



Universidad Zaragoza



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

# Desarrollo y aplicación de un procedimiento de medición dimensional por tomografía computerizada para dos piezas micro-inyectadas

---



Departamento de  
Ingeniería de  
Diseño y Fabricación  
Universidad Zaragoza

Tomo 2 de 2. Anexos

Realizado por: **Miguel García Sanz**  
Director: **José Antonio Yagüe Fabra**  
Codirector: **Roberto Jiménez Pacheco**  
**Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación**  
Mención: **Sin mención**  
Curso: **2010-2011**

# *Anexos*

# **Anexo I:**

## **Definiciones**

### **1. Tomografía Computerizada**

Tomografía viene del griego "tomos" que significa corte o sección y "grafía" que significa representación gráfica. Por tanto tomografía es la obtención de imágenes axiales planas de cortes o secciones de algún objeto. Computerizar significa someter datos al tratamiento de una computadora.

Se trata de una técnica de visualización por rayos X. La denominación rayos X designa a una radiación descubierta por Wilhelm Röntgen a finales del s. XIX, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de impresionar sobre películas fotográficas. La longitud de onda está entre 10 a 0,001 nanómetros, correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 3.000 PHz.

Las fórmulas matemáticas para reconstruir una imagen tridimensional a partir de múltiples imágenes axiales planas fueron desarrolladas por el físico J. Radon, nacido en Alemania en 1917. Las fórmulas existían pero no así los equipos de rayos X capaces de hacer múltiples "cortes" ni la máquina capaz de hacer los cálculos automáticamente.

Para aplicarlo a la medicina hubo que esperar al desarrollo de la computación y del equipo adecuado que mezclase la capacidad de obtener múltiples imágenes axiales separadas por pequeñas distancias, almacenar electrónicamente los resultados y tratarlos. Todo esto lo hizo posible el británico G. H. Hounsfield en los años 70, dando lugar a las unidades Hounsfield (UH).

### **2. Centelleador**

Un centelleador es un material que *centellea*, o sea, exhibe luminiscencia cuando por él pasa radiación ionizante (electrones, positrones u otras partículas o iones más pesados). Esto se produce porque el material absorbe parte de la energía de la partícula incidente y la re-emite en forma de un corto destello de luz, típicamente en el rango de la luz visible. Si esta re-emisión es rápida (en menos de unos  $10^{-8}$ s), el fenómeno se conoce como fluorescencia. De lo contrario, si la excitación es metaestable y dura de microsegundos a horas, nos referimos al fenómeno como fosforescencia.

### **3. Coeficiente de atenuación lineal**

Dícese de la reducción relativa de la intensidad de radiación por unidad de recorrido cuando un haz de fotones atraviesa un material absorbente. Para un haz de rayos X, policromático, el coeficiente de atenuación lineal "efectivo" se asocia con la energía efectiva del haz y depende de la densidad y número atómico del material. El coeficiente de atenuación lineal tiene la propiedad de ser aditivo

La base fundamental para la aplicación de los rayos X en muchas áreas de la ciencia, es su propiedad de atenuación exponencial. Los rayos X al atravesar un material pueden ser absorbidos o dispersados en su trayectoria, lo cual resulta en una disminución en la intensidad original. X.

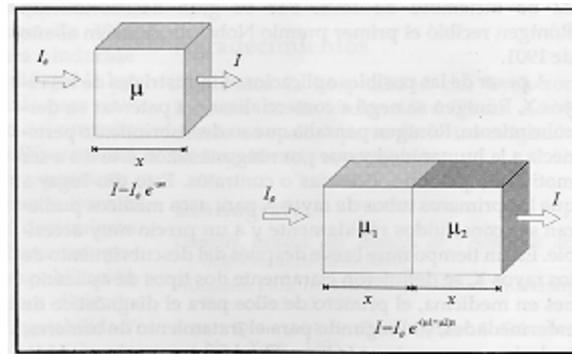


Figura A1. Fenómeno de atenuación

La Figura A1 muestra esquemáticamente un haz de rayos X monoenergético con una intensidad inicial  $I_0$ , que atraviesa un material de espesor  $x$ . La intensidad del haz a la salida se reduce por un factor  $e^{-\mu x}$ , en donde  $\mu$  es el coeficiente de atenuación lineal, el cual es una propiedad intrínseca del material irradiado.

#### 4. Píxel

Término reducido de elemento de imagen (picture element). Es la representación en UH (unidades Hounsfield) o también números TC del valor medio de atenuación de un elemento diferencial dentro del corte de objeto en estudio.

#### 5. Número TC

Valor numérico del píxel como resultado de la reconstrucción de la imagen.

$$\text{númeroTC} = \frac{\mu_{\text{material}} - \mu_{\text{agua}}}{\mu_{\text{agua}}} * 1000 \quad \text{dónde } \mu \text{ es el coeficiente de atenuación lineal.}$$

#### 6. Vóxel

Un vóxel es un elemento de volumen. Es un solo elemento en imagen tridimensional. Como con píxeles, cada vóxel tiene un valor numérico.

#### 7. Región de interés

Zona de la proyección vista en el detector que será reconstruida en la segunda etapa.

#### 8. Emisor puntual

Área del foco de emisión desde la que se emiten los rayos X. Constituye la fuente de radiación.

## 9. Artefacto

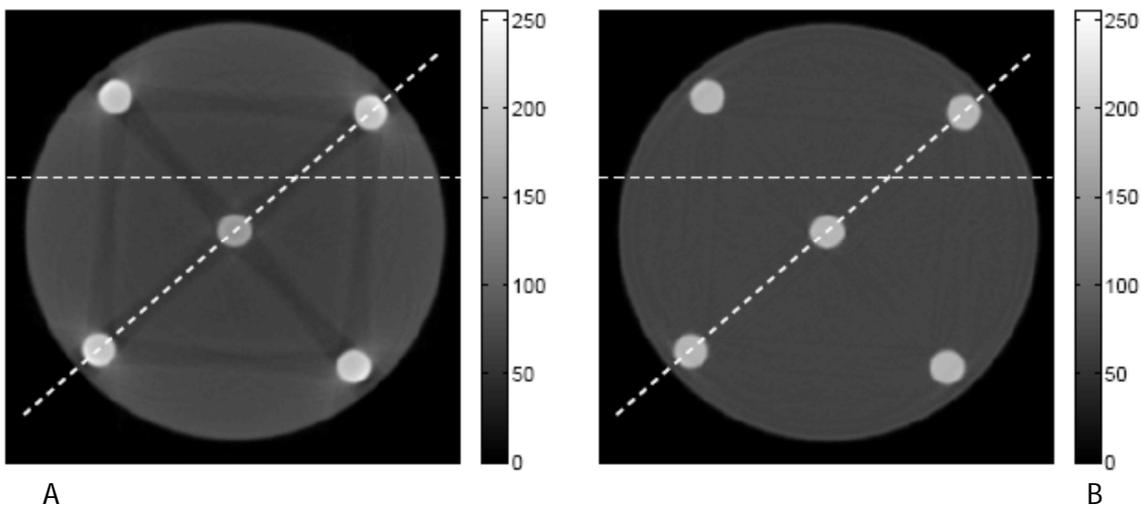
Discrepancias sistemáticas entre los números TC de la imagen reconstruida y los coeficientes de atenuación del objeto. A consecuencia de ello aparecen en la imagen elementos que no están presentes en el objeto explorado. Pueden ser debidos a múltiples causas: fallos del sistema, movimientos del paciente, efectos físicos como el endurecimiento del haz o por el uso de contrastes de alta atenuación o a alta concentración.

