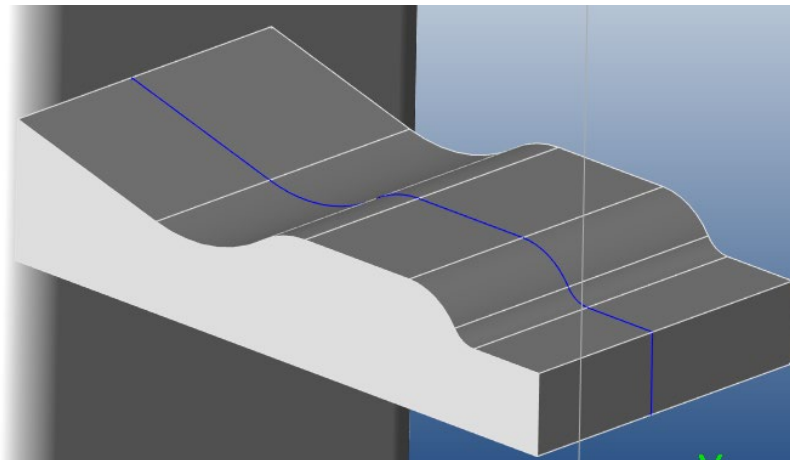


Figura de anexo 79. Visualización del corte realizado

Ahora se va a proceder a seleccionar la línea para realizar el escaneo. Para ello, se va a **Tactile** → **Curve** (ver Figura de anexo 80)

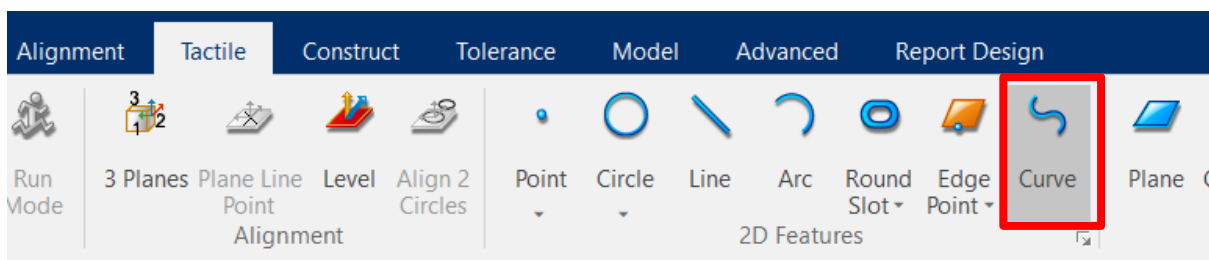


Figura de anexo 80. Tactile → Curve

Y se selecciona la línea del corte, que se pondrá de color amarillo (ver Figura de anexo 81)

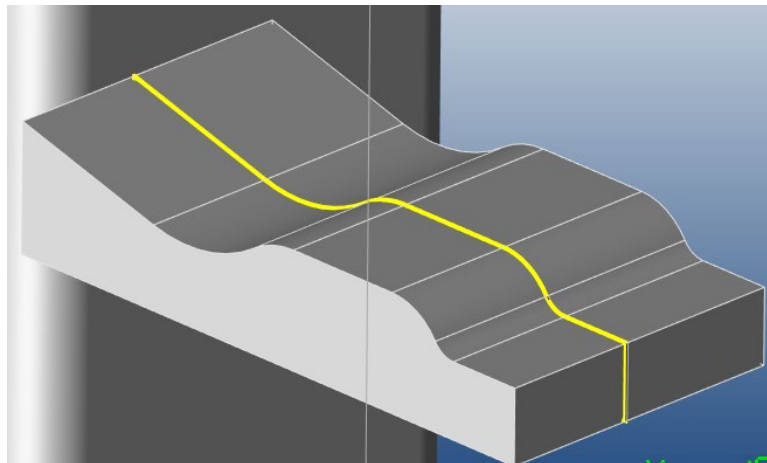


Figura de anexo 81. Selección de la línea del plano de corte

Para generar los toques se clic en **Tactile** → **Add Touches** → **Section Touches** (ver Figura de anexo 82)

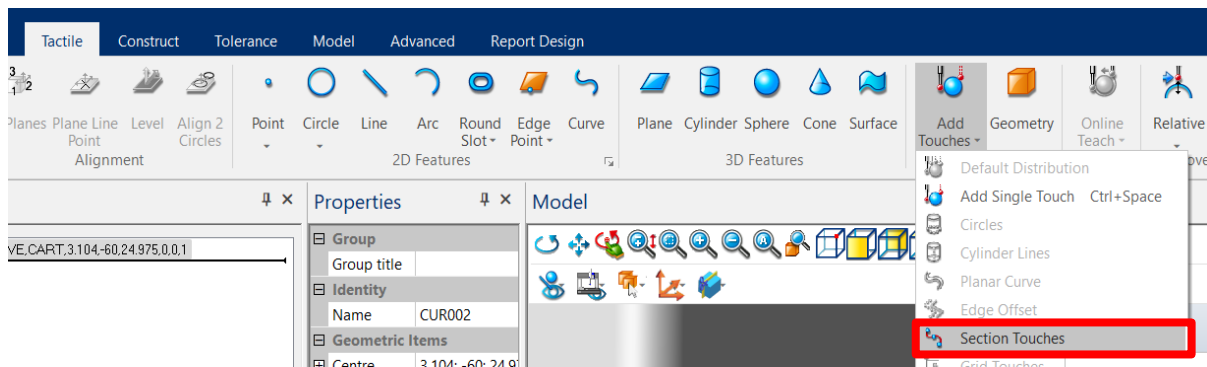


Figura de anexo 82. Tactile → Add Touches → Section Touches

Se selecciona el comienzo (color verde) y el final (color rojo) de la línea a barrer (ver Figura de anexo 83)

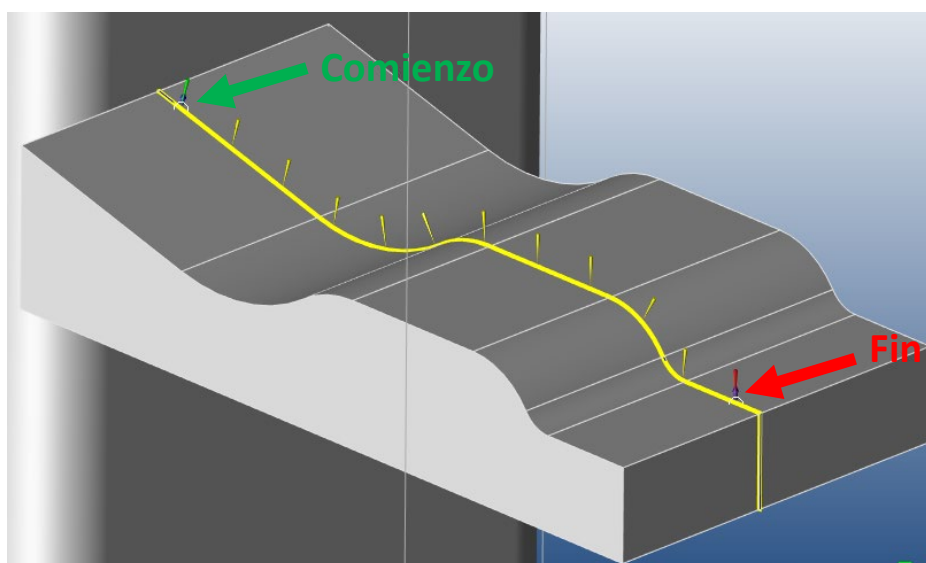



Figura de anexo 83. Selección del comienzo y fin de la línea de barrido

Y se clica en , obteniéndose la distribución de toques de la Figura de anexo 84.

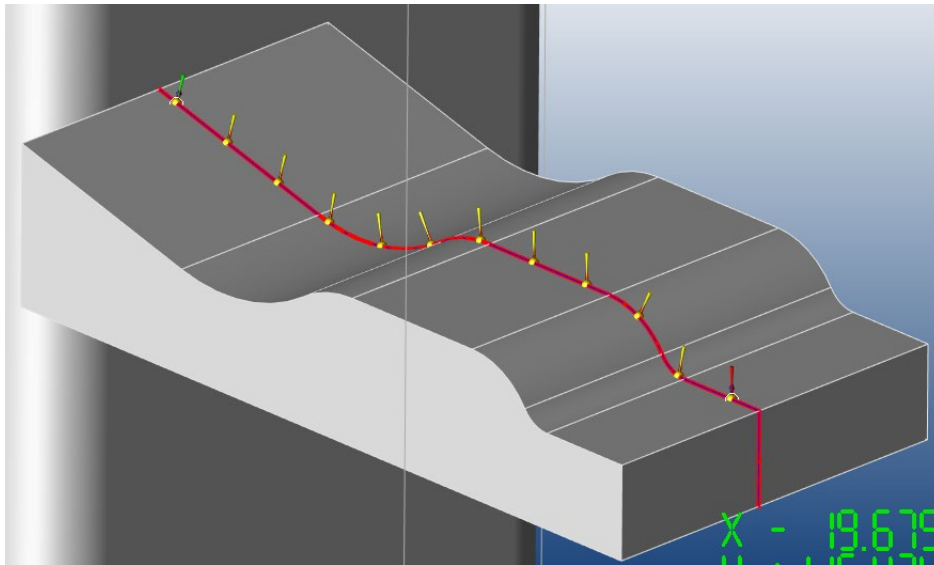


Figura de anexo 84. Distribución de toques

Se clica en y se pulsa *apply*, pudiendo visualizarse el recorrido que hará la sonda en la Figura de anexo 85.

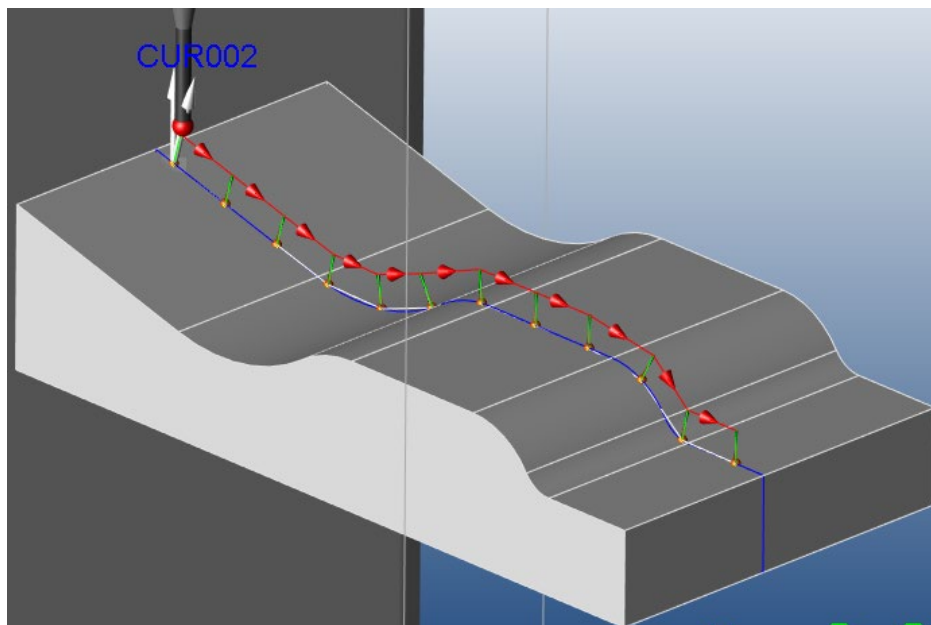


Figura de anexo 85. Recorrido que hará la sonda para el barrido de la línea

A.5. Editar el Report

Situarse en la pestaña de *Report Design* (ver Figura de anexo 86)

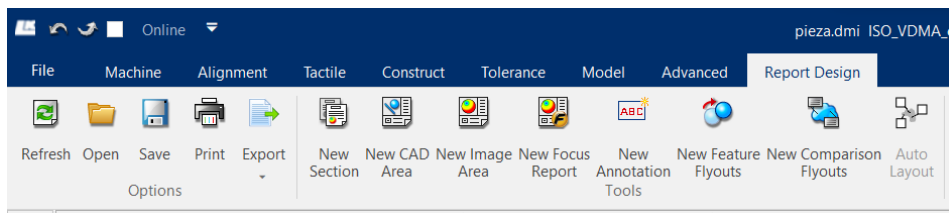


Figura de anexo 86. Report Design

Para añadir *flyouts* al *report*, arrastrar los elementos del *explorer* a la ventana del *report design* (ver Figura de anexo 87)

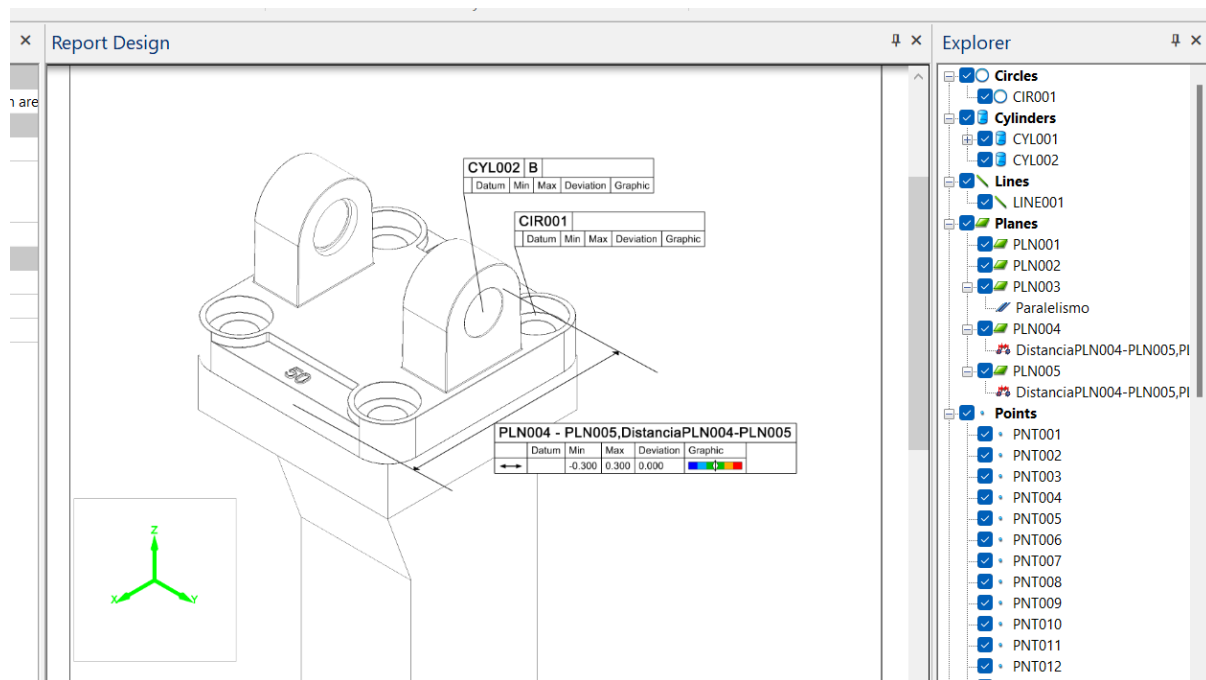


Figura de anexo 87. Visualización de *flyouts* en el *report*,

A.6. Exportación de nube de puntos

Para exportar la nube de puntos, se va a **Model** → **Save Model As...** (ver Figura de anexo 88)

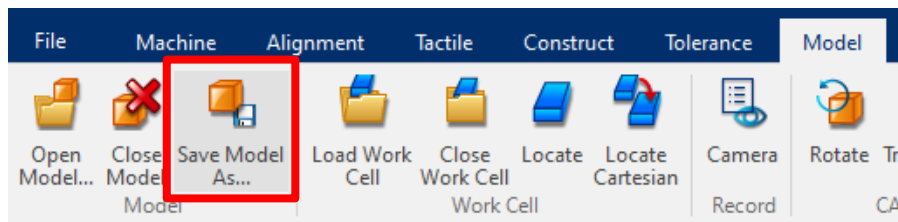


Figura de anexo 88. Model → Save Model As...

Se da un nombre al archivo y se selecciona la extensión *.igs (ver Figura de anexo 89)

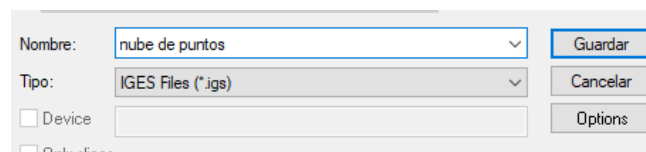


Figura de anexo 89. Exporar archivo como IGS

En opciones, se selecciona **include touch points** en common y en IGES, se selecciona **Free points** (ver Figura de anexo 90)

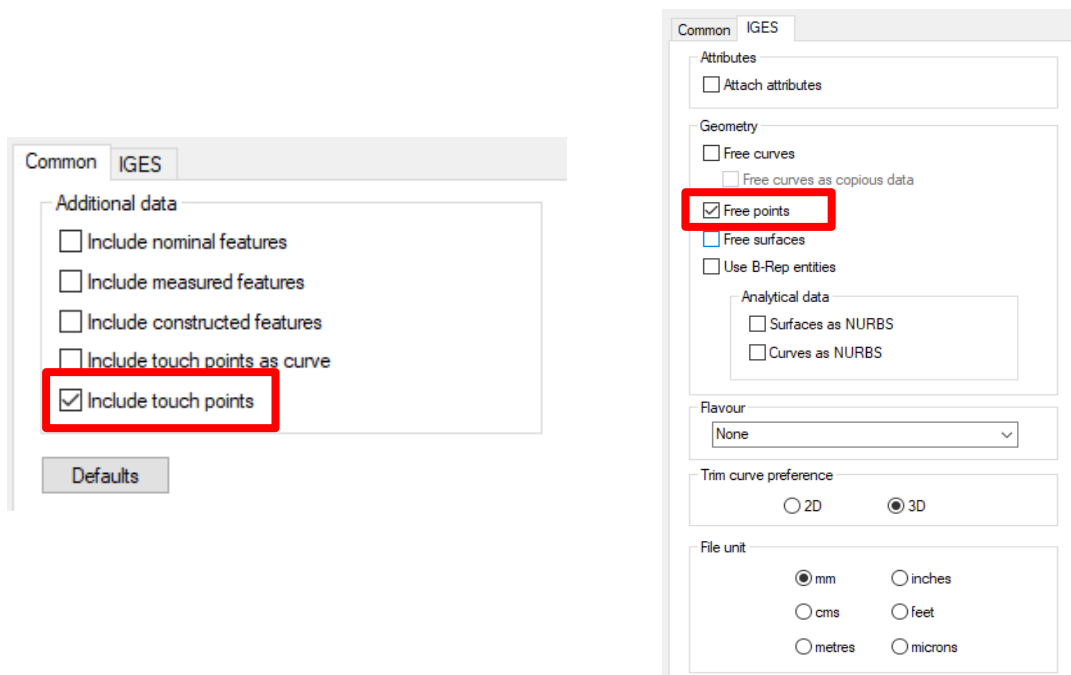


Figura de anexo 90. Selección de *include touch points* en common y *Free points* en IGES

Se guarda el archivo y se abre con Catia, por ejemplo, para editar la nube de puntos.

A.7. Programación Avanzada

A.7.1. Declaración de variables (DECLARE)

Para declarar variables para poder usarlas en el código del programa, se va a **Advanced** → **Declare Wizard** (ver Figura de anexo 91)



Figura de anexo 91. Advanced → Declare Wizard

Clicando en **Declare**, se obtiene una ventana como la de la Figura de anexo 92, y se selecciona el tipo de variable y se da un nombre.

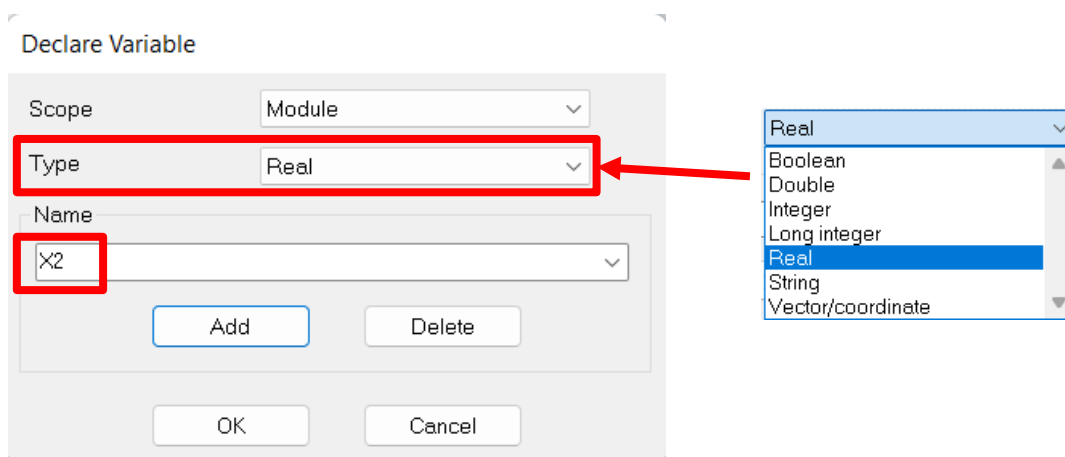


Figura de anexo 92. Declare variable

Una vez definida la variable X2, el código queda así:

```
DECL/LOCAL,REAL,X2
```

A.7.2. Asignación de valor a variables (ASSIGN)

Para asignar valores a las variables se va a **Advanced** → **Assign** (ver Figura de anexo 93)

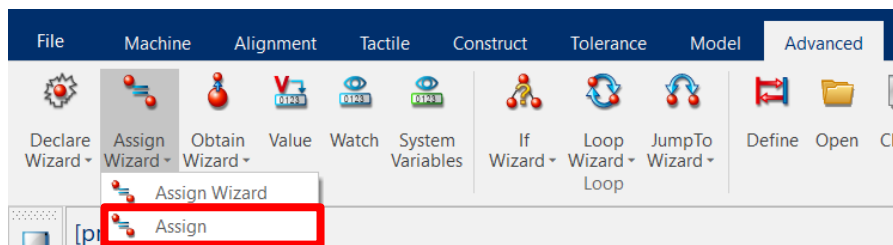


Figura de anexo 93. Advanced → Assign

Aparece una ventana como la de la Figura de anexo 94, donde se selecciona la variable a la que se le desea dar un valor (debe estar previamente definida), y en "Value" se le da el valor deseado.

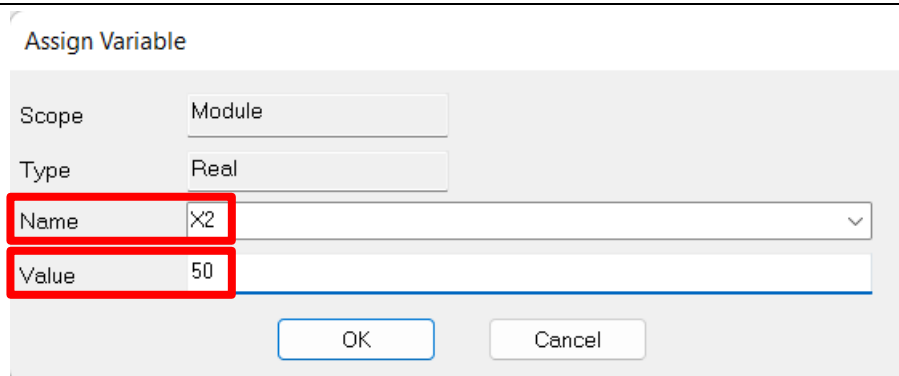


Figura de anexo 94. Assign variable

Una vez asignado el valor a la variable X2, el código queda así:

$X2=ASSIGN/50$

A.7.3. Asignación de valor a variables a partir de la obtención del valor de otro sitio (OBTAIN)

El objetivo es extraer el valor de las coordenadas de un punto.

Supongamos que tenemos el siguiente punto que ha sido definido en el código, bien sea por inserción manual o por palpado con la máquina:

$F(PNT001)=FEAT/POINT,CART,150,50,25,0,0,1$

Para entender que significa, en la Figura de anexo 95 se define su sintaxis:

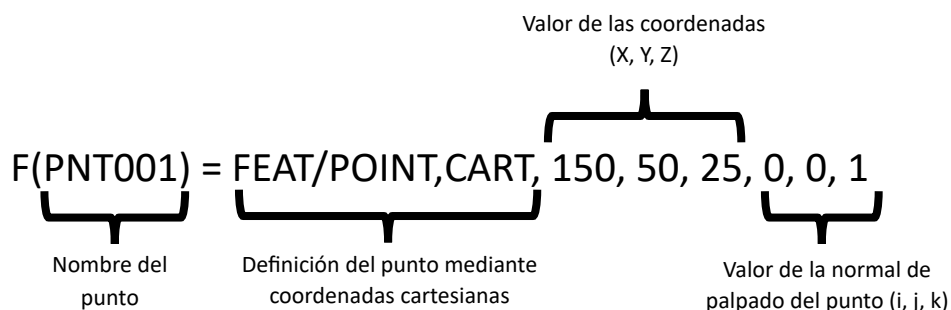


Figura de anexo 95. Definición de la sintaxis de un punto

Si por ejemplo se desean crear las variables X1, Y1, Z1 extrayendo los valores de las coordenadas del punto PNT001, se debe ir a **Advanced** → **Obtain Wizard** (ver Figura de anexo 96)



Figura de anexo 96. Advanced → Obtain Wizard

A continuación, se abre una ventana emergente donde se solicita seleccionar el “feature” del cual extraer el valor (ver Figura de anexo 97)

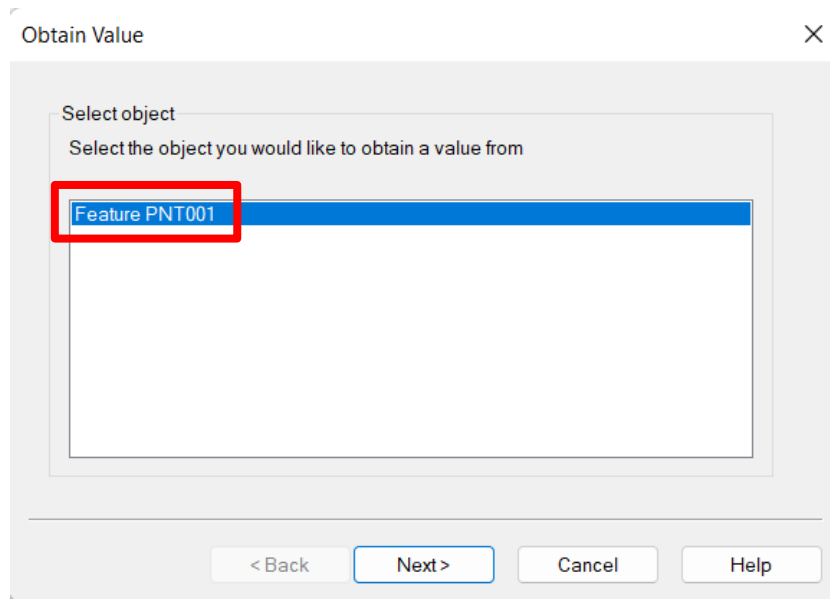


Figura de anexo 97. Obtain Value. Seleccionar el “feature”

Tras seleccionar el “feature”, se abre otra ventana donde se pide seleccionar la propiedad de dicho “feature” (ver Figura de anexo 98)

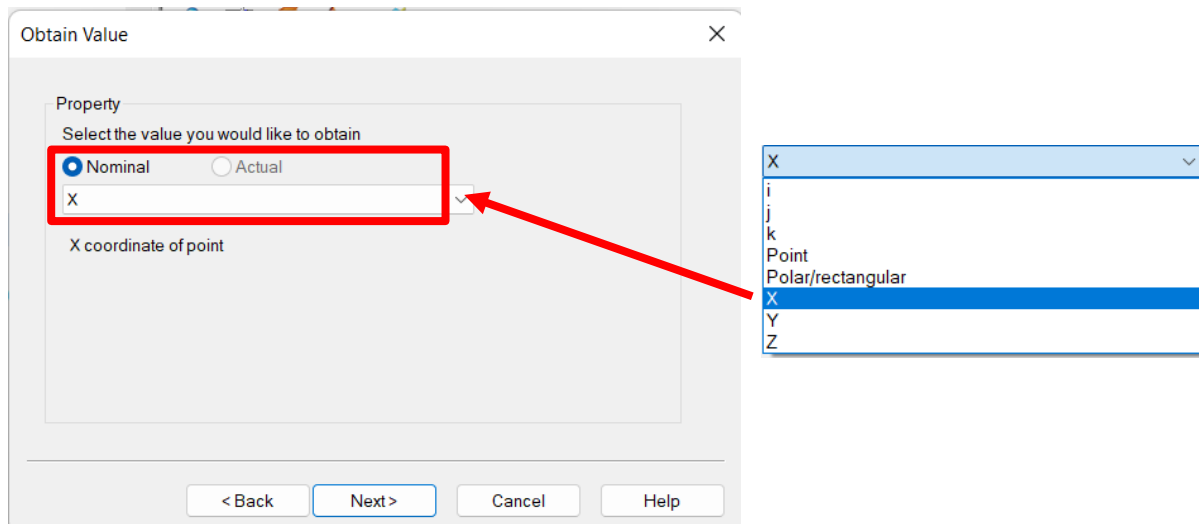


Figura de anexo 98. Obtain Value. Seleccionar la propiedad del “feature”

Tras seleccionar la propiedad deseada, aparece de nuevo otra ventana en la que se solicita la variable a la cual se le debe asignar el valor (ver Figura de anexo 99)

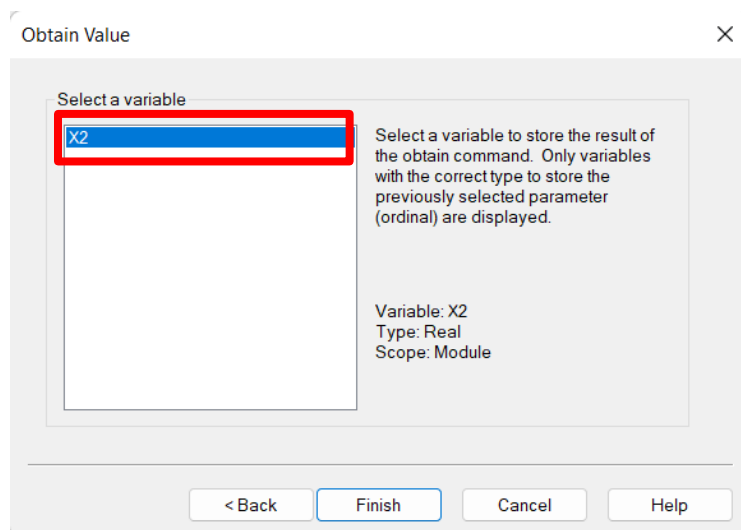


Figura de anexo 99. Obtain Value. Variable a la cual se le debe asignar el valor.

Al clicar en finalizar, se genera la siguiente línea de código:

X2=OBTAIN/F(PNT001),3

Que significa que la variable X2 pasa a tener el valor de la coordenada X (3) del punto PNT001.

Se puede observar que el valor que indica que es la coordenada X no es nada intuitivo, ya que utiliza el número 3. Para ello se recopila en la Tabla 28, varios valores con su significado:

Número	Significado
3	Coordenada X
4	Coordenada Y
5	Coordenada Z
6	Vector i
7	Vector j
8	Vector k

Tabla 28. Valores de la función OBTAIN con su significado

A modo de ejemplo, se incluye un código en el que, dado un punto, se desea extraer el valor de sus coordenadas X, Y, Z

\$\$ DENOMINACIÓN DEL PUNTO 1

F(PNT001)=FEAT/POINT,CART,150,50,25,0,0,1

\$\$ DECLARACIÓN DE VARIABLES

DECL/LOCAL,REAL,X1,Y1,Z1

\$\$ EXTRACCIÓN DE LAS COORDENADAS X,Y,Z DEL PUNTO 1

X1=OBTAIN/F(PNT001),3

Y1=OBTAIN/F(PNT001),4

Z1=OBTAIN/F(PNT001),5

A.7.4. Monitorizar el valor de variables (WATCH)

Para ver el valor actual de variables definidas en el programa, se recurre a la ventana de monitorización de variables que se puede encontrar en **Advanced** → **Watch** (ver Figura de anexo 100)

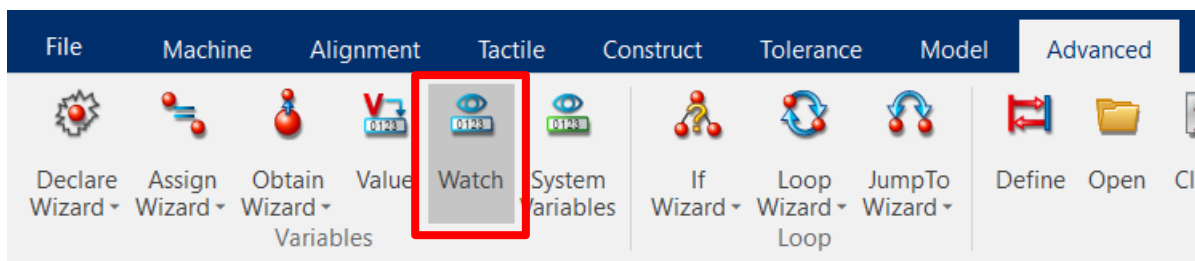


Figura de anexo 100. Advanced → Watch

Aparece una ventana en la que se puede introducir el nombre de las variables que se desean monitorizar (ver Figura de anexo 101)

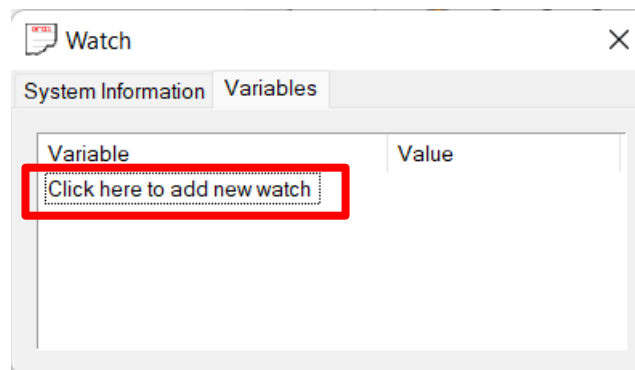


Figura de anexo 101. Watch. Introducir nueva variable

A modo de ejemplo, se representa lo que sucede si se incluyen las variables X1, Y1, Z1 (ver Figura de anexo 102)

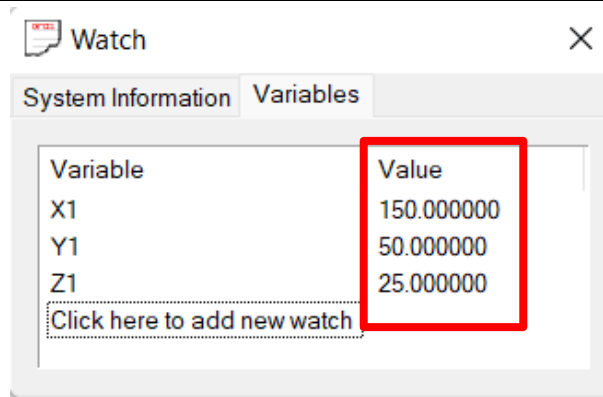


Figura de anexo 102. Watch. Visualización de variables

A.7.5. Bucle for (DO)

Para poder ejecutar un bucle se necesita una variable de iteración que sea de tipo entero, a la que se le puede dar el nombre I, por ejemplo.

DECL/LOCAL, INTGR, I

Para crear el bucle for (DO) se va a **Advanced** → **Loop Wizard** (ver Figura de anexo 103)

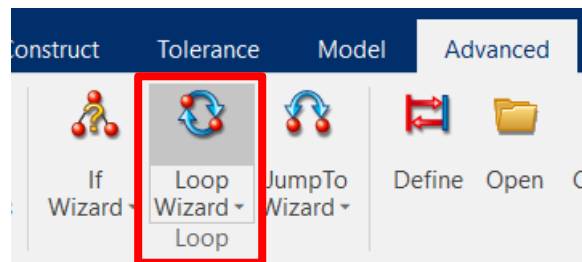


Figura de anexo 103. Advanced → Loop Wizard

Aparece una ventana en la que se pide seleccionar la variable de iteración previamente definida (ver Figura de anexo 104)

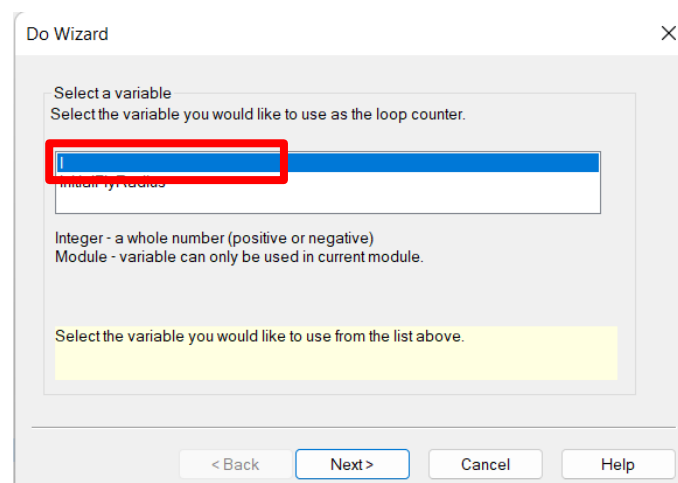


Figura de anexo 104. Do Wizard. seleccionar la variable de iteración

A continuación, se pide el número de iteraciones, para ello, se introduce en "Number of loops" el número de iteraciones deseado (ver Figura de anexo 105)

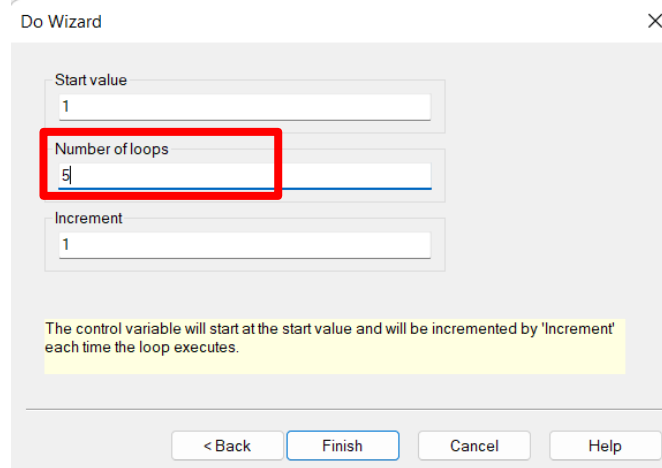


Figura de anexo 105. Do Wizard. Selección del número de iteraciones

Una vez se clica en finalizar, se obtiene la estructura del bucle for:

```
DO/I,1,5,1
$$Enter loop code here
ENDDO
```