## 10. Histograma

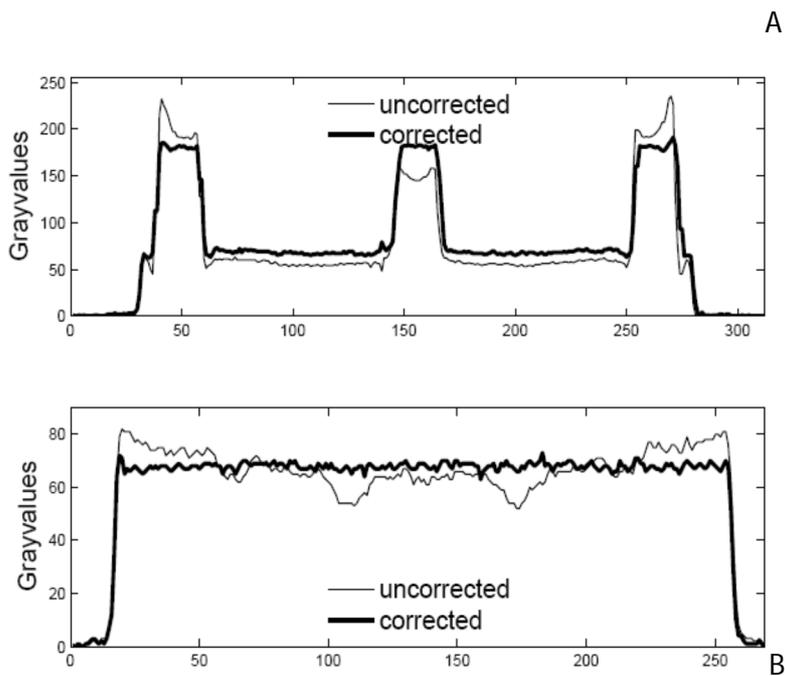
Representación gráfica de la información contenida en la multitud de píxeles que componen la proyección.

## 11. Perfil

Representación gráfica de los distintos valores en escala de grises de una determina sección del conjunto de proyecciones. En la figura A2 se muestran dos ejemplos de dos perfiles tomados en un modelo con errores (A) y uno correcto (B). En la Figura A3 se muestran las representaciones gráficas de estos perfiles, siendo la Figura A3-A correspondiente al perfil diagonal y la Figura A3-B al perfil horizontal.



**Figura A2.** *Perfiles de una pieza con errores (A) y pieza sin errores (B)*



**Figura A3.** Representación gráfica de perfiles diagonal (A), horizontal(B)

## Anexo II:

### Parámetros usados en el tomografiado de las piezas

- Parámetros usados en el tomografiado de las piezas "Toggle"

DESCRIPCIÓN	T1	T2	T3
SCANNER	Locus_SP	Locus_SP	Locus_SP
IEWS	900	900	900
FRAMES	7	7	7
ANG_INC	0,4	0,4	0,4
kVp	80	80	80
Ma	95	95	95
INTEGRATION_TIME	3000	3000	3000
METHOD	360	360	360
OBJECT_POS	84,25	84,25	84,25
BIN_MODE	1	1	1
CDS_GAIN	1	1	1
CAMERA_GAIN	0	0	0
AIR	-1	-1	-1
WATER	-1	-1	-1
BONEHU	-1	-1	-1
SCAN_BRIGHT_FIRST	NO	NO	NO
BRIGHTS	YES	YES	YES
BRIGHT	YES	YES	YES
DARK	YES	YES	YES
USE_PRE_DARK	NO	NO	NO
HIGH_UA	95	95	95
LOW_UA	-1	-1	-1
HIGH_END_OUTLIER	YES	YES	YES
LOW_END_OUTLIER	YES	YES	YES
LONG_TERM_TREND	YES	YES	YES
STRIP_NORMALIZE	NO	NO	NO
HIGH_DYNAMIC_RANGE	NO	NO	NO
SPECIAL	NO	NO	NO
Detector Position (mm)	251,39	251,39	251,39
Object Position (mm)	84,25	84,25	84,25
Detector Spacing (mm)	0,023809523	0,023809523	0,023809523
Technique:	360	360	360
Binning:	1 x 1	1 x 1	1 x 1
Resolution (mm):	0,007979	0,007979	0,007979

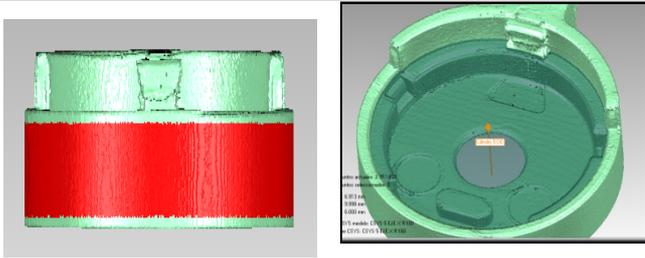
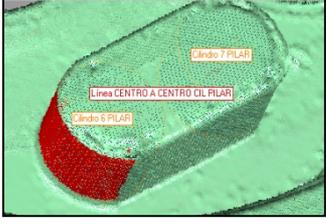
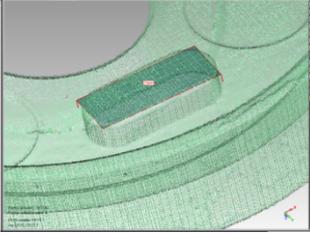
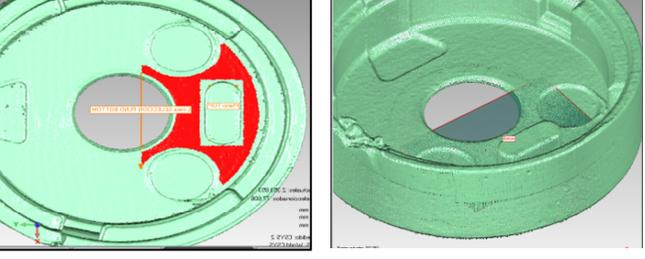
- **Parámetros usados en el tomografiado de las piezas "Dog Bone".**