Ahora solo queda introducir el código deseado para el bucle. A modo de ejemplo, se incluye un código en el que se definen unas coordenadas iniciales X0, Y0, Z0, y las variables XI, YI, que representan las coordenadas X e Y de 5 puntos que se van a generar mediante un bucle con una variación de DELTA.

```
$$ DECLARACIÓN DE VARIABLES
DECL/LOCAL,INTGR,I
DECL/LOCAL,INTGR,X0,Y0,Z0,XI,YI,DELTA

$$ INICIALIZACIÓN DE VARIABLES X0, Y0, Z0
X0=ASSIGN/100
Y0=ASSIGN/70
Z0=ASSIGN/25

$$ ASIGNACIÓN DEL INCREMENTO PARA EL BUCLE
DELTA=ASSIGN/5

$$ INICIALIZACION DE LAS VARIABLES XI, YI DEL BUCLE
XI=ASSIGN/X0
YI=ASSIGN/Y0

$$ BUCLE FOR
DO/I,1,5
  F(I)=FEAT/POINT, CART, XI, YI, Z0, 0, 0, 1
  $$ ACTUALIZACIÓN DE VARIABLES
  XI=ASSIGN/XI+DELTA
  YI=ASSIGN/YI+DELTA
ENDDO
```

El resultado que se obtiene son estos 5 puntos (ver Figura de anexo 106)

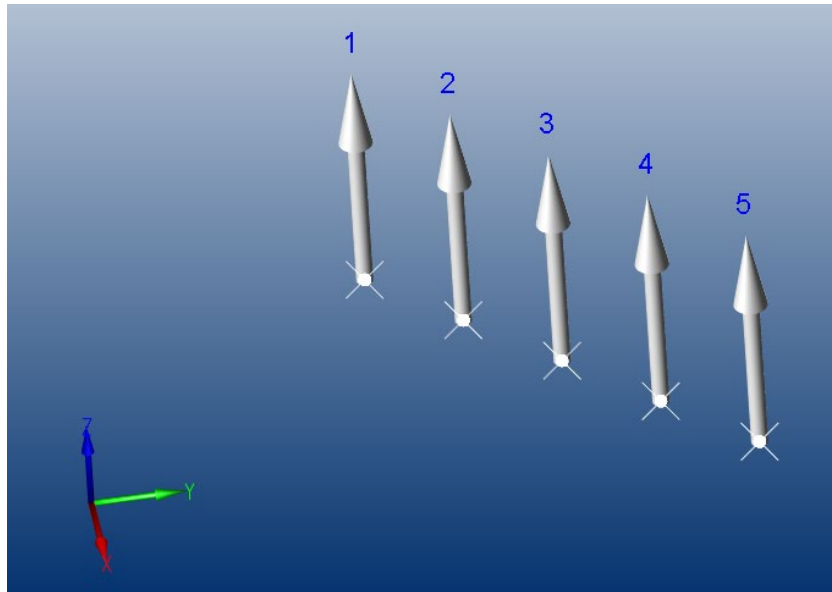


Figura de anexo 106. Resultado del ejemplo de aplicación del bucle for

A.7.6. Utilización del Prompt para pedir valores al usuario

Para pedir valores de variables al usuario para que las introduzca de forma manual, se recurre al uso del Prompt, **Advanced** → **Prompt** → **Simple Prompt** (ver Figura de anexo 107)

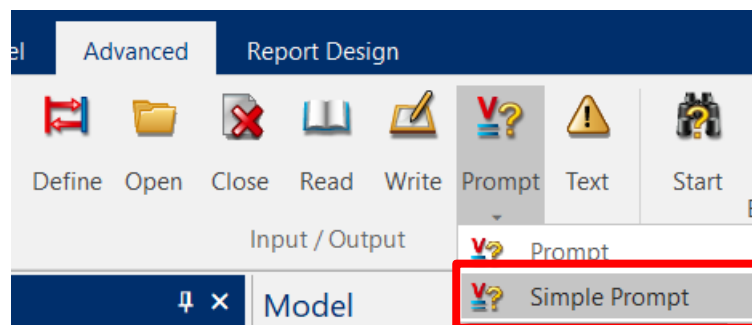


Figura de anexo 107. Advanced → Prompt → Simple Prompt

Aparece una ventana en la que se debe seleccionar una variable previamente definida para la cual se desea que el usuario introduzca el valor de forma manual. Se debe seleccionar la variable y escribir el texto que le aparecerá al usuario en pantalla (ver Figura de anexo 108)

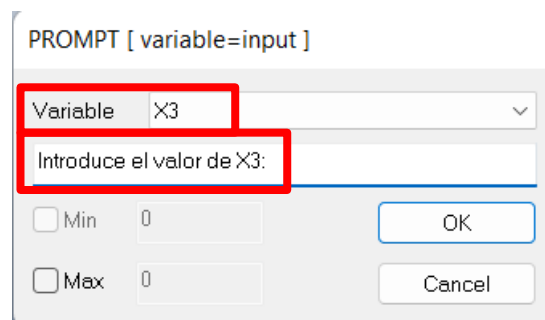


Figura de anexo 108. Simple Prompt. Selección de la variable texto que le aparecerá al usuario en pantalla.

Se genera un código de la siguiente forma:

```
X3=PROMPT/'Introduce el valor de X3: '
```

Y al ejecutarlo aparece la siguiente ventana emergente en donde se debe introducir el valor deseado (ver Figura de anexo 109)

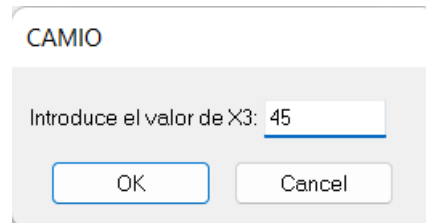


Figura de anexo 109. Resultado de la ejecución del Simple Prompt

A.7.7. Texto de output para la terminal

Para mostrar texto en la terminal de output se debe ir a **Advanced** → **Text** (ver Figura de anexo 110)

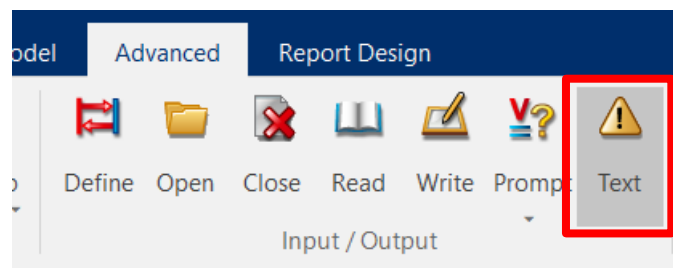


Figura de anexo 110. Advanced → Text

Aparecerá una ventana en la que se pide escribir el texto a mostrar. Además, debe seleccionarse la opción de Output file (ver Figura de anexo 111)

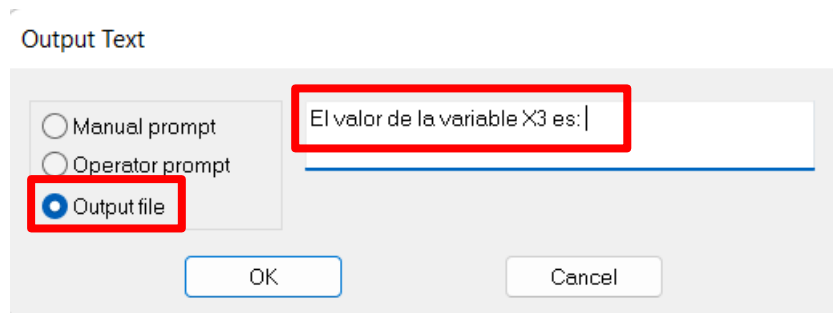


Figura de anexo 111. Texto a mostrar en el Output Text

Al aceptar se genera este código:

```
TEXT/OUTFIL,'El valor de la variable X3 es: '
```

Ahora es necesario mostrar el valor de la variable X3, para ello se va a **Advanced** → **Write** (ver Figura de anexo 112)

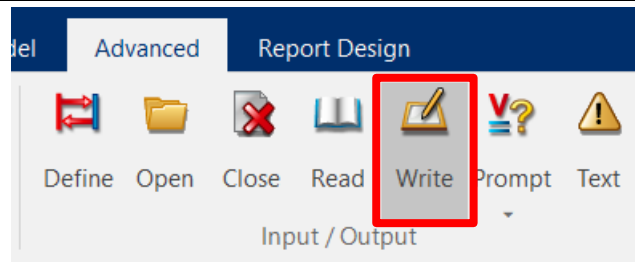


Figura de anexo 112. Advanced → Write

Aparece la siguiente ventana, en la que debe de seleccionarse la variable X3, clicar “Add” y seleccionar la opción de “Terminal” en “Output device” (ver Figura de anexo 113)

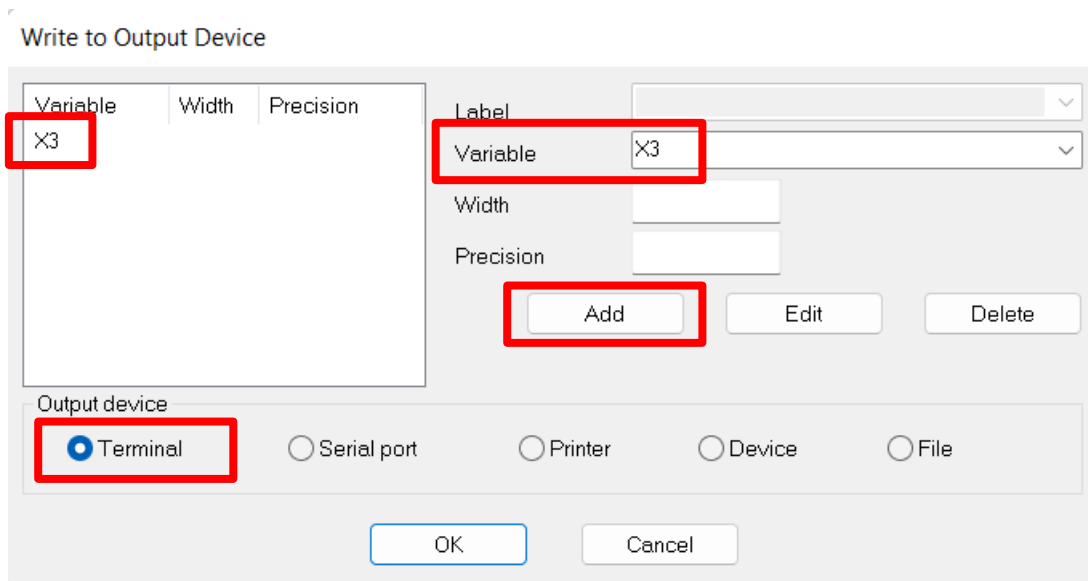


Figura de anexo 113. Write Output Device

Al aceptar se genera este código:

```
WRITE/DID(_TERM),X3
```

Y finalmente, al ejecutar las dos líneas de código generadas, se obtiene lo que se muestra en la Figura de anexo 114.

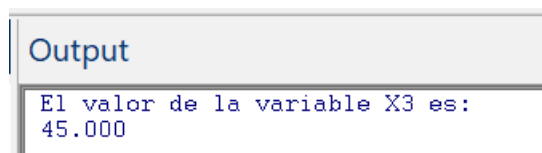


Figura de anexo 114. Resultado del ejemplo de uso de la función “Write”

ANEXO B. PROCEDIMIENTO DE ESCANEO POR PUNTOS (SIN MODELO CAD)

B.1. Paso 1. Establecer el origen de coordenadas de la pieza

Lo primero que hace falta es **establecer el sistema de coordenadas de la pieza (cero pieza)** (ver Figura de anexo 115). Tal y como se ha especificado anteriormente mediante el método de Plane-Line-Point Alingment (ver A.1.6. Definición de origen de la pieza ("cero pieza"). Método *Plane-Line-Point Alingment*)

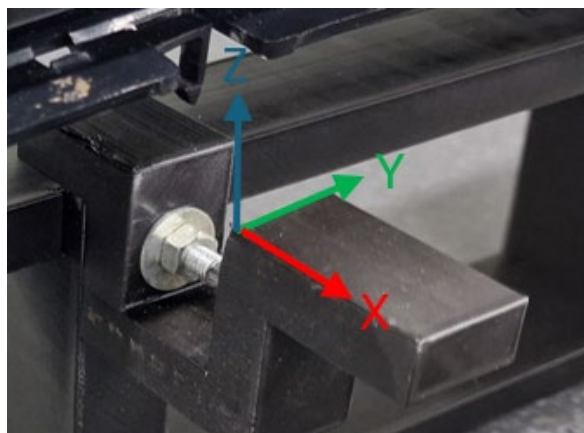


Figura de anexo 115. Sistema de coordenadas de la pieza (cero pieza)

Para establecer el sistema se va a aplicar el método plano-línea-punto. Para ello se deben palpar los 6 puntos del dibujo en modo manual (ver Figura de anexo 116):

- Puntos 1, 2 y 3 del dibujo → (plano 1)
- Puntos 4 y 5 del dibujo → (línea 1)
- Punto 6 del dibujo → (punto 1)

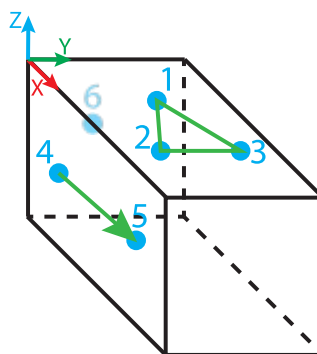


Figura de anexo 116. Puntos a palpar y orden de palpado para el método PLP Alignment

Palpar el plano (Puntos 1, 2 y 3 del dibujo) [**Tactile** → **plane**] (ver Figura de anexo 117) y palpar los puntos 1, 2 y 3 del dibujo.

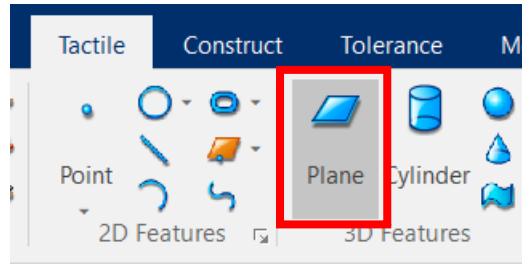


Figura de anexo 117. Tactile →plane

Palpar la línea [Tactile → Line] (ver Figura de anexo 118) y palpar los puntos 4 y 5 del dibujo.

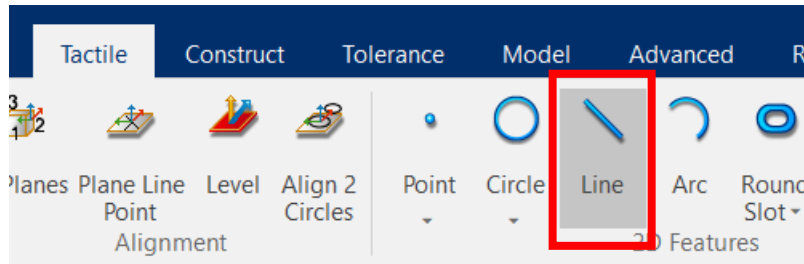


Figura de anexo 118. Tactile → Line

Palpar el punto [Tactile → Point] (ver Figura de anexo 119)

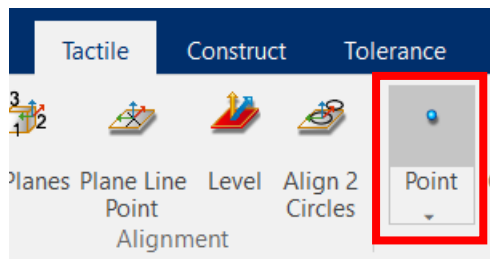


Figura de anexo 119. Tactile → Point

Establecer el sistema de coordenadas. (método PLP)

Una vez palpados, se establece el sistema de coordenadas mediante el método PLP (**Alignment →3-2-1 Alignment**) (ver Figura de anexo 120) y configurar los parámetros (ver Figura de anexo 121)

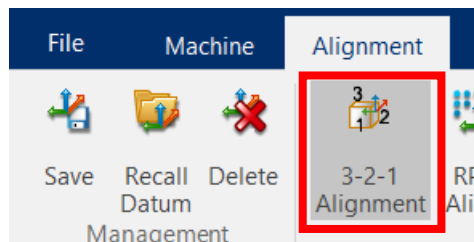


Figura de anexo 120. Alignment →3-2-1 Alignment

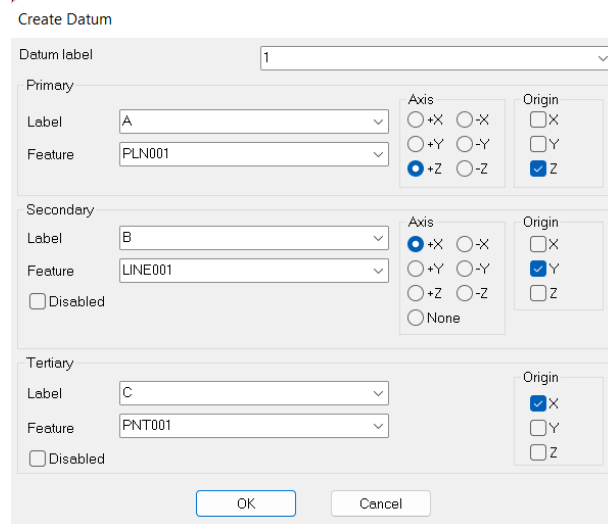


Figura de anexo 121. Configuración del 3-2-1 Alignment

B.2. Paso 2. Realizar toques de forma manual por la superficie a medir y exportar la nube de puntos

A continuación, se deben medir puntos por los extremos de la pieza y en el centro para reconstruir una superficie (ver Figura de anexo 122)

Importante medir como superficie [**Tactile** → **Surface**], ya que si se mide como puntos solo guarda el primero.

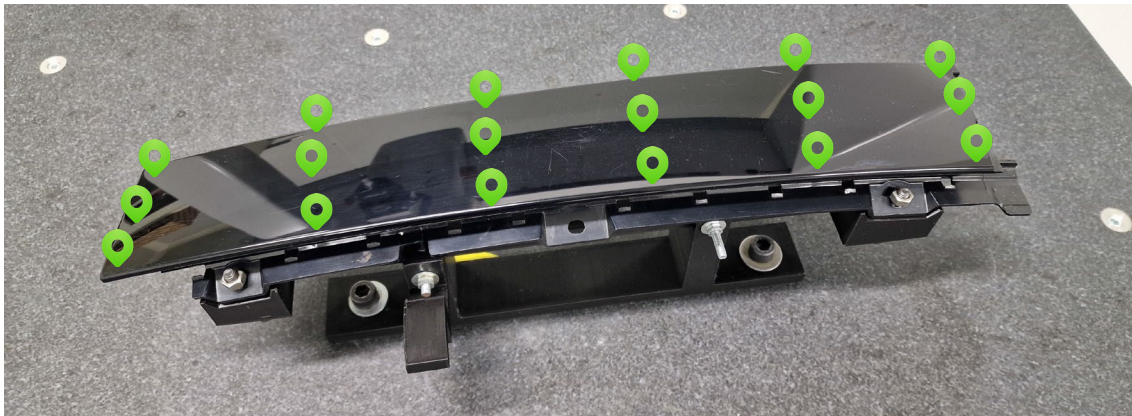


Figura de anexo 122. Ubicación aproximada de los puntos a medir en la superficie

Tras el palpado de los puntos se obtiene lo que se muestra en la Figura de anexo 123.

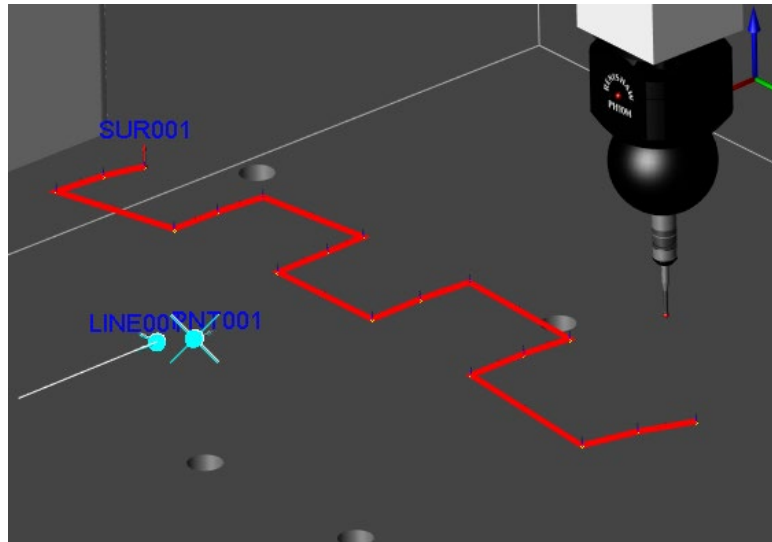


Figura de anexo 123. Superficie obtenida en CAMIO tras el palpado

Se exporta el archivo a igs [Model → Save model as...] (ver Figura de anexo 124)

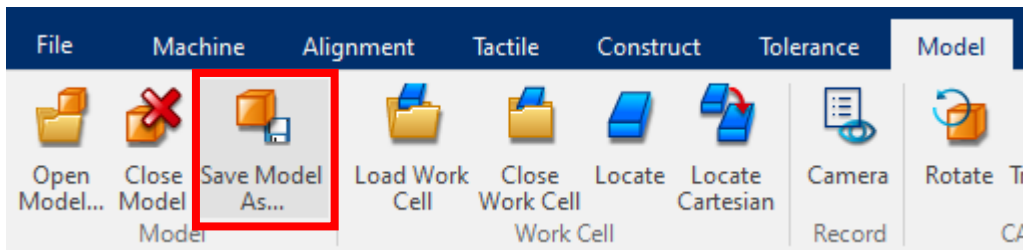


Figura de anexo 124. Model → Save model as...

Se da un nombre al archivo y se selecciona la extensión *.igs (ver Figura de anexo 125)

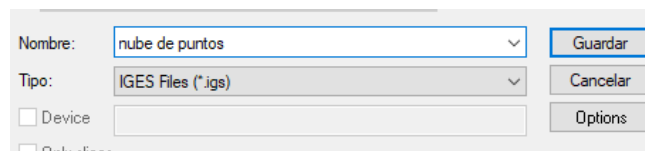


Figura de anexo 125. Guardado de archivo como IGES

En opciones, se selecciona "include touch points" en "common" y en "IGES", se selecciona "Free points" (ver Figura de anexo 126)

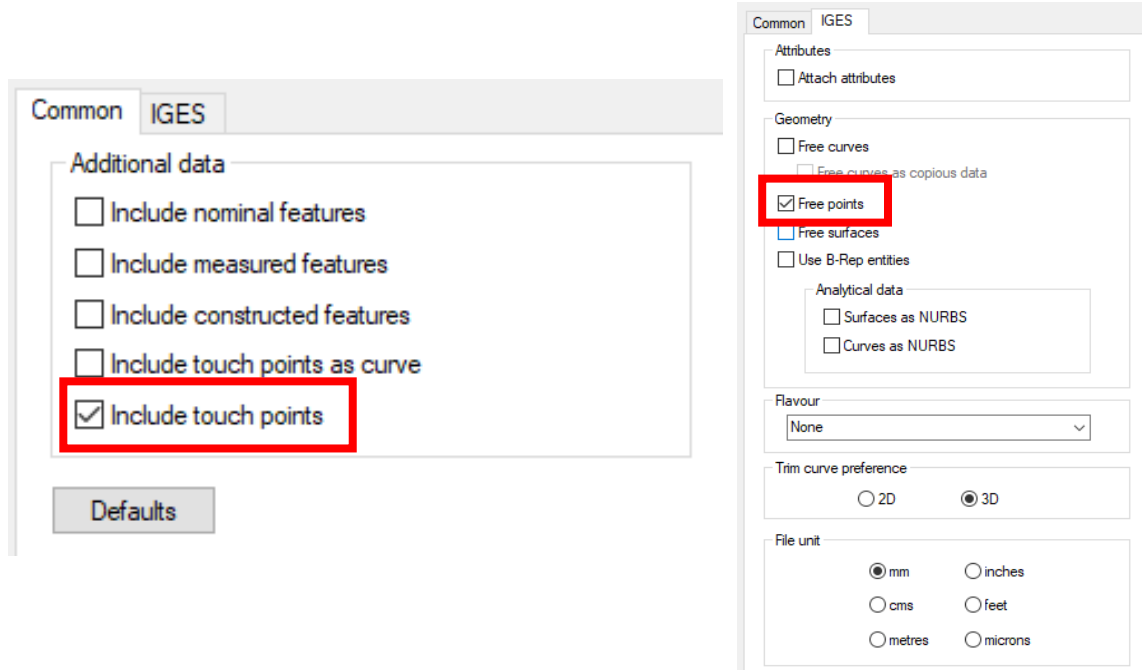


Figura de anexo 126. Opciones del fichero IGES

Se guarda el archivo y se abre con Catia

B.3. Paso 3. Reconstruir en Catia la superficie en bruto que contiene los puntos para poder importarla en Camio como un modelo CAD

Con los puntos medidos, se va a **reconstruir una superficie en Catia**.

Se empieza creando una nueva pieza de tipo *part* (ver Figura de anexo 127)

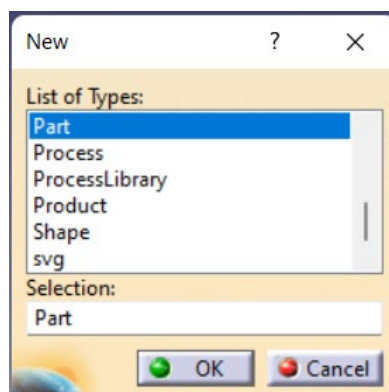



Figura de anexo 127. Creación de nueva pieza tipo *part* en Catia

Se accede al modo de *digitized shape editor* (ver Figura de anexo 128) y se importa la nube de puntos con el icono 

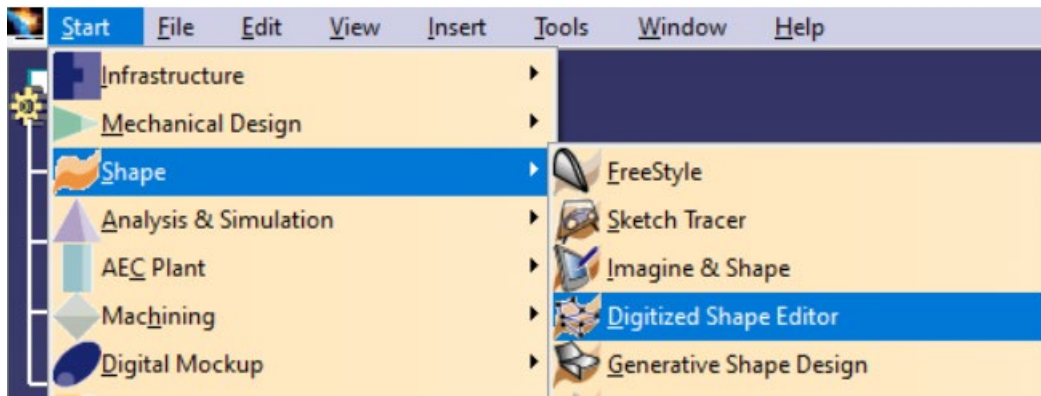



Figura de anexo 128. Modo de “digitized shape editor” en catia

Se selecciona el archivo igs de los puntos y se importa.

Tras esto, se debe eliminar los puntos del sistema de coordenadas para que no interfiera con la creación de la malla con el icono de *remove* . Seleccionar los puntos a eliminar y clicar ok. (ver Figura de anexo 129)

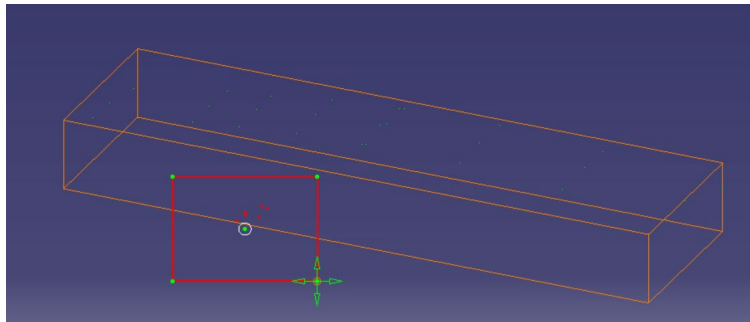


Figura de anexo 129. Selección de puntos a eliminar de la nube


Clicar en el icono de *mesh creation* , seleccionar los puntos, ajustar el valor del *neighborhood* y clicar *apply*. Se obtiene la malla de la Figura de anexo 130.



Figura de anexo 130. Malla obtenida

Nota: si alguna parte de la malla con se ha creado se puede construir manualmente uniendo nodos.

A continuación, ir al módulo de “*Quick Surface Reconstruction*” (ver Figura de anexo 131)

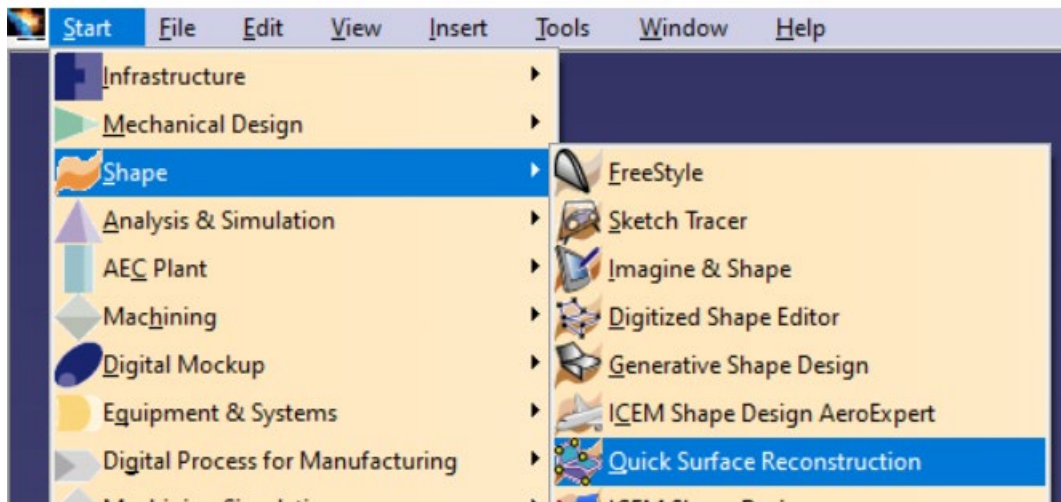



Figura de anexo 131. Módulo de “Quick Surface Reconstruction” en Catia

y pulsar en *Automatic Surface* (). Seleccionar la malla y clicar ok. Se obtendrá la malla de la superficie reconstruida que se ve en la Figura de anexo 132.

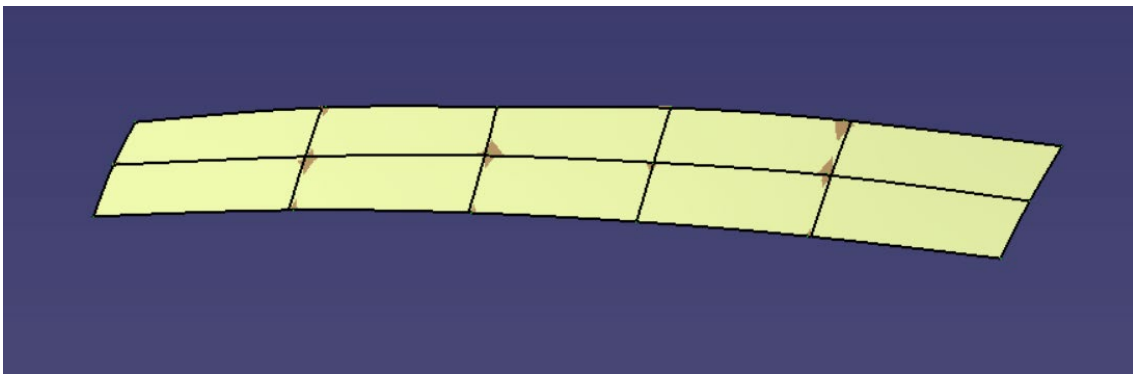


Figura de anexo 132. Malla de la superficie reconstruida

Exportar el archivo como IGS (ver Figura de anexo 133)

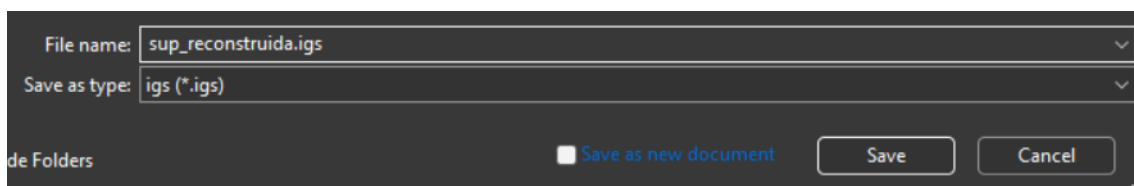


Figura de anexo 133. Exportación de la malla como IGES

B.4. Paso 4. Importar en Camio la superficie reconstruida en bruto

Tras reconstruir la superficie, se importa en camio como modelo, y a partir de este modelo, se pueden generar puntos mediante rejilla para medir la superficie.

Para ello, se clic en **Model** → **Open Model...** (ver Figura de anexo 134) y se selecciona el fichero igs que se ha exportado con Catia.

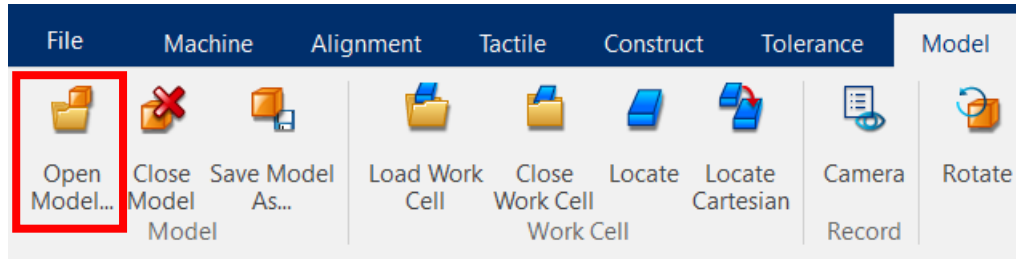


Figura de anexo 134. Model → Open Model...

Al abrirlo, se verá la superficie que se ha generado en Catia (ver Figura de anexo 135)

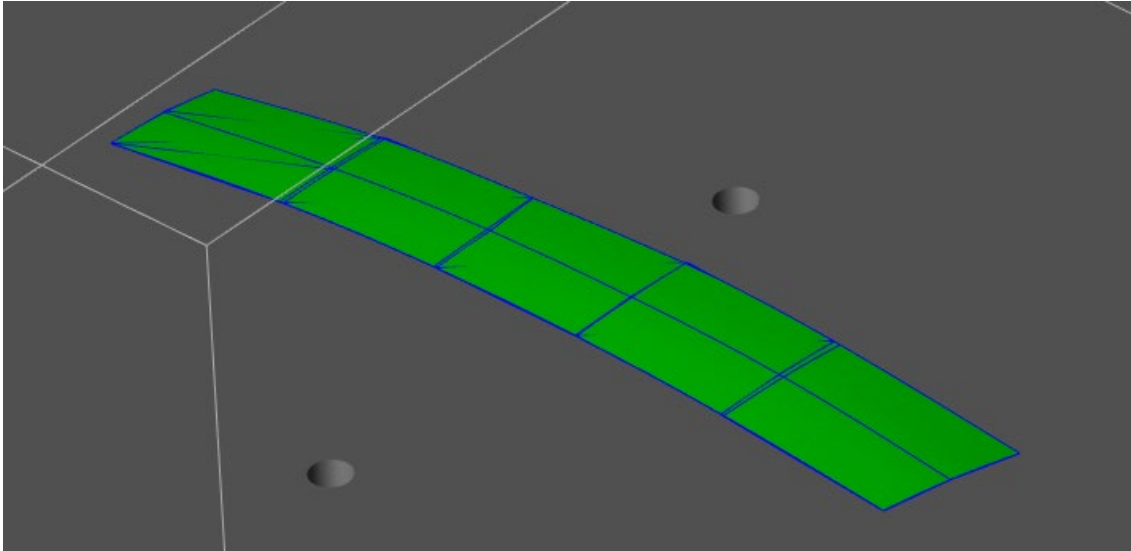


Figura de anexo 135. Superficie que se ha generado en Catia abierta en Camio

B.5. Paso 5. Generar toques de palpado sobre la superficie importada para que la máquina mida los puntos.

A continuación, debe pasarse al modo automático [Tactile →Modal →Mode →Automatic]

Los parámetros clave que influyen en la distancia y por lo tanto en el tiempo de medida son los siguientes:

Approach - the distance from the touch point where the probe path becomes normal to the touch point surface.

Retract - the distance the probe backs off after a touch has been detected.

Clearance - the distance from the feature that the CMM uses as a clearance zone when moving the probe to take another point.

Nota: *Clearance* debe ser mayor o igual que *Approach* (si es menor la sonda hará un efecto rebote)

Una propuesta probada para modificar la distancia que se retira la sonda tras palpar un punto y que por tanto, tarde menos tiempo, es la siguiente:

- *Approach* = 1 (El valor de *approach* está limitado inferiormente a 1 por el programa)
- *Clearance* = 1
- *Retract* = 1

Tras modificar estos parámetros, se crea una rejilla de puntos [Tactile →Points →Points on a grid] (ver Figura de anexo 136)

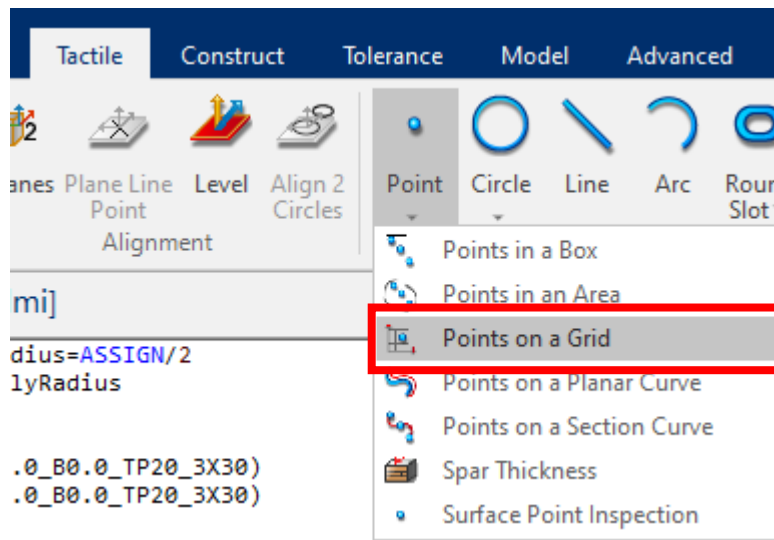


Figura de anexo 136. Tactile →Points →Points on a grid

Se ajusta el parámetro de espaciado para que haya la densidad de puntos deseada en la superficie y se generan los puntos (ver Figura de anexo 137)

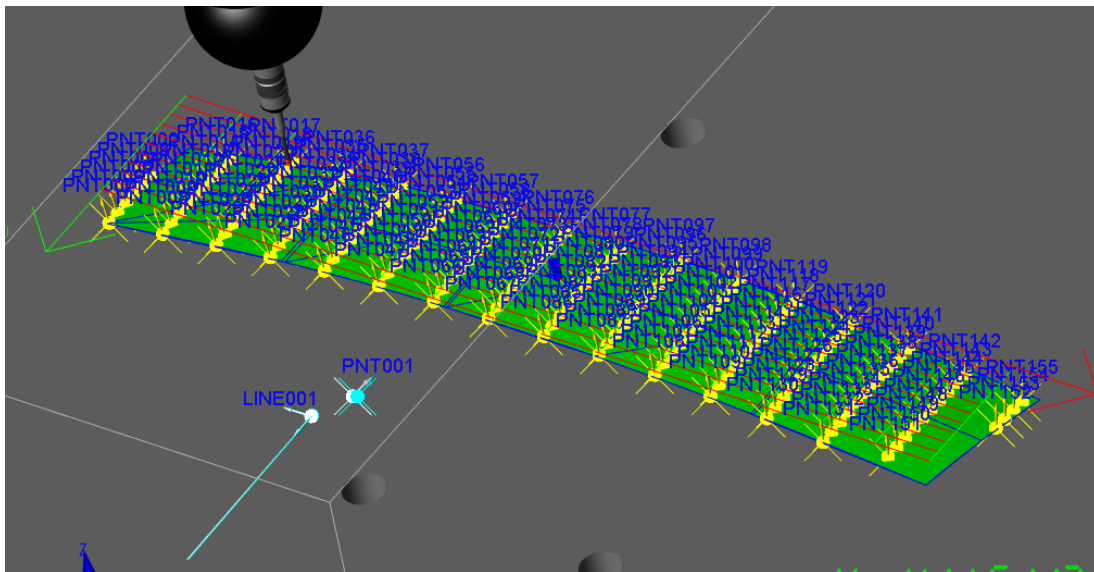


Figura de anexo 137. Puntos generados en la superficie

Tras haber ejecutado la medición, se exporta de nuevo los puntos palpados a Catia.