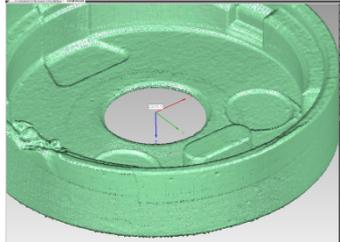
DESCRIPCIÓN	DB1	DB2	DB3_3	DB4	DB5
SCANNER	Locus_SP	Locus_SP	Locus_SP	Locus_SP	Locus_SP
VIEWS	900	900	900	900	900
FRAMES	4	7	8	7	7
ANG_INC	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
kVp	80	80	80	80	80
Ma	100	95	95	95	95
INTEGRATION_TIME	3000	3000	3000	3000	3000
METHOD	360	360	360	360	360
OBJECT_POS	84,25	84,25	84,25	84,25	84,25
BIN_MODE	1	1	1	1	1
CDS_GAIN	1	1	1	1	1
CAMERA_GAIN	0	0	0	0	0
AIR	-1	-1	-1	-1	-1
WATER	-1	-1	-1	-1	-1
BONEHU	-1	-1	-1	-1	-1
SCAN_BRIGHT_FIRST	NO	NO	NO	NO	NO
BRIGHTS	YES	YES	YES	YES	YES
BRIGHT	YES	YES	YES	YES	YES
DARK	YES	YES	YES	YES	YES
USE_PRE_DARK	NO	NO	NO	NO	NO
HIGH_UA	100	95	95	95	95
LOW_UA	-1	-1	-1	-1	-1
HIGH_END_OUTLIER	YES	YES	YES	YES	YES
LOW_END_OUTLIER	YES	YES	YES	YES	YES
LONG_TERM_TREND	YES	YES	YES	YES	YES
STRIP_NORMALIZE	NO	NO	NO	NO	NO
HIGH_DYNAMIC_RANGE	NO	NO	NO	NO	NO
SPECIAL	NO	NO	NO	NO	NO
Detector Position (mm)	251,39	251,39	251,39	251,39	251,39
Object Position (mm)	84,25	84,25	84,25	84,25	84,25
Detector Spacing (mm)	0,023809523	0,023809523	0,023809523	0,023809523	0,023809523
Technique:	360	360	360	360	360
Binning:	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1
Resolution (mm):	0,007979	0,007979	0,007979	0,007979	0,007979

## Anexo III: Protocolos de medición en Geomagic

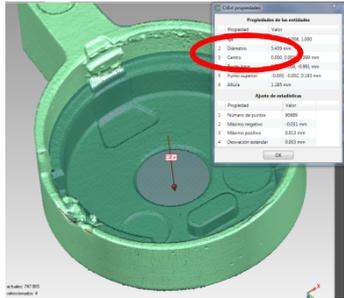
### - Protocolo de medición en "Toggle"

La ejecución del protocolo para el sistema de coordenadas corresponde a la Tabla A1, para los diámetros y la altura del pilar proceder según tablas A2, A3 y A4.

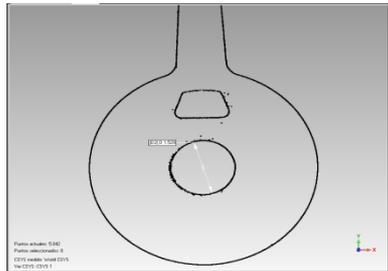
	<p>1.1 Crear cilindro exterior, ajustando la superficie exterior de la pieza con un cilindro.</p>
	<p>1.2 Crear dos cilindros interiores a partir de las paredes de interior del pilar y unir sus centros con una línea.</p>
	<p>1.3 Crear plano superior a partir de la cara superior del pilar</p>
	<p>1.4 Crear plano inferior a partir de la superficie interior de la pieza como se ve en la figura adjunta</p>

	<p>1.5 Crear sistema de coordenadas, como origen la intersección del eje del cilindro exterior y el plano inferior. Dirección del eje X, la línea que une los centros de los cilindros exteriores. Plano XY, el plano inferior.</p>
---	---

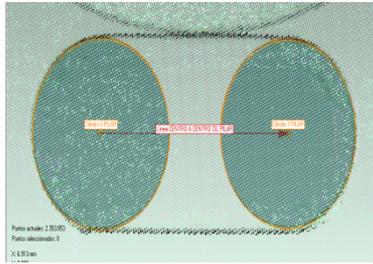
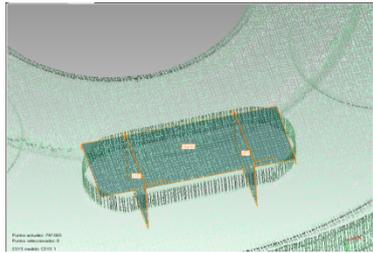
**Tabla A1.** Protocolo de creación de sistema de coordenadas en Togle

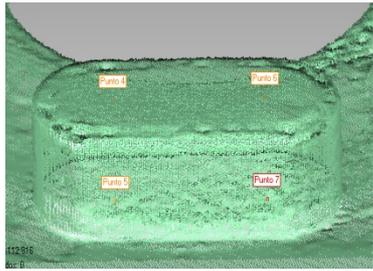
	<p>Tomar como medida del diámetro exterior, la medida del diámetro del cilindro creado en el paso 1.1</p>
---	---

**Tabla A2.** Procedimiento para diámetro exterior (D)

	<p>La manera de proceder es creando una sección de la pieza en el plano XY a una altura en Z comprendida entre <math>Z=-0.025</math> y <math>Z=-0.115</math></p>
---	--

**Tabla A3.** Procedimiento para diámetro interior (d)

	<p>4.1 Crear plano perpendicular al plano superior que contenga la línea que une los centros de los cilindros interiores y que sea paralelo al eje X.</p>
	<p>4.2 Crear plano perpendicular al plano superior y que sea paralelo al eje Y en <math>X=-0.3\text{mm}</math> y <math>X=0.3\text{mm}</math>.</p>

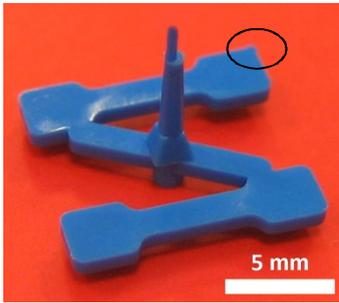
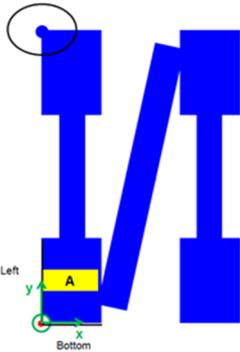
	<p>4.3 Crear puntos mediante la intersección de planos creados en 4.1 y 4.2 con planos superior e inferior del pilar. A continuación medir la distancia.</p>
---	--