B.6. Paso 6. Reconstruir en Catia una segunda superficie más precisa

Se importa la nube de puntos anteriormente generada a Catia (ver Figura de anexo 138)

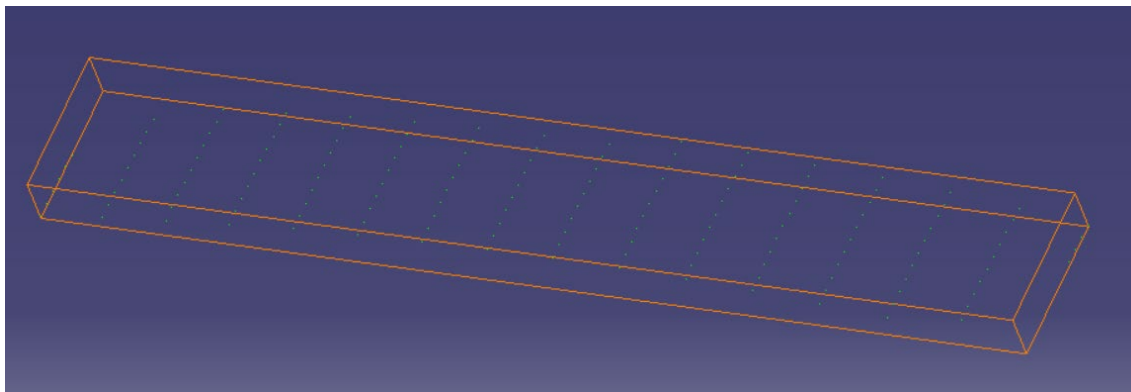


Figura de anexo 138. Nube de puntos importada en Catia

Siguiendo el mismo procedimiento mostrado anteriormente, se genera la malla de la nueva superficie más precisa (ver Figura de anexo 139)

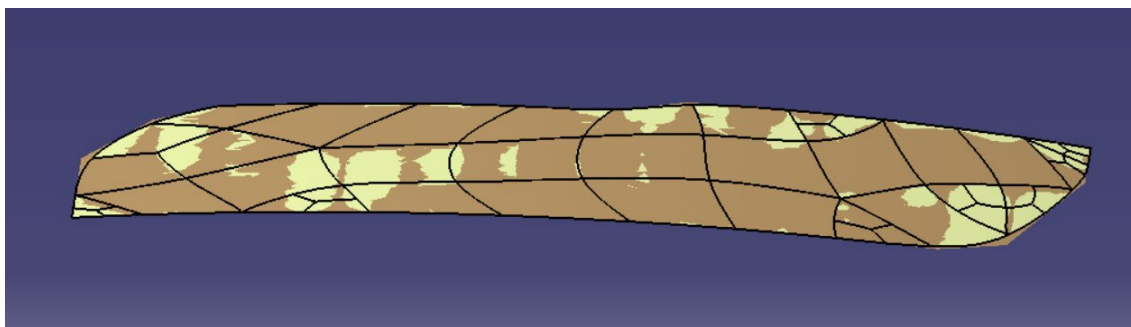


Figura de anexo 139. Malla de la superficie más precisa que la anterior

ANEXO C. CÓDIGOS DEFINITIVOS DE CAMIO

C.1. Código del algoritmo para el barrido por líneas (sin modelo CAD)

```
DMISMN/'Default metric project',05.2
FILNAM/'Default metric project',05.2
DV(0)=DMESWV/'86,1,29166'
UNITS/MM,ANGDEC
DECPL/ALL,DEFAULT
V(0)=VFORM/ALL,PLOT
DISPLY/TERM,V(0),STOR,DMIS,V(0)
SNSSET/APPRCH,5
SNSSET/RETRCT,5
SNSSET/SEARCH,5
SNSSET/CLRSRF,15
SNSSET/DEPTH,0
DECL/GLOBAL,INTGR,InitialFlyRadius
InitialFlyRadius=ASSIGN/2
FLY/InitialFlyRadius
MODE/MAN
RECALL/SA(A0.0_B0.0_TP20_3X30)
SNSLCT/SA(A0.0_B0.0_TP20_3X30)
$$ DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS
MODE/MAN
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PLN001">
$$<MEAS_PLANE name = "PLN001: -8.00, -9.00, -479.00, 0.02, 0.02, 1.00 ">
F(PLN001)=FEAT/PLANE,CART,-8,-9,-479,0.017685,0.0193,0.999657
MEAS/PLANE,F(PLN001),3
PTMEAS/CART,408.9596,199.7483,-489.7773,-0.003419,-0.008758,0.999956
PTMEAS/CART,422.6512,193.1425,-489.8878,-0.001138,-0.000339,0.999999
PTMEAS/CART,422.6539,204.4552,-490.0967,-0.005392,0.00028,0.999985
ENDMES
```

```
$$<\MEAS_PLANE >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PLN001>
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - LINE001">
$$<MEAS_LINE name = "LINE001: 419.50, 188.50, -493.50, 1.00, 0.02, 0.00 0.02,$
-1.00, 0.00 ">
F(LINE001)=FEAT/LINE,UNBND,CART,419.5,188.5,-493.5,0.999848,0.017452,0,0.017452$
,-0.999848,0
MEAS/LINE,F(LINE001),2
PTMEAS/CART,411.1594,188.4628,-493.5177,0.0003,-0.999994,0.003537
PTMEAS/CART,427.8556,188.803,-493.524,-0.025699,-0.99946,0.0205
ENDMES
$$<\MEAS_LINE >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - LINE001>
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PTO_CERO">
$$<MEAS_POINT name = "PTO_CERO: 400.00,197.00,-495.00, -1.00,0.00,-0.02 ">
F(PTO_CERO)=FEAT/POINT,CART,400,197,-495,-0.999848,0,-0.017452
MEAS/POINT,F(PTO_CERO),1
PTMEAS/CART,400.2096,196.9078,-494.7651,-0.999913,0.00152,-0.013117
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PTO_CERO>
$$punto de la cara delantera
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT001">
$$<MEAS_POINT name = "PNT001: 432.50,193.50,-494.50, 1.00,0.00,0.00 ">
F(PNTCD)=FEAT/POINT,CART,432.5,193.5,-494.5,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNTCD),1
PTMEAS/CART,432.6602,193.5958,-494.7406,0.999993,0.003131,-0.002034
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT001>
$$ MEDIDA DE PUNTOS EN MODO MANUAL
TEXT/OPER,'ATENCIÓN! A continuación hay que palpar los 9 puntos para el algoritmo de escaneo. Es
CRUCIAL palpar los puntos en el orden correcto.'
```

MODE/AUTO,PROG,MAN

GOTO/CART,318.1009,65.792,-430

\$\$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT001">

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT001: 318.00,66.00,-466.50, 0.00,0.00,1.00 ">

F(PNT001)=FEAT/POINT,CART,318,66,-466.5,0,0,1

MEAS/POINT,F(PNT001),1

PTMEAS/CART,318.1009,65.792,-466.5663,-0.00136,0.00122,0.999998

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT001>

GOTO/CART,318.1009,65.792,-400

GOTO/CART,318.0981,131.883,-400

GOTO/CART,318.0981,131.883,-430

\$\$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT002">

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT002: 318.00,132.00,-456.00, 0.00,0.00,1.00 ">

F(PNT002)=FEAT/POINT,CART,318,132,-456,0,0,1

MEAS/POINT,F(PNT002),1

PTMEAS/CART,318.0981,131.883,-455.9303,0.00034,-0.001579,0.999999

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT002>

GOTO/CART,318.0981,131.883,-400

GOTO/CART,318.0867,189.5361,-400

GOTO/CART,318.0867,189.5361,-430

\$\$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT003">

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT003: 318.00,189.50,-450.00, 0.01,-0.00,1.00 ">

F(PNT003)=FEAT/POINT,CART,318,189.5,-450,0.007192,-0.004943,0.999962

MEAS/POINT,F(PNT003),1

PTMEAS/CART,318.0867,189.5361,-449.7807,0.008538,-0.005898,0.999946

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT003>

```
GOTO/CART,318.0867,189.5361,-400
GOTO/CART,346.0539,62.9017,-400
GOTO/CART,346.0539,62.9017,-430
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT004">
$$<MEAS_POINT name = "PNT004: 346.00,63.00,-464.50, 0.00,0.00,1.00 ">
F(PNT004)=FEAT/POINT,CART,346,63,-464.5,0,0,1
MEAS/POINT,F(PNT004),1
PTMEAS/CART,346.0539,62.9017,-464.6614,-0.002958,0.00032,0.999996
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT004>
GOTO/CART,346.0539,62.9017,-400
GOTO/CART,346.037,129.7137,-400
GOTO/CART,346.037,129.7137,-430
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT005">
$$<MEAS_POINT name = "PNT005: 346.00,129.50,-454.50, 0.00,0.00,1.00 ">
F(PNT005)=FEAT/POINT,CART,346,129.5,-454.5,0,0,1
MEAS/POINT,F(PNT005),1
PTMEAS/CART,346.037,129.7137,-454.4604,-0.000979,-0.000859,0.999999
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT005>
GOTO/CART,346.037,129.7137,-400
GOTO/CART,346.034,183.9667,-400
GOTO/CART,346.034,183.9667,-430
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT006">
$$<MEAS_POINT name = "PNT006: 346.00,184.00,-449.00, 0.00,0.00,1.00 ">
F(PNT006)=FEAT/POINT,CART,346,184,-449,0,0,1
MEAS/POINT,F(PNT006),1
PTMEAS/CART,346.034,183.9667,-448.8596,0.00002,0.003677,0.999993
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
```

```
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT006>
GOTO/CART,346.034,183.9667,-400
GOTO/CART,372.5229,63.1672,-400
GOTO/CART,372.5229,63.1672,-430
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT007">
$$<MEAS_POINT name = "PNT007: 372.50,63.00,-463.50, 0.00,0.00,1.00 ">
F(PNT007)=FEAT/POINT,CART,372.5,63,-463.5,0,0,1
MEAS/POINT,F(PNT007),1
PTMEAS/CART,372.5229,63.1672,-463.5542,0.000499,-0.00014,1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT007>
GOTO/CART,372.5229,63.1672,-400
GOTO/CART,372.5225,134.4315,-400
GOTO/CART,372.5225,134.4315,-430
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT008">
$$<MEAS_POINT name = "PNT008: 372.50,134.50,-453.50, 0.00,0.00,1.00 ">
F(PNT008)=FEAT/POINT,CART,372.5,134.5,-453.5,0,0,1
MEAS/POINT,F(PNT008),1
PTMEAS/CART,372.5225,134.4315,-453.6216,0.00034,0.001878,0.999998
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT008>
GOTO/CART,372.5225,134.4315,-400
GOTO/CART,372.5218,188.8152,-400
GOTO/CART,372.5218,188.8152,-430
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT009">
$$<MEAS_POINT name = "PNT009: 372.50,189.00,-448.50, 0.00,0.00,1.00 ">
F(PNT009)=FEAT/POINT,CART,372.5,189,-448.5,0,0,1
MEAS/POINT,F(PNT009),1
PTMEAS/CART,372.5218,188.8152,-448.6153,-0.000519,-0.000678,1
ENDMES
```



```
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT009>
GOTO/CART,372.5218,188.8152,-400
$$ IR POR ENCIMA DEL PUNTO 1
GOTO/CART,318.1009,65.792,-400
DECL/LOCAL,REAL,X1,Y1,Z1,Y2,Z2,Y3,Z3
$$ EXTRACCIÓN DE LAS COORDENADAS X,Y,Z DEL PUNTO 1
X1=OBTAIN/FA(PNT001),3
Y1=OBTAIN/FA(PNT001),4
Z1=OBTAIN/FA(PNT001),5
$$ EXTRACCIÓN DE LAS COORDENADAS Y,Z DEL PUNTO 2
Y2=OBTAIN/FA(PNT002),4
Z2=OBTAIN/FA(PNT002),5
$$ EXTRACCIÓN DE LAS COORDENADAS Y,Z DEL PUNTO 3
Y3=OBTAIN/FA(PNT003),4
Z3=OBTAIN/FA(PNT003),5
TEXT/OPER,'Antes de continuar, lleva la sonda manualmente a una posición segura'
$$ PEDIR AL USUARIO LA SEPARACIÓN ENTRE LINEAS DE ESCANEO
DECL/LOCAL,REAL,SEP
SEP=PROMPT/'Introduce la separación entre líneas de escaneo en mm: ',100,0
$$ PEDIR AL USUARIO EL VALOR DE LA DISTANCIA DE SEGURIDAD
DECL/LOCAL,REAL,SEG
SEG=PROMPT/'Introduce el valor de la distancia de seguridad en mm. Recomendación: 30mm ',100,10
DECL/LOCAL,REAL,X7,X4,Z4,Z5,Z6,Z7,Z8,Z9
X7=OBTAIN/FA(PNT007),3
X4=OBTAIN/FA(PNT004),3
Z4=OBTAIN/FA(PNT004),5
Z5=OBTAIN/FA(PNT005),5
Z6=OBTAIN/FA(PNT006),5
Z7=OBTAIN/FA(PNT007),5
Z8=OBTAIN/FA(PNT008),5
Z9=OBTAIN/FA(PNT009),5
```

\$\$ DEFINICIÓN DE LAS COORDENADAS DE ITERACIÓN

DECL/LOCAL,REAL,XI,YI1,ZI1,YI2,ZI2,YI3,ZI3

\$\$ PREPARACION DE LAS COORDENADAS DE PUNTOS DE ITERACIÓN PARA EL PRIMER BARRIDO

\$\$ EN EL PRIMER BARRIDO, LOS PUNTOS SON EL 1, 2 Y 3

XI=ASSIGN/X1

YI1=ASSIGN/Y1

ZI1=ASSIGN/Z1

YI2=ASSIGN/Y2

ZI2=ASSIGN/Z2

YI3=ASSIGN/Y3

ZI3=ASSIGN/Z3

\$\$ DEFINICION DE LA VARIABLE DE ITERACIÓN DE CURVA DE BARRIDO

DECL/LOCAL,INTGR,CURI

CURI=ASSIGN/1

\$\$ CAMBIO A MODO AUTO

MODE/AUTO,PROG,MAN

\$\$ DEFINICIÓN DE PARAMETROS DE ESCANEO

SCNMOD/ON

SCNSET/STOP,SPHERE,5

SCNPLN/VEC,1,0,0

FEDRAT/SCNVEL,PCENT,0.1

\$\$ LLEVAR LA SONDA AL COMIENZO DE LA LINEA DE ESCANEO

GOTO/CART,XI,YI1,ZI1+SEG

\$

\$\$ BUCLE PARA BARRIDO

\$

(REPETIR)

IF/(XI.LE.X7)

\$\$ SI XI<=X7

\$\$ ESCAENO EN LOS PUNTOS DE ITERACION

\$\$<MULTI_INSPECT name = "Group - CUR001">

F(CURI)=FEAT/GCURVE,CART,XI,YI1,ZI1,0,0,1

```
MEAS/GCURVE,F(CURI),2
PTMEAS/CART,XI,YI1,ZI1,0,0,1
PTMEAS/CART,XI,YI2,ZI2,0,0,1
PTMEAS/CART,XI,YI3,ZI3,0,0,1
ENDMES
$$<\MULTI_INSPECT = Group - CUR00I>
$$ SUBIR LA SONDA EN EL PUNTO FINAL DE ESCANEO EN Z 30 mm (SEG)
GOTO/CART,XI,YI3,ZI3+SEG
$$SE ACTUALIZA LA VARIABLE XI
XI=ASSIGN/XI+SEP
$$SE ACTUALIZA LA VARIABLE NOMBRE DE CURVA DE BARRIDO
CURI=ASSIGN/CURI+1
$$ LA VARIABLE YI NO CAMBIA
$$ SE ACTUALIZA LA VARIABLE Z EN FUNCIÓN DE EN QUÉ TRAMO SE ENCUENTRAN LOS PUN-
TOS DE ITERACIÓN
IF/(XI.LE.X4)
ZI1=ASSIGN/((XI-X1)*(Z4-Z1))/(X4-X1)+Z1
ZI2=ASSIGN/((XI-X1)*(Z5-Z2))/(X4-X1)+Z2
ZI3=ASSIGN/((XI-X1)*(Z6-Z3))/(X4-X1)+Z3
ENDIF
IF/(XI.GT.X4)
ZI1=ASSIGN/((X7-XI)*(Z4-Z7))/(X7-X4)+Z7
ZI2=ASSIGN/((X7-XI)*(Z5-Z8))/(X7-X4)+Z8
ZI3=ASSIGN/((X7-XI)*(Z6-Z9))/(X7-X4)+Z9
ENDIF
$$ LLEVAR LA SONDA AL COMIENZO DE LA SIGUIENTE LINEA DE ESCANEO
$$ SI EL SIGUIENTE PUNTO EN X SUPERA A X7, VA A X7
IF/(XI.GE.X7)
GOTO/CART,X7,YI1,ZI1+SEG
ELSE
GOTO/CART,XI,YI1,ZI1+SEG
ENDIF
```

JUMPTO/(REPETIR)

\$\$ LA SIGUIENTE PARTE HASTA EL ENDIF ES PARA LA ULTIMA LINEA DE BARRIDO

\$\$ SI XI>X7 LOS PUNTOS DE LA ITERACIÓN FINAL SON LOS 7, 8 Y 9

ELSE

\$\$ LOS PUNTOS DE LA ITERACION FINALES SON 7, 8 Y 9

XI=ASSIGN/X7

ZI1=ASSIGN/Z7

ZI2=ASSIGN/Z8

ZI3=ASSIGN/Z9

\$\$ ESCANEADO DE LOS PUNTOS DE ITERACIÓN FINALES

\$\$<MULTI_INSPECT name = "Group - CUR00I">

F(CURI)=FEAT/GCURVE,CART,XI,YI1,ZI1,0,0,1

MEAS/GCURVE,F(CURI),2

PTMEAS/CART,XI,YI1,ZI1,0,0,1

PTMEAS/CART,XI,YI2,ZI2,0,0,1

PTMEAS/CART,XI,YI3,ZI3,0,0,1

ENDMES

\$\$<\MULTI_INSPECT = Group - CUR00I>

\$\$ SUBIR LA SONDA EN Z 30 mm (SEG)

GOTO/CART,XI,YI3,ZI3+SEG

ENDIF

\$\$ SUBIR LA SONDA EN Z 90 mm (3*SEG)

GOTO/CART,XI,YI3,ZI3+3*SEG

PAUSE

ENDFIL

C.2. Código para el escaneo del anillo patrón

```
DMISMN/'Default metric project',05.2
FILNAM/'Default metric project',05.2
DV(0)=DMESWV/'86,1,29166'
UNITS/MM,ANGDEC
DECPL/ALL,DEFAULT
V(0)=VFORM/ALL,PLOT
DISPLY/TERM,V(0),STOR,DMIS,V(0)
SNSSET/APPRCH,5
SNSSET/RETRCT,5
SNSSET/SEARCH,5
SNSSET/CLRSRF,15
SNSSET/DEPTH,0
DECL/GLOBAL,INTGR,InitialFlyRadius
InitialFlyRadius=ASSIGN/2
FLY/InitialFlyRadius
D(MODEL_LOC_TRANS)=TRANS/XORIG,404.7548,YORIG,297.341,ZORIG,-538.4434
D(MODEL_LOC_ROTZ)=ROTATE/ZAXIS,-90
RECALL/SA(A90.0_B0.0_TP20_3X30)
SNSLCT/SA(A90.0_B0.0_TP20_3X30)
MODE/MAN
$$ CREACIÓN DEL CERO PIEZA PALPANDO UNA LINEA Y 10 PUNTOS DEL CILINDRO INTERIOR
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT001">
$$<MEAS_POINT name = "PNT001: -0.82,-0.00,-48.12, -0.00,-1.00,-0.00 ">
F(PNT001)=FEAT/POINT,CART,-0.8179,0,-48.1179,0,-1,0
MEAS/POINT,F(PNT001),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT001>
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT002">
$$<MEAS_POINT name = "PNT002: 0.06,-0.00,45.08, -0.00,-1.00,-0.00 ">
F(PNT002)=FEAT/POINT,CART,0.0591,0,45.0809,0,-1,0
```

```
MEAS/POINT,F(PNT002),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT002>
$$<CONSTRUCT_LINE name = "LINE001 = Construction Wizard: PNT001 - PNT002">
F(LINE001)=FEAT/LINE,UNBND,CART,-0.3794,0,-1.5185,0.009409,0,0.999956,0,-1,0
CONST/LINE,F(LINE001),BF,FA(PNT001),FA(PNT002)
$$<\CONSTRUCT_LINE >
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - CYL">
$$<MEAS_CYLNR name = "CYL: -0.00, -0.00, 0.00, -0.00, -1.00, 0.00, 70.00, -32.00">
F(CYL)=FEAT/CYLNR,INNER,CART,0,0,0,0,-1,0,70,-32
MEAS/CYLNR,F(CYL),10
PTMEAS/CART,0,2,35,0,0,-1
PTMEAS/CART,-30.3109,2,-17.5,0.866025,0,0.5
PTMEAS/CART,30.3109,2,-17.5,-0.866025,0,0.5
PTMEAS/CART,0,30,35,0,0,-1
PTMEAS/CART,-30.3109,30,-17.5,0.866025,0,0.5
PTMEAS/CART,30.3109,30,-17.5,-0.866025,0,0.5
ENDMES
$$<\MEAS_CYLNR >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - CYL>
DATDEF/FA(CYL),DAT(A)
DATDEF/FA(LINE001),DAT(B)
D(1)=DATSET/DAT(A),-XDIR,YORIG,ZORIG,DAT(B),ZDIR,XORIG
TEXT/OPER,'Aleja la sonda de la pieza'
MODE/AUTO,PROG,MAN
$$ PALPADO DE PUNTOS DE UN PLANO
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT003; PNT004; PNT005; PNT006; PNT007; PNT008; PNT009;
PNT010; PNT011; PNT012">
$$<MEAS_POINT name = "PNT003: -0.00,17.35,40.40, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT003)=FEAT/POINT,CART,0,17.352,40.3991,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT003),1
ENDMES
```

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT004: -0.00,2.79,43.56, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT004)=FEAT/POINT,CART,0,2.7909,43.5632,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT004),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT005: -0.00,-10.81,45.59, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT005)=FEAT/POINT,CART,0,-10.8147,45.5895,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT005),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT006: -0.00,-22.21,34.75, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT006)=FEAT/POINT,CART,0,-22.2081,34.7539,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT006),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT007: -0.00,-30.95,34.32, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT007)=FEAT/POINT,CART,0,-30.9462,34.3181,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT007),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT008: -0.00,-36.87,16.84, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT008)=FEAT/POINT,CART,0,-36.8723,16.8411,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT008),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT009: -0.00,-48.26,8.81, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT009)=FEAT/POINT,CART,0,-48.2572,8.8075,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT009),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT010: -0.00,-42.24,0.40, -1.00,0.00,-0.00 ">

```
F(PNT010)=FEAT/POINT,CART,0,-42.2447,0.4048,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT010),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT011: -0.00,-45.79,-13.51, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT011)=FEAT/POINT,CART,0,-45.7889,-13.5059,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT011),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT012: -0.00,-40.07,-17.39, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT012)=FEAT/POINT,CART,0,-40.0698,-17.3856,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT012),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT013: -0.00,-38.19,-30.65, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT013)=FEAT/POINT,CART,0,-38.1885,-30.6533,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT013),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT014: -0.00,-27.52,-33.70, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT014)=FEAT/POINT,CART,0,-27.518,-33.7033,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT014),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT015: -0.00,-24.56,-43.68, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT015)=FEAT/POINT,CART,0,-24.5618,-43.6835,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT015),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT016: -0.00,-13.46,-41.34, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT016)=FEAT/POINT,CART,0,-13.464,-41.3352,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT016),1
```


ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT017: -0.00,1.86,-49.72, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT017)=FEAT/POINT,CART,0,1.8568,-49.7243,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT017),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT018: -0.00,11.07,-38.89, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT018)=FEAT/POINT,CART,0,11.0672,-38.8924,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT018),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT019: -0.00,20.20,-42.12, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT019)=FEAT/POINT,CART,0,20.1973,-42.1226,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT019),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT020: -0.00,33.73,-33.86, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT020)=FEAT/POINT,CART,0,33.7314,-33.8598,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT020),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT021: -0.00,40.31,-18.51, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT021)=FEAT/POINT,CART,0,40.3096,-18.5136,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT021),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT022: -0.00,48.85,5.28, -1.00,0.00,-0.00 ">

F(PNT022)=FEAT/POINT,CART,0,48.8492,5.2754,-1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT022),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

```
$$<MEAS_POINT name = "PNT023: -0.00,39.99,15.00, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT023)=FEAT/POINT,CART,0,39.9889,15.0032,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT023),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT024: -0.00,36.19,32.73, -1.00,0.00,-0.00 ">
F(PNT024)=FEAT/POINT,CART,0,36.1933,32.7297,-1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT024),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT003; PNT004; PNT005; PNT006; PNT007; PNT008; PNT009;
PNT010; PNT011; PNT012>
$$<CONSTRUCT_PLANE name = "PLN001 = Construction Wizard: PNT003 - PNT004- PNT005- PNT006-
PNT007">
F(PLN001)=FEAT/PLANE,CART,0,-5.8453,-3.8952,-1,0,0
CONST/PLANE,F(PLN001),BF,FA(PNT003),FA(PNT004),FA(PNT005),FA(PNT006),FA(PNT007),FA(PNT00
8),FA(PNT009),FA(PNT010),FA(PNT011),FA(PNT012),FA(PNT013),FA(PNT014),FA(PNT015),FA(PNT016)
,FA(PNT017),FA(PNT018),FA(PNT019),FA(PNT020),FA(PNT021),FA(PNT022),FA(PNT023),FA(PNT024)
$$<\CONSTRUCT_PLANE >
T(PLANITUD)=TOL/FLAT,0.1
T(PLANITUD)=TOL/FLAT,0.1
OUTPUT/FA(PLN001),TA(PLANITUD)
GOTO/CART,-60,36.1933,32.7297
GOTO/CART,-60,0,0
$$ INSPECCION DEL CILINDRO INTERIOR
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - ANILLO_PATRON">
$$<MEAS_CYLNDR name = "ANILLO_PATRON: 32.00, 0.00, 0.00, 1.00, 0.00, 0.00, 70.00, -32.00">
MODE/PROG,MAN
F(ANILLO_PATRON)=FEAT/CYLNDR,INNER,CART,32,0,0,1,0,0,70,-32
MEAS/CYLNDR,F(ANILLO_PATRON),60
PTMEAS/CART,16,35,0,0,-1,0
PTMEAS/CART,16,33.287,10.8156,0,-0.951057,-0.309017
PTMEAS/CART,16,28.3156,20.5725,0,-0.809017,-0.587785
PTMEAS/CART,16,20.5725,28.3156,0,-0.587785,-0.809017
```

PTMEAS/CART,16,10.8156,33.287,0,-0.309017,-0.951057
PTMEAS/CART,16,0,35,0,0,-1
PTMEAS/CART,16,-10.8156,33.287,0,0.309017,-0.951057
PTMEAS/CART,16,-20.5725,28.3156,0,0.587785,-0.809017
PTMEAS/CART,16,-28.3156,20.5725,0,0.809017,-0.587785
PTMEAS/CART,16,-33.287,10.8156,0,0.951057,-0.309017
PTMEAS/CART,16,-35,0,0,1,0
PTMEAS/CART,16,-33.287,-10.8156,0,0.951057,0.309017
PTMEAS/CART,16,-28.3156,-20.5724,0,0.809017,0.587785
PTMEAS/CART,16,-20.5725,-28.3156,0,0.587785,0.809017
PTMEAS/CART,16,-10.8156,-33.2869,0,0.309017,0.951057
PTMEAS/CART,16,0,-35,0,0,1
PTMEAS/CART,16,10.8156,-33.2869,0,-0.309017,0.951057
PTMEAS/CART,16,20.5725,-28.3156,0,-0.587785,0.809017
PTMEAS/CART,16,28.3156,-20.5724,0,-0.809017,0.587785
PTMEAS/CART,16,33.287,-10.8156,0,-0.951057,0.309017
PTMEAS/CART,10.5,35,0,0,-1,0
PTMEAS/CART,10.5,33.287,10.8156,0,-0.951057,-0.309017
PTMEAS/CART,10.5,28.3156,20.5725,0,-0.809017,-0.587785
PTMEAS/CART,10.5,20.5725,28.3156,0,-0.587785,-0.809017
PTMEAS/CART,10.5,10.8156,33.287,0,-0.309017,-0.951057
PTMEAS/CART,10.5,0,35,0,0,-1
PTMEAS/CART,10.5,-10.8156,33.287,0,0.309017,-0.951057
PTMEAS/CART,10.5,-20.5725,28.3156,0,0.587785,-0.809017
PTMEAS/CART,10.5,-28.3156,20.5725,0,0.809017,-0.587785
PTMEAS/CART,10.5,-33.287,10.8156,0,0.951057,-0.309017
PTMEAS/CART,10.5,-35,0,0,1,0
PTMEAS/CART,10.5,-33.287,-10.8156,0,0.951057,0.309017
PTMEAS/CART,10.5,-28.3156,-20.5724,0,0.809017,0.587785
PTMEAS/CART,10.5,-20.5725,-28.3156,0,0.587785,0.809017
PTMEAS/CART,10.5,-10.8156,-33.2869,0,0.309017,0.951057
PTMEAS/CART,10.5,0,-35,0,0,1

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

```
PTMEAS/CART,10.5,10.8156,-33.2869,0,-0.309017,0.951057
PTMEAS/CART,10.5,20.5725,-28.3156,0,-0.587785,0.809017
PTMEAS/CART,10.5,28.3156,-20.5724,0,-0.809017,0.587785
PTMEAS/CART,10.5,33.287,-10.8156,0,-0.951057,0.309017
PTMEAS/CART,5,35,0,0,-1,0
PTMEAS/CART,5,33.287,10.8156,0,-0.951057,-0.309017
PTMEAS/CART,5,28.3156,20.5725,0,-0.809017,-0.587785
PTMEAS/CART,5,20.5725,28.3156,0,-0.587785,-0.809017
PTMEAS/CART,5,10.8156,33.287,0,-0.309017,-0.951057
PTMEAS/CART,5,0,35,0,0,-1
PTMEAS/CART,5,-10.8156,33.287,0,0.309017,-0.951057
PTMEAS/CART,5,-20.5725,28.3156,0,0.587785,-0.809017
PTMEAS/CART,5,-28.3156,20.5725,0,0.809017,-0.587785
PTMEAS/CART,5,-33.287,10.8156,0,0.951057,-0.309017
PTMEAS/CART,5,-35,0,0,1,0
PTMEAS/CART,5,-33.287,-10.8156,0,0.951057,0.309017
PTMEAS/CART,5,-28.3156,-20.5724,0,0.809017,0.587785
PTMEAS/CART,5,-20.5725,-28.3156,0,0.587785,0.809017
PTMEAS/CART,5,-10.8156,-33.2869,0,0.309017,0.951057
PTMEAS/CART,5,0,-35,0,0,1
PTMEAS/CART,5,10.8156,-33.2869,0,-0.309017,0.951057
PTMEAS/CART,5,20.5725,-28.3156,0,-0.587785,0.809017
PTMEAS/CART,5,28.3156,-20.5724,0,-0.809017,0.587785
PTMEAS/CART,5,33.287,-10.8156,0,-0.951057,0.309017
ENDMES
$$<\MEAS_CYLNDR >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - ANILLO_PATRON>
T(CILINDRICIDAD)=TOL/CYLCTY,0.1
T(CILINDRICIDAD)=TOL/CYLCTY,0.1
OUTPUT/FA(ANILLO_PATRON),TA(CILINDRICIDAD)
GOTO/CART,-60,0,0
GOTO/CART,-109.9829,0.0157,-0.0003
```

```
GOTO/CART,-109.9772,0.0189,300
$$ CAMBIO DE LA ORIENTACIÓN DE LA SONDA
RECALL/SA(A90.0_B180.0_TP20_3X30)
SNSLCT/SA(A90.0_B180.0_TP20_3X30)
GOTO/CART,120,0,300.128
GOTO/CART,119.9628,2.0381,0
$$ MEDIDA DE LA OTRA CARA
$$<MULTI_INSPECT name = "Group - PNT025; PNT026; PNT027; PNT028; PNT029; PNT030; PNT031;
PNT032; PNT033; PNT034">
$$<MEAS_POINT name = "PNT025: 32.00,4.45,47.01, 1.00,-0.00,-0.00 ">
MODE/AUTO,PROG,MAN
F(PNT025)=FEAT/POINT,CART,32,4.4526,47.0058,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT025),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT026: 32.00,21.47,34.81, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT026)=FEAT/POINT,CART,32,21.4744,34.8055,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT026),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT027: 32.00,38.75,31.93, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT027)=FEAT/POINT,CART,32,38.75,31.9338,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT027),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT028: 32.00,38.09,17.87, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT028)=FEAT/POINT,CART,32,38.0902,17.8672,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT028),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT029: 32.00,48.37,5.11, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT029)=FEAT/POINT,CART,32,48.3712,5.1055,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT029),1
```

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT030: 32.00,42.78,-4.54, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT030)=FEAT/POINT,CART,32,42.7766,-4.5366,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT030),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT031: 32.00,45.66,-15.11, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT031)=FEAT/POINT,CART,32,45.662,-15.1079,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT031),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT032: 32.00,35.58,-25.20, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT032)=FEAT/POINT,CART,32,35.5763,-25.2048,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT032),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT033: 32.00,35.03,-34.24, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT033)=FEAT/POINT,CART,32,35.0314,-34.2447,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT033),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT034: 32.00,24.91,-43.13, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT034)=FEAT/POINT,CART,32,24.9055,-43.1337,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT034),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT035: 32.00,14.73,-42.16, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT035)=FEAT/POINT,CART,32,14.7342,-42.1638,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT035),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT036: 32.00,2.45,-45.41, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT036)=FEAT/POINT,CART,32,2.4494,-45.4077,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT036),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT037: 32.00,-11.28,-39.04, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT037)=FEAT/POINT,CART,32,-11.2806,-39.0408,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT037),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT038: 32.00,-26.69,-41.53, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT038)=FEAT/POINT,CART,32,-26.6887,-41.5253,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT038),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT039: 32.00,-33.74,-24.25, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT039)=FEAT/POINT,CART,32,-33.7396,-24.2547,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT039),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT040: 32.00,-48.96,-15.48, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT040)=FEAT/POINT,CART,32,-48.958,-15.4778,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT040),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT041: 32.00,-41.03,0.26, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT041)=FEAT/POINT,CART,32,-41.0309,0.2641,1,0,0

MEAS/POINT,F(PNT041),1

ENDMES

\$\$<\MEAS_POINT >

\$\$<MEAS_POINT name = "PNT042: 32.00,-45.32,19.24, 1.00,-0.00,-0.00 ">

F(PNT042)=FEAT/POINT,CART,32,-45.322,19.2384,1,0,0

```
MEAS/POINT,F(PNT042),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT043: 32.00,-29.86,28.68, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT043)=FEAT/POINT,CART,32,-29.8633,28.6825,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT043),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT044: 32.00,-21.69,45.34, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT044)=FEAT/POINT,CART,32,-21.6852,45.3438,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT044),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<MEAS_POINT name = "PNT045: 32.00,-3.46,39.43, 1.00,-0.00,-0.00 ">
F(PNT045)=FEAT/POINT,CART,32,-3.4639,39.4316,1,0,0
MEAS/POINT,F(PNT045),1
ENDMES
$$<\MEAS_POINT >
$$<\MULTI_INSPECT = Group - PNT025; PNT026; PNT027; PNT028; PNT029; PNT030; PNT031;
PNT032; PNT033; PNT034>
GOTO/CART,100,-3.4807,39.4328
$$<CONSTRUCT_PLANE name = "PLN002 = Construction Wizard: PNT025 - PNT026- PNT027- PNT028-
PNT029">
F(PLN002)=FEAT/PLANE,CART,32,4.2972,-2.8771,1,0,0
CONST/PLANE,F(PLN002),BF,FA(PNT025),FA(PNT026),FA(PNT027),FA(PNT028),FA(PNT029),FA(PNT03
0),FA(PNT031),FA(PNT032),FA(PNT033),FA(PNT034),FA(PNT035),FA(PNT036),FA(PNT037),FA(PNT038)
,FA(PNT039),FA(PNT040),FA(PNT041),FA(PNT042),FA(PNT043),FA(PNT044),FA(PNT045)
$$<\CONSTRUCT_PLANE >
T(1)=TOL/FLAT,0.1
T(1)=TOL/FLAT,0.1
OUTPUT/FA(PLN002),TA(1)
$$ TOLERANCIA DE PARALELISMO
DATDEF/FA(PLN001),DAT(C)
T(PARALELISMO)=TOL/PARLEL,0.1,RFS,DAT(C),RFS
```


Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

T(PARALELISMO)=TOL/PARLEL,0.1,RFS,DAT(C),RFS

OUTPUT/FA(PLN002),TA(PARALELISMO)