**Tabla A4.** Procedimiento para altura del pilar ( $h$ )

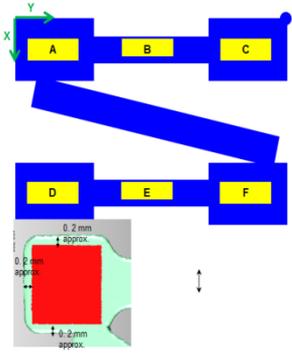
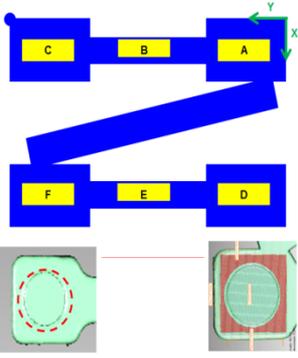
Siguiendo este protocolo se obtienen las medias de diámetro exterior ( $D$ ), diámetro interior ( $d$ ) y medida de la altura del pilar en dos puntos, tomando como altura final del pilar ( $h$ ), la media de estos dos últimos valores.

**- Protocolo de medición en "Dog Bone"**

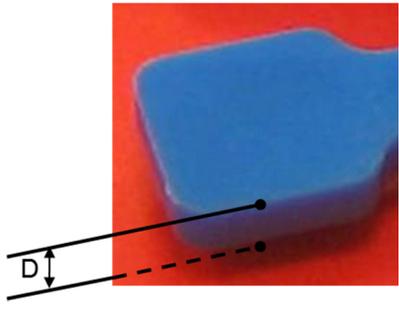
Para la creación del sistema de coordenadas se procede según la Tabla A5, para el espesor tal como indica la Tabla A6, anchura de las zonas izquierda y derecha según Tabla A7, anchura de la diagonal en Tabla A8 y longitud según Tabla A9.

		<p>1.1 Crear tres planos en las zona A: uno en la cara frontal superior, otro en la cara izquierda y un último en la cara de debajo</p> <p>1.2 Crear un punto interseccionando esos tres planos.</p> <p>1.3 Crear una línea interseccionando el plano superior y el de debajo.</p> <p>1.4 Definir el sistema de coordenadas con el punto y la línea creados y el plano superior.</p>
---	---	--

**Tabla A5.** Sistema de coordenadas en Dog Bone

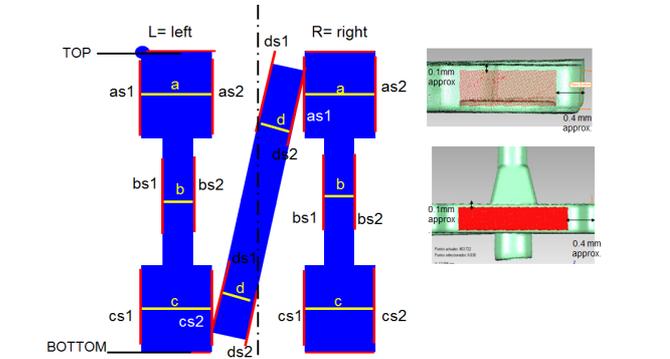
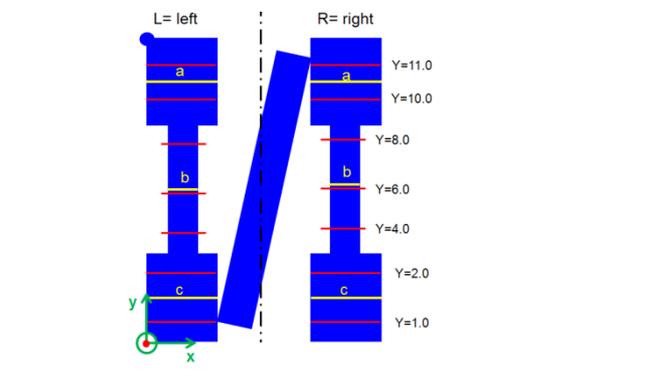
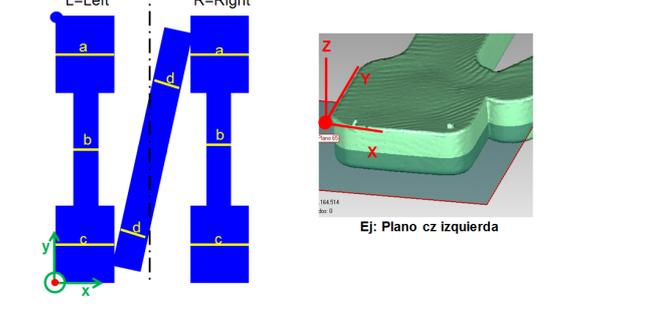
<p>Cara superior</p> 	<p>Cara inferior</p> 	<p>2.1 Crear planos superiores en las zonas A, B, C, D, E, F de las caras superior e inferior. En zonas de la pieza con agujero, evitar seleccionar el agujero para la creación del plano correspondiente, tal como puede verse en la imagen.</p>
--	--	---

	<p>2.2 Crear planos perpendiculares a los planos de la cara superior A, B, C, D, E, F y paralelos al eje Y en <math>X_A=0.5, 2.5, X_B=1.0, 2.0, X_C=0.5, 2.5, X_D=8.5, 10.5, X_E=9.0, 10.0</math> y <math>X_F=8.5, 10.5</math> mm.</p>
	<p>2.3 Crear planos perpendiculares a los planos de la cara superior A, B, C, D, E, F y paralelos al eje X en at <math>Y=1.0, 2.0; 4.0, 6.0, 8.0; 10.0, 11.0</math>mm.</p>
<p>Ej: P1 superior</p>	<p>2.4 Crear puntos en la intersección de planos de la cara <u>superior</u> (A, B, C, D, E, F) con planos X creados en 2.2 y planos Y creados en 2.3.</p>
<p>Ej: P1 inferior</p>	<p>2.5 Crear puntos en la intersección de planos de la cara <u>inferior</u> (A, B, C, D, E, F) con planos X creados en 2.2 y planos Y creados en 2.3.</p>

	<p>2.6 Medir la distancia entre puntos correspondientes creados en 2.4 y 2.5.</p>
---	---

**Tabla A6. Medida de espesor en Dog Bone**

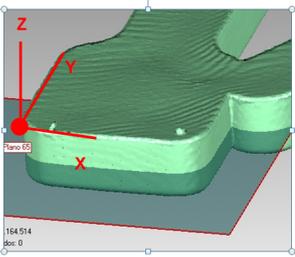
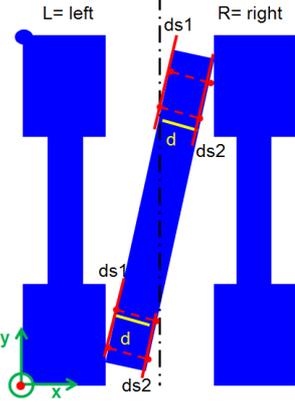
El valor del espesor en cada zona A, B, C, D, E, F de la pieza se obtendrá como media aritmética de las medidas obtenidas para cada par de puntos correspondientes en cada una de las zonas A, B, C, D, E, F.

	<p>3.1 Crear planos en las caras laterales de la pieza así como en la parte de arriba y abajo.</p>
	<p>3.2 Crear planos perpendiculares a los planos exteriores as1, bs1, cs1 as2, bs2 y cs2, y paralelos al eje Z en Y= 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 y 11.0mm.</p>
	<p>3.3 Crear planos perpendiculares a los planos exteriores as1, bs1, cs1 as2, bs2 y cs2, y paralelos al eje Y en Z= -0.5. Resultan planos az, bz, cz en izquierda y az, bz, cz en derecha.</p>

	<p>3.4 Crear puntos interseccionando planos az, bz, cz con planos as1, as2, bs1, bs2, cs1, cs2 y planos creados en Y=1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 y 11.0mm (los creados en unto 3.2) en las zonas izquierda y derecha.</p>
	<p>3.5 Medir distancias entre puntos correspondientes</p>

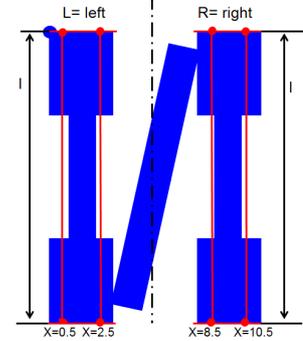
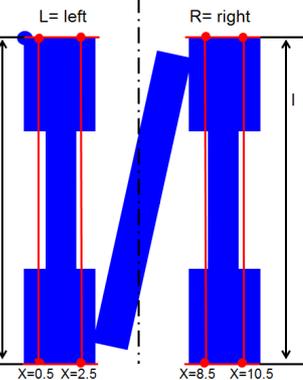
**Tabla A7.** Medida anchura de zonas izquierda y derecha en Dog Bone

	<p>4.1 Crear planos paralelos a al plano XZ en Y=3.0, 4.5, 7.5, 9.0mm. 4.2 Crear planos en la superficie de la diagonal para el lado izquierdo y el lado derecho. 4.3 Crear puntos interseccionando los planos creados en Y=3.0, 4.5mm con planos ds1, ds2 (ver 3.1) y planos creados en 4.2. 4.4 Crear puntos interseccionando los planos creados en Y=7.5, 9.0mm con los creados en los apartados 4.2 y 4.3.</p>
	<p>4.5 En los puntos creados en 4.4 crear planos PY perpendiculares al plano ds2 en la izquierda y al plano ds1 en la derecha</p>

	<p>4.6 Crear plano paralelo a XY en Z= -0.5</p>
	<p>4.7 Crear puntos interseccionando planos ds1, ds2 con el plano XY en Z=-0.5 y planos PY creados en 4.5. 4.8 Medir distancia entre puntos correspondientes creados en 4.7.</p>

**Tabla A8.** Medida ancho de diagonal en Dog Bone

Al igual que para las medias del espesor, después de obtener las distancia para cada par de puntos, habrá que realizar una media para obtener el valor del ancho de cada zona de la pieza.

	<p>5.1 Crear planos perpendiculares a los planos de la parte inferior de la pieza (ver 3.1) y paralelos al eje Z en X= 0.5, 2.5; 8.5, 10.5 mm.</p>
	<p>5.2 Crear puntos interseccionando los planos creados en 5.1 con plano XY en Z=-0.5mm y los planos de arriba y debajo de la pieza. 5.3 Medir distancia entre puntos correspondientes creados en 5.2</p>

### **Tabla A9. Medida de longitud en Dog Bone**

Al igual que en el resto de medidas realizaremos una media entre las distancias obtenidas para obtener el valor de la longitud para ambos lados de la pieza.

#### **- Automatización del protocolo de medición de Dog Bone**

El proceso de automatización de protocolos consiste en la creación de registros (código de programación en formato .log) para la medida de cada una de las 4 regiones de interés en las piezas Dog Bone.

El programa Geomagic posee una característica que nos permite guardar las pulsaciones de teclado y movimientos de ratón que luego usaremos para reproducirlos en cualquier pieza que queramos. Estos registros se deben repetir en unas condiciones iguales a las que fueron creados originalmente.

El proceso sería el siguiente, usando una pieza como referencia:

1. Crear el sistema de coordenadas y los 36 planos correspondientes a los 36 lados de la pieza. No se consiguió reproducir correctamente ningún registro para esta parte del proceso, pues son selecciones de superficies que se hacen manualmente, las cuales pueden variar en cada pieza, por lo tanto las condiciones difieren imposibilitando la automatización.

Guardar esta parte. El orden de los planos de debe ser el mostrado en la Figura A4, para que la ejecución del registro en otra pieza sea produzca de manera correcta.