PAUSE

ENDFIL

ANEXO D. CÓDIGO DE MATLAB PARA LA APLICACIÓN DEL CRITERIO DE RECHAZO DE CHAUVENET EN EL ESPACIO TRIDIMENSIONAL (ORTOEDRO DE CHAUVENET)

```
format long

% Puntos 3D almacenados en un vector 1D
punto1 = [-122.5322598, -71.74456032, 28.07885056, -122.4687481, -71.97695601,
27.64723804, -122.4016189, -71.82116794, 28.14746637, -122.7371237, -
71.54550001, 27.96562632, -122.5370425, -71.7659613, 28.00606408, -
122.5147349, -71.80427948, 27.94008174, -122.623562, -71.61804446,
28.05772119, -122.4974662, -71.83343452, 27.9923428, -122.6371405, -
71.62129855, 28.07387568, -122.5541683, -71.75946942, 27.91699652];

% Se inicializa una matriz vacía de 10x3
puntos = reshape(punto1, [3, 10]);

% Se calcula el punto medio
punto_medio = mean(puntos);

% Se calcula el radio de la esfera mínima que contiene todos los puntos
radio = max(sqrt(sum((puntos - punto_medio).^2, 2)));

% Se muestra el punto medio y el radio
disp(['Punto medio: ', num2str(punto_medio)])
disp(['Radio: ', num2str(radio)])

% Se dibujan los puntos y se etiqueta cada punto con el número de la medida
figure;
scatter3(puntos(:, 1), puntos(:, 2), puntos(:, 3), 'filled');
hold on;
for i = 1:10
    text(puntos(i, 1), puntos(i, 2), puntos(i, 3), ['Medida ', num2str(i)]);
end

% Se dibuja la esfera
[x, y, z] = sphere;
```

```
surf(radio*x + punto_medio(1), radio*y + punto_medio(2), radio*z +
punto_medio(3), 'FaceColor', 'none', 'EdgeColor', 'r');

% Se configura la gráfica
grid on;
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
title(['Gráfica 3D de los puntos y la mínima esfera que los contiene, con
radio ', num2str(radio)]);
hold off;

% Criterio de Chauvenet
desviacion_tipica = std(puntos);
limites_inferiores = punto_medio - 1.96 * desviacion_tipica;
limites_superiores = punto_medio + 1.96 * desviacion_tipica;

% Inicializar matrices para puntos dentro y fuera del ortoedro
puntos_dentro = [];
etiquetas_dentro = [];
puntos_fuera = [];
etiquetas_fuera = [];

% Verificar si cada punto está dentro o fuera del ortoedro de Chauvenet
for i = 1:10
    dentro_ortoedro = all(puntos(i, :) >= limites_inferiores & puntos(i, :) <=
limites_superiores);
    if dentro_ortoedro
        puntos_dentro = [puntos_dentro; puntos(i, :)];
        etiquetas_dentro = [etiquetas_dentro; i];
    else
        puntos_fuera = [puntos_fuera; puntos(i, :)];
        etiquetas_fuera = [etiquetas_fuera; i];
    end
end

% Mostrar medidas que no están dentro del ortoedro
disp('Medidas que no están dentro del ortoedro:');
disp(etiquetas_fuera);

% Calcular el nuevo punto medio con los puntos dentro del ortoedro de
Chauvenet
nuevo_punto_medio = mean(puntos_dentro);

% Mostrar el nuevo punto medio
```

```
disp(['Nuevo punto medio: ', num2str(nuevo_punto_medio)]);

% Dibujar los puntos que están dentro del ortoedro y etiquetarlos
figure;
scatter3(puntos_dentro(:, 1), puntos_dentro(:, 2), puntos_dentro(:, 3),
'filled');
hold on;
for i = 1:size(puntos_dentro, 1)
    text(puntos_dentro(i, 1), puntos_dentro(i, 2), puntos_dentro(i, 3),
['Medida ', num2str(etiquetas_dentro(i))]);
end

% Dibujar el ortoedro centrado en el punto medio original
x_ortoedro = [limites_inferiores(1), limites_superiores(1),
limites_superiores(1), limites_inferiores(1), limites_inferiores(1),
limites_superiores(1), limites_superiores(1), limites_inferiores(1)];
y_ortoedro = [limites_inferiores(2), limites_inferiores(2),
limites_superiores(2), limites_superiores(2), limites_inferiores(2),
limites_superiores(2), limites_superiores(2), limites_inferiores(2)];
z_ortoedro = [limites_inferiores(3), limites_inferiores(3),
limites_inferiores(3), limites_inferiores(3), limites_superiores(3),
limites_superiores(3), limites_superiores(3), limites_superiores(3)];
faces = [1 2 6 5; 2 3 7 6; 3 4 8 7; 4 1 5 8; 1 2 3 4; 5 6 7 8];
patch('Vertices', [x_ortoedro' y_ortoedro' z_ortoedro'], 'Faces', faces,
'FaceColor', 'none', 'EdgeColor', 'g');

% Configurar la gráfica
grid on;
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
title(['Gráfica 3D de los puntos dentro del ortoedro de Chauvenet']);
hold off;

% Calcular la desviación estándar de las mediciones para cada punto dentro del
nuevo ortoedro
desviacion_tipica_nueva = std(puntos_dentro);
valor_absoluto_desviacion_tipica_nueva = norm(desviacion_tipica_nueva);

% Mostrar la desviación estándar y su valor absoluto
disp(['Desviación típica: ', num2str(desviacion_tipica_nueva)]);
disp(['Valor absoluto de la desviación típica: ',
num2str(valor_absoluto_desviacion_tipica_nueva)]);
```

ANEXO E. VERIFICACIÓN DE CONSISTENCIA

DIMENSIONAL DE LA CMM

E.1. Verificación de la consistencia dimensional de la CMM en el anillo patrón

Para estudiar la consistencia dimensional de la CMM en las medidas, se escoge un número significativo de puntos sobre la superficie, en este caso 8. Sobre estos puntos se toman medidas 10 veces con la finalidad de cuantificar el error de medida de la CMM. En total se miden 80 puntos.

El valor de las coordenadas de cada punto para cada medida se encuentran en la Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36, Tabla 37 y Tabla 38

Punto	X1	Y1	Z1
1	48.3363	-2.8195	8.3534
2	41.0303	30.7144	-0.1211
3	-48.3226	30.7113	5.5609
4	-35.8852	-1.3188	33.0690
5	-34.0499	-1.3300	-33.5407
6	19.4379	5.0005	-27.2901
7	27.2922	5.0010	19.4404
8	-27.2930	10.5010	-19.4420

Tabla 29. Coordenadas de los puntos en la medida 1. Anillo Patrón

Punto	X2	Y2	Z2
1	48.3367	-2.8200	8.3535
2	41.0301	30.7134	-0.1212
3	-48.3224	30.7117	5.5608
4	-35.8850	-1.3236	33.0693
5	-34.0501	-1.3287	-33.5405
6	19.4404	5.0004	-27.2908
7	27.2909	5.0009	19.4372
8	-27.2948	10.5011	-19.4397

Tabla 30. Coordenadas de los puntos en la medida 2. Anillo Patrón

Punto	X3	Y3	Z3
1	48.3365	-2.8030	8.3536
2	41.0299	30.7328	-0.1214
3	-48.3224	30.7315	5.5605
4	-35.8849	-1.2999	33.0696
5	-34.0497	-1.3028	-33.5402
6	19.4430	5.0004	-27.2937
7	27.2902	5.0010	19.4364
8	-27.2950	10.5013	-19.4386

Tabla 31. Coordenadas de los puntos en la medida 3. Anillo Patrón

Punto	X4	Y4	Z4
1	48.3365	-2.8580	8.3534
2	41.0301	30.6763	-0.1211
3	-48.3229	30.6873	5.5610
4	-35.8849	-1.3436	33.0691
5	-34.0493	-1.3527	-33.5405
6	19.4408	5.0003	-27.2915
7	27.2899	5.0008	19.4372
8	-27.2942	10.5014	-19.4402

Tabla 32. Coordenadas de los puntos en la medida 4. Anillo Patrón

Punto	X5	Y5	Z5
1	48.3370	-2.7628	8.3537
2	41.0304	30.7664	-0.1213
3	-48.3221	30.7515	5.5607
4	-35.8849	-1.2845	33.0692
5	-34.0501	-1.2815	-33.5403
6	19.4412	5.0006	-27.2935
7	27.2904	5.0010	19.4382
8	-27.2931	10.5011	-19.4417

Tabla 33. Coordenadas de los puntos en la medida 5. Anillo Patrón

Punto	X6	Y6	Z6
1	48.3365	-2.8290	8.3535
2	41.0300	30.7034	-0.1212
3	-48.3225	30.7092	5.5607
4	-35.8848	-1.3234	33.0692
5	-34.0499	-1.3273	-33.5403
6	19.4393	5.0006	-27.2925
7	27.2915	5.0009	19.4404
8	-27.2921	10.5011	-19.4406

Tabla 34. Coordenadas de los puntos en la medida 6. Anillo Patrón

Punto	X7	Y7	Z7
1	48.3363	-2.8516	8.3535
2	41.0300	30.6830	-0.1217
3	-48.3226	30.6956	5.5604
4	-35.8851	-1.3499	33.0699
5	-34.0496	-1.3316	-33.5398
6	19.4389	5.0006	-27.2933
7	27.2905	5.0010	19.4373
8	-27.2926	10.5013	-19.4387

Tabla 35. Coordenadas de los puntos en la medida 7. Anillo Patrón

Punto	X8	Y8	Z8
1	48.3364	-2.8065	8.3536
2	41.0301	30.7251	-0.1207
3	-48.3226	30.7329	5.5613
4	-35.8849	-1.2928	33.0686
5	-34.0495	-1.3248	-33.5410
6	19.4391	5.0006	-27.2909
7	27.2919	5.0009	19.4381
8	-27.2937	10.5013	-19.4391

Tabla 36. Coordenadas de los puntos en la medida 8. Anillo Patrón

Punto	X9	Y9	Z9
1	48.3369	-2.7241	8.3536
2	41.0305	30.8026	-0.1210
3	-48.3221	30.7755	5.5610
4	-35.8850	-1.2528	33.0691
5	-34.0499	-1.2648	-33.5407
6	19.4404	5.0006	-27.2913
7	27.2915	5.0010	19.4398
8	-27.2942	10.5012	-19.4397

Tabla 37. Coordenadas de los puntos en la medida 9. Anillo Patrón

Punto	X10	Y10	Z10
1	48.3371	-2.7647	8.3536
2	41.0305	30.7700	-0.1216
3	-48.3221	30.7445	5.5604
4	-35.8850	-1.2976	33.0699
5	-34.0497	-1.2763	-33.5399
6	19.4411	5.0005	-27.2947
7	27.2893	5.0008	19.4394
8	-27.2916	10.5012	-19.4410

Tabla 38. Coordenadas de los puntos en la medida 10. Anillo Patrón

Las fórmulas para calcular las medias para cada coordenada son:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$$

Donde:

- x_i, y_i, z_i representa el valor de cada coordenada para cada medida
- n es el número total de medidas (en este caso 10)

Las fórmulas para calcular la desviación típica (o desviación estándar) en una muestra para cada coordenada son:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad s_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

La desviación estándar es una medida de dispersión que indica cuánto se alejan los valores de la media. Un valor de desviación estándar más alto indica una mayor variabilidad en los datos.

En la Tabla 39 se recopilan los valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto.

Punto	MEDIA X	DESVIACIÓN TÍPICA X	MEDIA Y	DESVIACIÓN TÍPICA Y	MEDIA Z	DESVIACIÓN TÍPICA Z
1	48.3370	0.00030	-2.8039	0.04209	8.3535	0.00011
2	41.0300	0.00021	30.7290	0.04018	-0.1212	0.00029
3	-48.3220	0.00026	30.7250	0.02714	5.5608	0.00030
4	-35.8850	0.00010	-1.3087	0.02910	33.0690	0.00040
5	-34.0500	0.00024	-1.3120	0.02898	-33.5400	0.00038
6	19.4400	0.00144	5.0005	0.00012	-27.2920	0.00153
7	27.2910	0.00092	5.0009	0.00007	19.4380	0.00146
8	-27.2930	0.00113	10.5010	0.00012	-19.4400	0.00121

Tabla 39. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto en el anillo patrón

E.1.1. Criterio de rechazo de Chauvenet

Para saber si alguna medida puede tener una desviación considerable, se aplica el criterio de rechazo de Chauvenet.

Este criterio es un método estadístico utilizado para determinar si un dato experimental en un conjunto de observaciones es probablemente un valor atípico. Consiste en que dada una muestra (x_1, x_2, \dots, x_n) se rechazan aquellos valores que se encuentren fuera de un intervalo de aceptación dado por: $(\bar{x} - K_n \cdot s, \bar{x} + K_n \cdot s)$, siendo K_n un valor que se obtiene a partir de las tablas de la distribución normal, que verifica la condición $P(|x_i - \bar{x}| > K_n) = \frac{1}{2n}$, que para un número de muestras $n = 10$, el valor es de 1.96. Por lo tanto, $K_n = 1.96$

Para el caso de puntos con 3 coordenadas en el espacio, se calculan 3 intervalos, uno para la x, otro para la y, y otro para la z.

En la **Error! Reference source not found.** se muestran los valores máximos y mínimos de los intervalos de aceptación de Chauvenet para cada coordenada de cada punto

Intervalo de aceptación en X: (mínimo X, máximo X)

Intervalo de aceptación en Y: (mínimo Y, máximo Y)

Intervalo de aceptación en Z: (mínimo Z, máximo Z)

En la Tabla 40 se muestran los valores máximos y mínimos de los intervalos de aceptación de Chauvenet para cada coordenada de cada punto

Punto	MÍNIMO X	MÁXIMO X	MÍNIMO Y	MÁXIMO Y	MÍNIMO Z	MÁXIMO Z
1	48.3360	48.3372	-2.8864	-2.7214	8.3533	8.3538
2	41.0298	41.0306	30.6500	30.8075	-0.1218	-0.1206
3	-48.3229	-48.3219	30.6719	30.7783	5.5602	5.5614
4	-35.8852	-35.8848	-1.3657	-1.2516	33.0685	33.0701
5	-34.0502	-34.0493	-1.3689	-1.2552	-33.5411	-33.5396
6	19.4374	19.4430	5.0003	5.0007	-27.2952	-27.2892
7	27.2890	27.2926	5.0008	5.0011	19.4356	19.4413
8	-27.2957	-27.2912	10.5009	10.5014	-19.4425	-19.4377

Tabla 40. Intervalos de aceptación de Chauvenet para las medidas del anillo patrón en CMM

En la Tabla 41 se indica con “SI”, si se cumple el criterio de Chauvenet para la coordenada x, y y z para cada punto en cada medida, y con “NO” si no cumple para alguna coordenada. Como se puede observar, todas las medidas cumplen el criterio.

Punto	MED. 1	MED. 2	MED. 3	MED. 4	MED. 5	MED. 6	MED. 7	MED. 8	MED. 9	MED. 10
1	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
3	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
7	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Tabla 41. Verificación del criterio de Chauvenet para cada medida de cada punto. Anillo Patrón

Se puede observar que utilizando el criterio de Chauvenet, a pesar de ser el más restrictivo, todas las medidas de todos los puntos se encuentran en el intervalo.

E.1.2. Resumen de las mediciones

Realizando el mismo proceso que se ha realizado con la pieza de carrocería mediante el algoritmo del ortoedro de Chauvenet, se obtiene la información de la Tabla 42.

Número del Punto	Coordenadas del Punto Medio (x, y, z)	Medidas que no están dentro del ortoedro	Desviación Típica (sx, sy, sz)	Valor Absoluto de la Desviación Típica
1	(48.3366, -2.80392, 8.35354)	Ninguna	(0.00029605, 0.042087, 0.0001149)	0.042088
2	(41.0302, 30.7287, -0.121218)	Ninguna	(0.00020837, 0.040182, 0.00029405)	0.040183
3	(-48.3224, 30.7251, 5.56076)	Ninguna	(0.00025628, 0.027141, 0.00030235)	0.027143
4	(-35.885, -1.30868, 33.0693)	Ninguna	(9.8476e-05, 0.029101, 0.00040314)	0.029104
5	(-34.0498, -1.31204, -33.5404)	Ninguna	(0.00024285, 0.028983, 0.00037987)	0.028986
6	(19.4402, 5.00052, -27.2922)	Ninguna	(0.0014401, 0.00011719, 0.0015255)	0.0021011
7	(27.2908, 5.00092, 19.4384)	Ninguna	(0.00091926, 7.3142e-05, 0.0014568)	0.0017241
8	(-27.2934, 10.5012, -19.4401)	Ninguna	(0.0011345, 0.00012408, 0.0012141)	0.0016663

Tabla 42. Valores de las medias y desviaciones típicas de los puntos tras aplicar el algoritmo del ortoedro de Chauvenet

Para evaluar la precisión y repetibilidad de la máquina a partir de las desviaciones típicas obtenidas en las mediciones de los 8 puntos, es importante analizar las desviaciones en las coordenadas x, y, z

Primero, se calcula la media de las desviaciones típicas para cada coordenada para evaluar la precisión general en cada dirección.

- **Media de las Desviaciones Típicas en x:** 0.000449 mm
- **Media de las Desviaciones Típicas en y:** 0.020481 mm
- **Media de las Desviaciones Típicas en z:** 0.000711 mm

La media de la desviación típica en x es bastante baja, lo que indica alta precisión en la dirección x. En la dirección y, la media de la desviación típica es mayor, principalmente debido a los primeros cinco puntos, que tienen desviaciones típicas más grandes. La media de la desviación típica en z es intermedia, pero aun así también bastante baja.

Conclusión: La máquina tiene una buena precisión general en las coordenadas x, z, con un poco más de variabilidad en la coordenada y. Los resultados de la tabla indican que la CMM está proporcionando mediciones precisas y repetibles, sin anomalías evidentes. Esto sugiere que la máquina está bien calibrada y funcionando correctamente.

E.2. Medida de puntos con la CMM en la superficie de la pieza de carrocería

Al igual que para el anillo patrón, se toman 10 medidas con 8 puntos por medida para la superficie de la pieza de carrocería. El valor de las coordenadas de cada uno de los 8 puntos para cada una de las 10 medidas se encuentran en la Tabla 43, Tabla 44, Tabla 45, Tabla 46, Tabla 47, Tabla 48, Tabla 49, Tabla 50, Tabla 51 y Tabla 52.

Punto	X1	Y1	Z1
1	-122.532	-71.745	28.079
2	-123.373	-23.826	34.643
3	-58.842	-4.770	39.795
4	-73.750	-122.991	23.585
5	-64.269	-129.039	22.798
6	-94.227	-126.838	21.203
7	-91.325	-1.071	39.695
8	-91.536	-55.497	33.422

Tabla 43. Coordenadas de los puntos en la medida 1

Punto	X2	Y2	Z2
1	-122.469	-71.977	27.647
2	-123.344	-24.092	34.438
3	-58.828	-5.015	39.696
4	-73.650	-123.169	22.915
5	-64.164	-129.206	22.114
6	-94.124	-127.017	20.515
7	-91.314	-1.338	39.631
8	-91.4855	-55.7342	33.091

Tabla 44. Coordenadas de los puntos en la medida 2

Punto	X3	Y3	Z3
1	-122.402	-71.821	28.147
2	-123.263	-23.907	34.744
3	-58.739	-4.815	39.848
4	-73.594	-123.038	23.589
5	-64.111	-129.081	22.801
6	-94.073	-126.895	21.223
7	-91.223	-1.134	39.781
8	-91.410	-55.559	33.482

Tabla 45. Coordenadas de los puntos en la medida 3

Punto	X4	Y4	Z4
1	-122.737	-71.546	27.966
2	-123.478	-23.626	34.526
3	-58.911	-4.712	39.750
4	-74.064	-122.902	23.533
5	-64.596	-128.971	22.760
6	-94.548	-126.703	21.132
7	-91.385	-0.940	39.618
8	-91.711	-55.367	33.350

Tabla 46. Coordenadas de los puntos en la medida 4

Punto	X5	Y5	Z5
1	-122.537	-71.766	28.006
2	-123.381	-23.851	34.588
3	-58.852	-4.796	39.772
4	-73.752	-123.010	23.506
5	-64.270	-129.058	22.729
6	-94.229	-126.855	21.125
7	-91.335	-1.096	39.658
8	-91.544	-55.521	33.371

Tabla 47. Coordenadas de los puntos en la medida 5

Punto	X6	Y6	Z6
1	-122.515	-71.804	27.940
2	-123.326	-23.905	34.645
3	-58.781	-4.893	39.783
4	-73.761	-123.061	23.253
5	-64.284	-129.111	22.458
6	-94.243	-126.890	20.877
7	-91.262	-1.178	39.736
8	-91.506	-55.587	33.307

Tabla 48. Coordenadas de los puntos en la medida 6

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Punto	X7	Y7	Z7
1	-122.624	-71.618	28.058
2	-123.404	-23.699	34.620
3	-58.850	-4.725	39.786
4	-73.906	-122.928	23.565
5	-64.432	-128.988	22.794
6	-94.388	-126.748	21.188
7	-91.328	-0.984	39.677
8	-91.608	-55.411	33.412

Tabla 49. Coordenadas de los puntos en la medida 7

Punto	X8	Y8	Z8
1	-122.497	-71.833	27.992
2	-123.384	-23.915	34.541
3	-58.874	-4.804	39.756
4	-73.668	-123.040	23.555
5	-64.182	-129.083	22.788
6	-94.141	-126.904	21.161
7	-91.360	-1.131	39.633
8	-91.520	-55.560	33.369

Tabla 50. Coordenadas de los puntos en la medida 8

Punto	X9	Y9	Z9
1	-122.637	-71.621	28.074
2	-123.434	-23.698	34.600
3	-58.889	-4.701	39.785
4	-73.902	-122.920	23.649
5	-64.426	-128.978	22.878
6	-94.382	-126.748	21.259
7	-91.368	-0.969	39.668
8	-91.629	-55.401	33.420

Tabla 51. Coordenadas de los puntos en la medida 9

Punto	X10	Y10	Z10
1	-122.554	-71.759	27.917
2	-123.400	-23.844	34.500
3	-58.875	-4.792	39.730
4	-73.768	-123.004	23.450
5	-64.287	-129.054	22.689
6	-94.244	-126.850	21.039
7	-91.357	-1.091	39.609
8	-91.563	-55.516	33.304

Tabla 52. Coordenadas de los puntos en la medida 10

En la Tabla 53 se recopilan los valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto.

Punto	MEDIA X	DES. TIP. X	MEDIA Y	DES. TIP. Y	MEDIA Z	DES. TIP. Z
1	-122.5504	0.0950	-71.7491	0.1259	27.9826	0.1374
2	-123.3786	0.0591	-23.8362	0.1349	34.5845	0.0869
3	-58.8441	0.0514	-4.8022	0.0937	39.7701	0.0409
4	-73.7815	0.1403	-123.0064	0.0791	23.4600	0.2200
5	-64.3021	0.1458	-129.0569	0.0709	22.6809	0.2288
6	-94.2599	0.1431	-126.8447	0.0924	21.0722	0.2242
7	-91.3257	0.0497	-1.0933	0.1161	39.6706	0.0544
8	-91.5513	0.0835	-55.5152	0.1071	33.3528	0.1069

Tabla 53. Valores de la media y desviación típica para cada coordenada de las mediciones de cada punto

ANEXO F. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE DIFERENCIAS ENTRE CAD Y ESCANEO EN GOM INSPECT

F.1. Paso 1. Conocer el valor de las coordenadas de los puntos a evaluar

Para conocer el valor de las coordenadas de un punto palpado con la CMM, se abre el fichero en creo que contenga la nube de puntos con el sistema de coordenadas de la pieza (ver Figura de anexo 140)

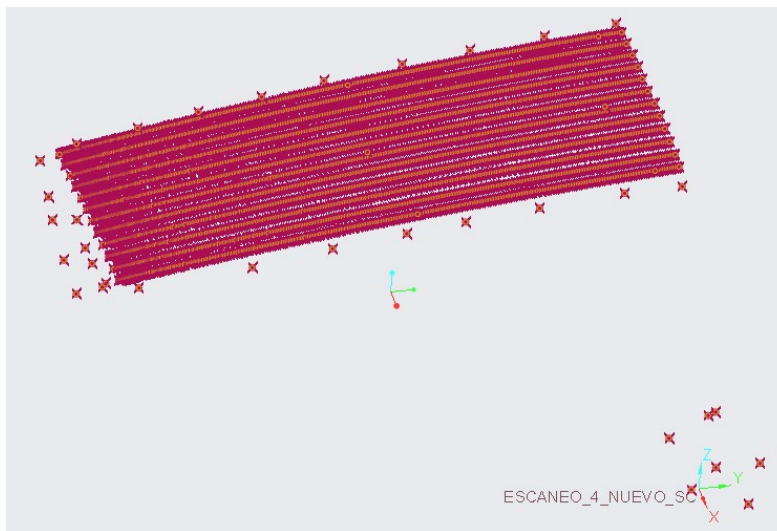


Figura de anexo 140. Nube de puntos con el sistema de coordenadas de la pieza

Clicar en **Analysis** → **Measure**, y seleccionar un punto de la nube. Aparecerá una nota en la que se muestran las coordenadas.

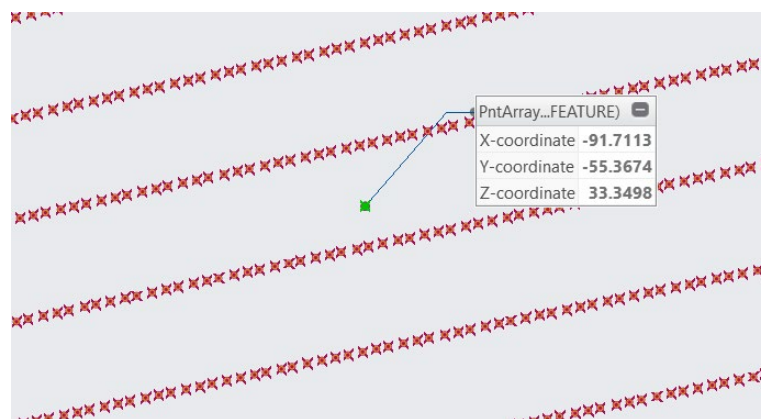


Figura de anexo 141. Visualización de las coordenadas de un punto

F.2. Paso 2. Ubicar los puntos deseados en el fichero “CAD” de GOM-Inspect

En el archivo de GOM-Inspect, se crean los puntos clicando en **Construct** → **Point** (ver Figura de anexo 142)

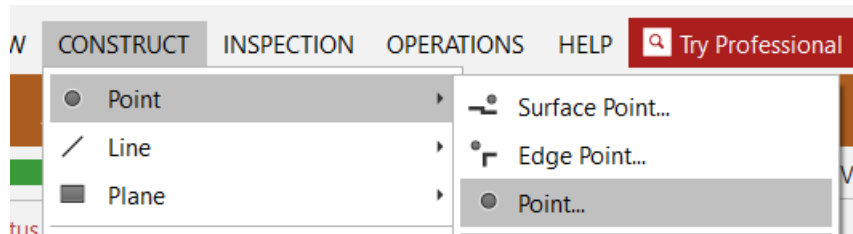


Figura de anexo 142. Construct → Point

Se introducen las coordenadas (ver Figura de anexo 143), se pulsa OK, y luego *Create*

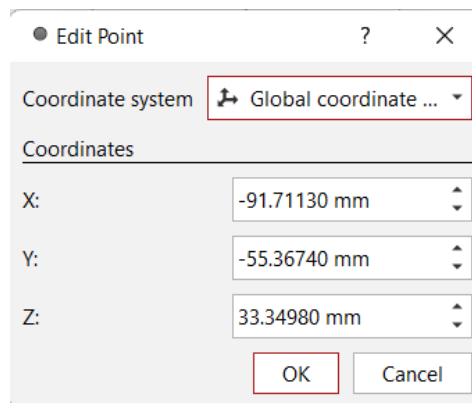


Figura de anexo 143. Ventana para la introducción de coordenadas

Una vez realizado con todos los puntos, aparecerán en el visualizador (ver Figura de anexo 144)

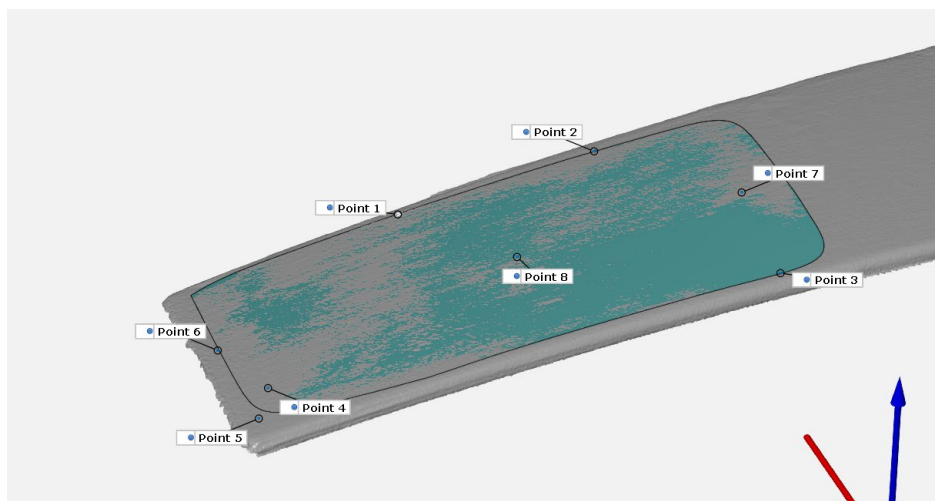


Figura de anexo 144. Puntos creados

F.3. Paso 3. Crear las distancias

Se clic en **Construct** → **Distance** → **Projected Point Distance** (ver Figura de anexo 145)

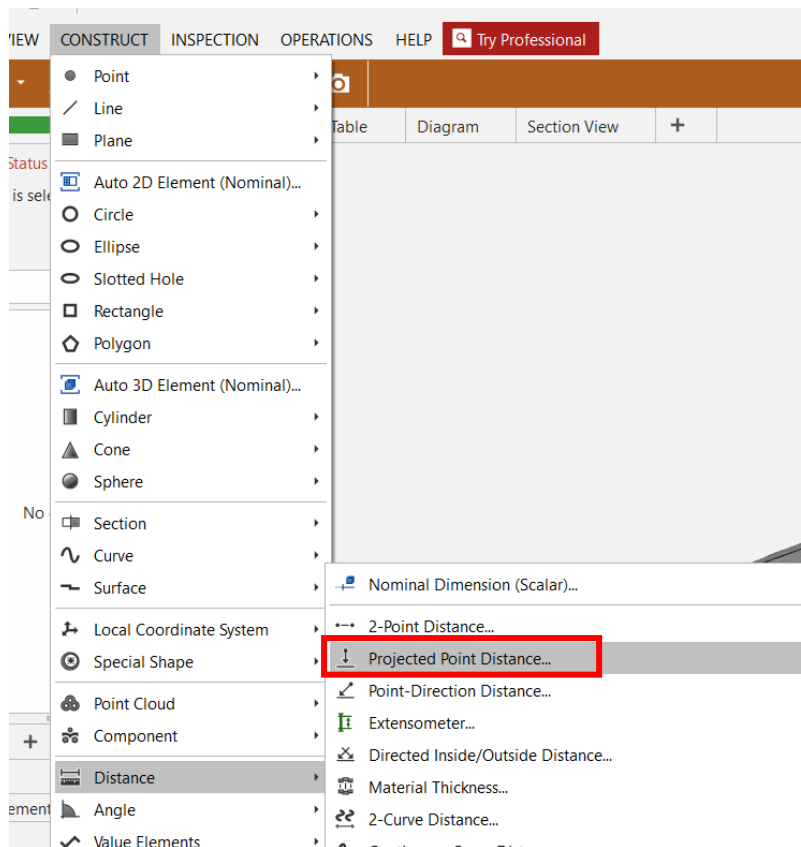


Figura de anexo 145. Construct → Distance → Projected Point Distance

Se selecciona el punto a proyectar, y la pieza a proyectar, que será la malla de escaneo. Y se pulsa *create*. Nótese que se puede visualizar directamente el valor de la distancia en la ventana. (Ver Figura de anexo 146)

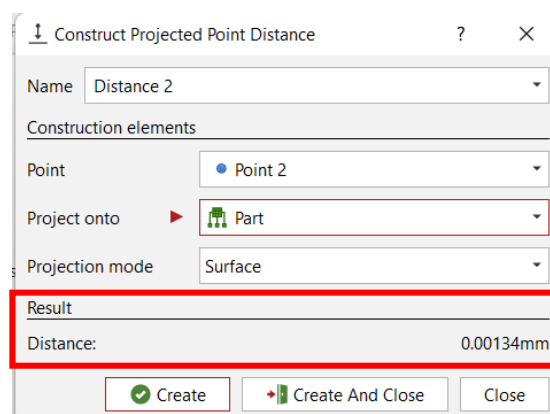


Figura de anexo 146. Selección de punto a proyectar

F.4. Paso 4. Visualización de las distancias en el modelo

Lo primero que hay que hacer es seleccionar en el *explorer* la distancia deseada a mostrar (ver Figura de anexo 147)

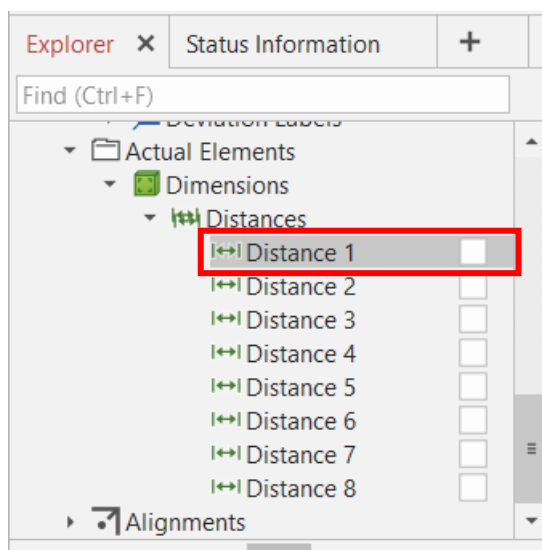


Figura de anexo 147. Selección en el explorer la distancia deseada a mostrar

Tras esto, se va a **Inspection** → **Check Dimensions** → **Distances** → **Distance...** (ver Figura de anexo 148)

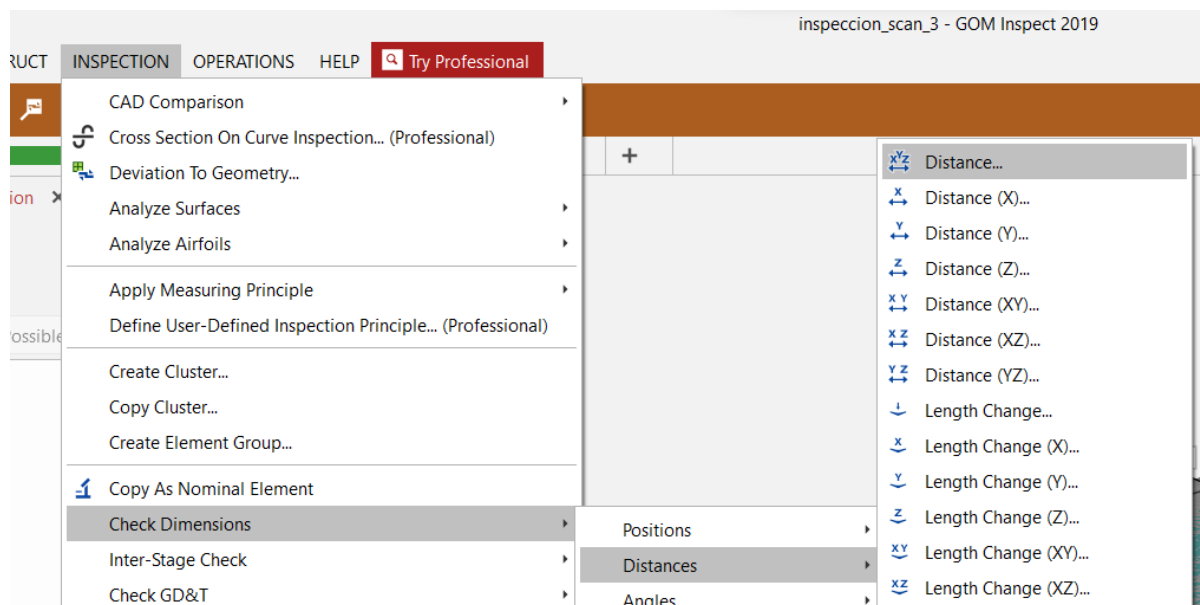


Figura de anexo 148. Inspection → Check Dimensions → Distances → Distance...

Aparecerá una ventana como la de la Figura de anexo 149 y se clicla OK

Estudio del escaneo de superficies 3D mediante sonda de palpado en una máquina de medir por coordenadas y comparación con otras técnicas de escaneo ópticas

Check Distance

Name: Distance 1.L

Against fixed value: 0.00000 mm

Tolerances

Tolerance source: Manually

Tolerance: Upper limit: 0.100000 mm, Lower limit: -0.100000 mm

Use warning limit: 0.000000 mm

OK Cancel

Figura de anexo 149. Ventana para crear la distancia

Tras realizarlo con todas las distancias, se pueden visualizar las inspecciones en el modelo (ver Figura de anexo 150)

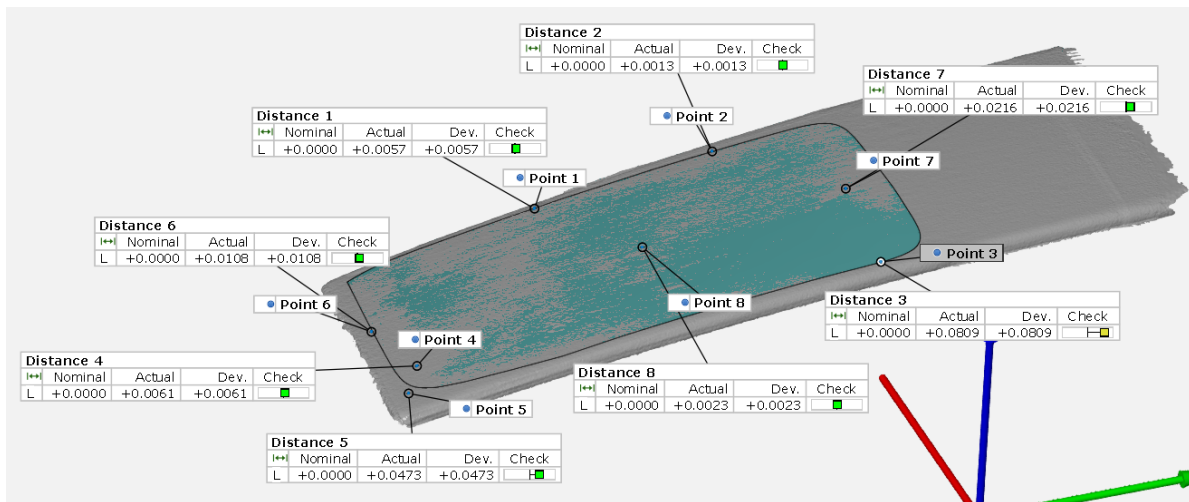


Figura de anexo 150. Visualización de las inspecciones en el modelo