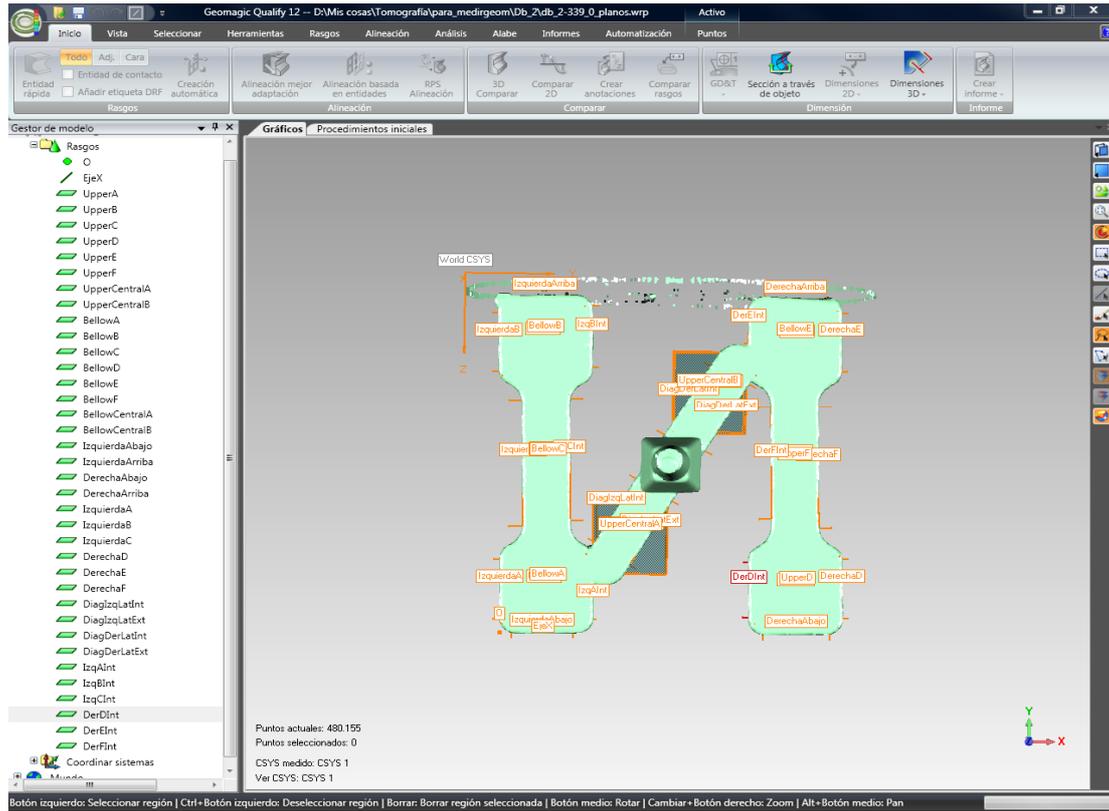


Figura A4. Orden de planos en DogBonne

2. Registro de espesor: reproducir los acciones necesarias para la creación de los puntos con los cuales se medirá el espesor (tal como se explica en protocolo de medición de "Dog Bone" en este anexo), de manera precisa solamente usando los comandos de creación de planos, líneas y puntos, y los de edición de propiedades. Es importante realizar las instrucciones de manera precisa y evitando zooms y movimientos del modelo que provocarían errores al ejecutar el registro en otra pieza. Una vez que se han creado todos los puntos hay que guardar el registro tal como se muestra en la Figura A5.

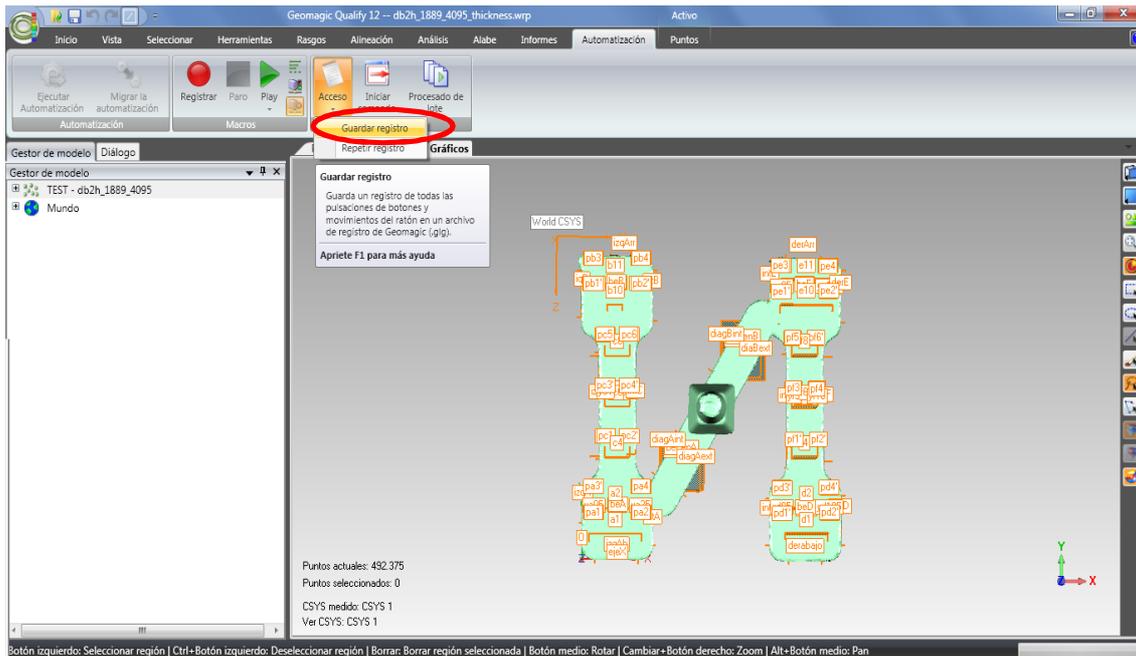


Figura A5. Herramienta de guardar registro en Geomagic

3. Registro para medir la anchura de las dos zonas exteriores de la pieza: reproducir las acciones necesarias para la creación de los puntos con los cuales se medirá dicha anchura (tal como se explica en protocolo de medición de "Dog Bone" en este anexo), proceder siguiendo las mismas indicaciones que en el apartado anterior. Una vez creados los puntos guardar el registro.
4. Registro para medir la anchura de la diagonal de la pieza: reproducir las acciones necesarias para la creación de los puntos con los cuales se medirá dicha anchura (tal como se explica en protocolo de medición de "Dog Bone" en este anexo), proceder siguiendo las mismas indicaciones que en el segundo apartado. Una vez creados los puntos guardar el registro.
5. Registro para medir la longitud de la pieza: reproducir las acciones necesarias para la creación de los puntos con los cuales se medirá la longitud (tal como se explica en protocolo de medición de "Dog Bone" en este anexo), proceder siguiendo las mismas indicaciones que segundo apartado. Una vez creados los puntos guardar el registro.
6. Editar los archivos guardados en un editor de texto tipo EditPlus: Es necesario "retocar" los archivos ".glg" guardados, eliminando la primera instrucción del registro que cargaba el modelo en el que fue creado ese registro. De esta manera se consigue que sean reproducibles en cualquier modelo. Pude verse un ejemplo del código en la Figura A6.

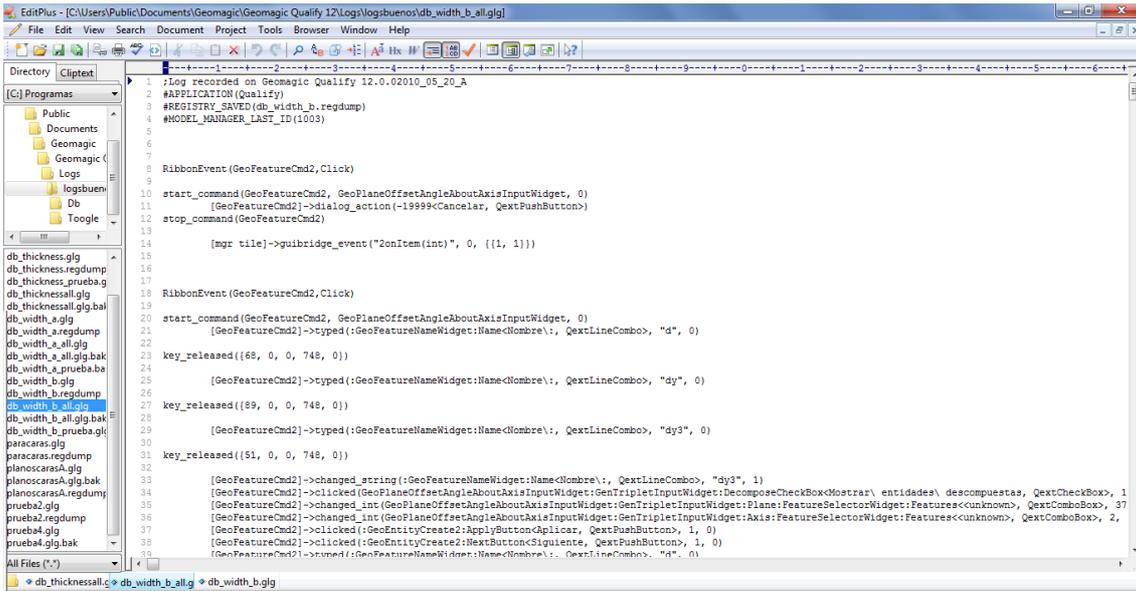


Figura A6. Formato de código .glg de Geomagic

7. Repitiendo el paso 1 para cualquier modelo pueden ejecutarse todos los registros como se muestra en la Figura A7.

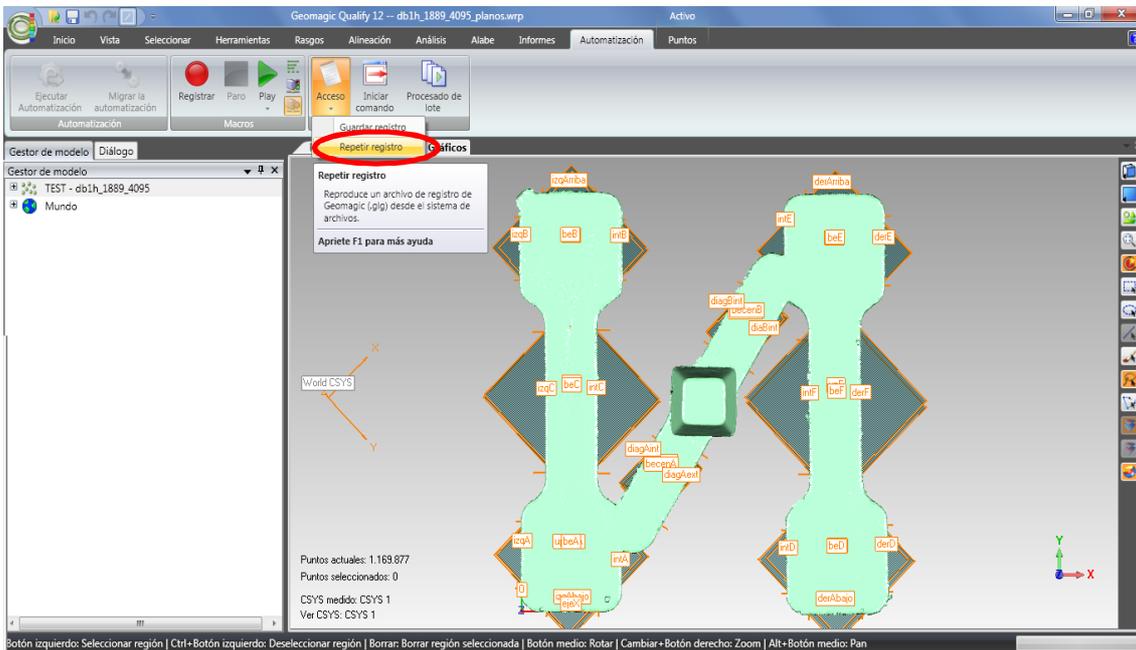


Figura A7. Herramienta repetir registro de Geomagic

## Anexo IV:

### Estudio de elección del valor umbral en piezas Toggle

El valor umbral para las piezas Toggle se decide elegirlo en función de un factor definido como la relación diámetro exterior/diámetro interior, estas medidas se muestran en la Figura A8.

El objetivo es seleccionar aquel valor umbral que hace que la relación anteriormente expuesta en la pieza medida, sea lo más próxima posible al valor  $a$  de esa relación en la medida tomada como referencia. Esta medida de referencia se obtiene como el valor promedio de las medidas obtenidas para cada pieza en la máquina OCMM antes y después del tomografiado de la misma.

Para cada pieza se va a mostrar el histograma real de la pieza, el histograma que importa Mimics y algunas secciones que mostraran la validez del umbral elegido

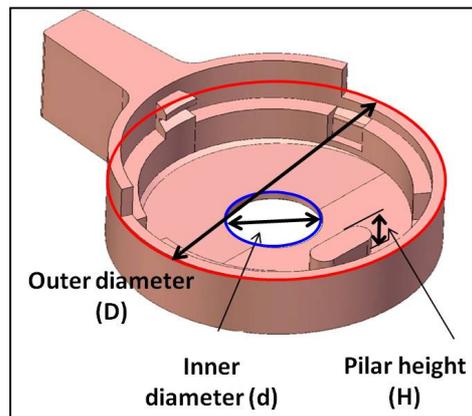


Figura A8. Zonas de medición en Toggle

- Toggle 1: umbral comprendido entre 1689-2818 en escala de grises

	OCMM ANTES	OCMM DESPUÉS	OCMM PROMEDIO	T1 1689-2812
H	0,4080333	0,400376667	0,404205	0,39959
d	1,5324967	1,533736667	1,533116667	1,575
D	5,4002967	5,400396667	5,400346667	5,517
D/d	3,5238554	3,521071631	3,52246352	3,50285714

Tabla A10. Mediadas Toggle 1

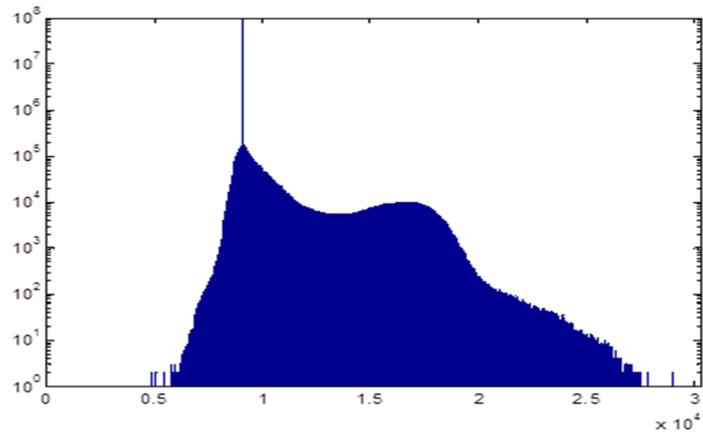


Figura A9. Histograma Toggle 1

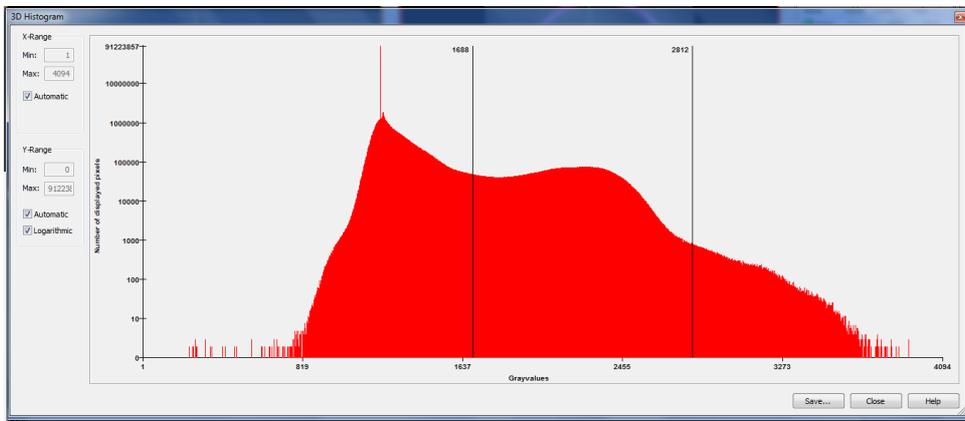


Figura A10. Histograma importado por Mimics para Toggle 1

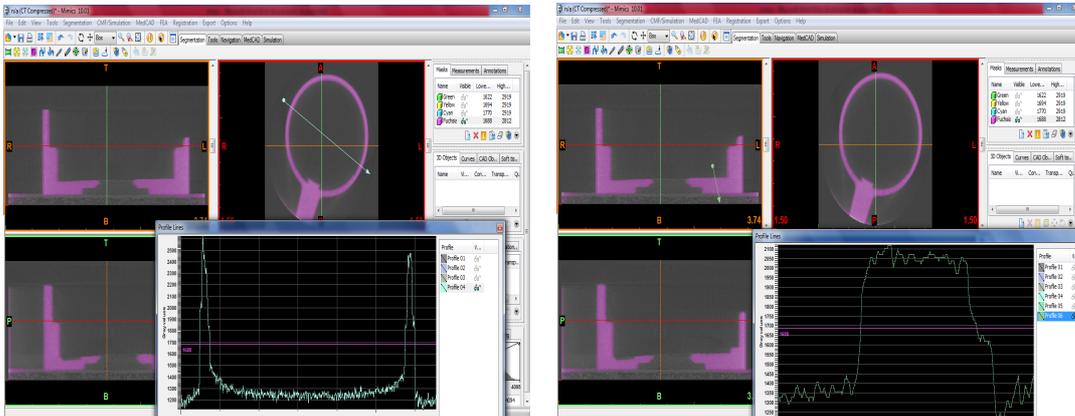


Figura A11. Perfiles en Toggle 1

- Toogle 2: umbral comprendido entre 1033-1050 en escala de grises

	OCMM ANTES	OCMM DESPUÉS	REFERENCIA	T2_1033_1050
H	0,4008933	0,412796667	0,406845	0,399043
d	1,5319167	1,532076667	1,531996667	1,544
D	5,4008367	5,396896667	5,398866667	5,457
D/d	3,5255421	3,52260222	3,524072148	3,53432642

Tabla A11. Medidas Toogle 2

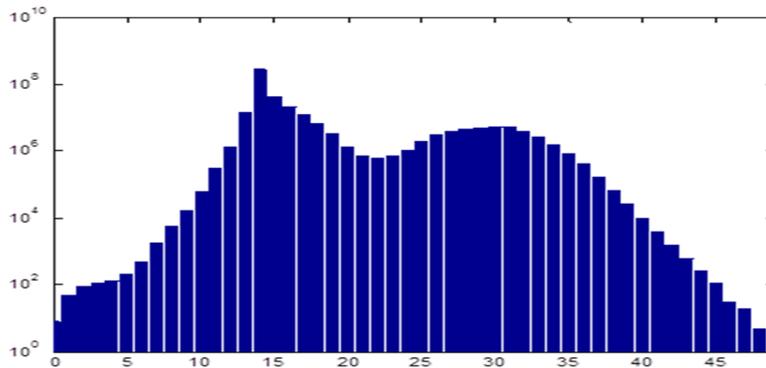


Figura A12. Histograma Toggle 2

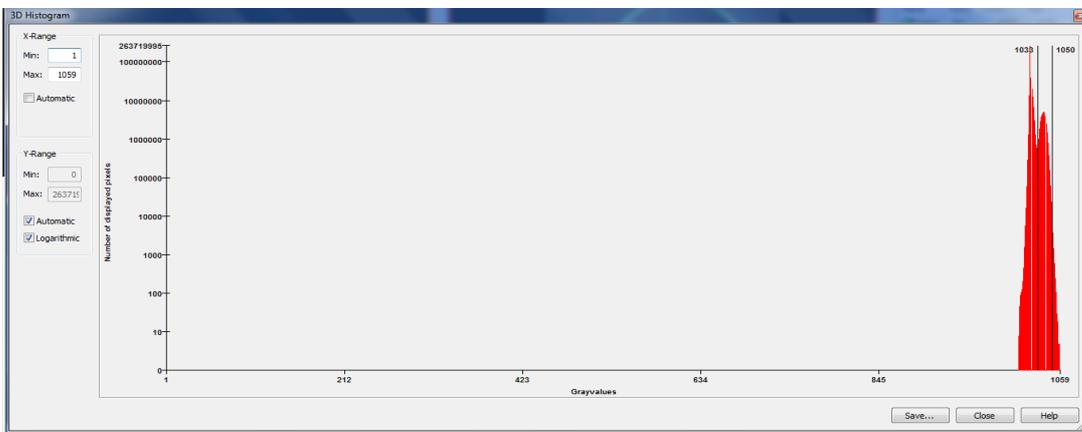


Figura A13. Histograma importado por Mimics en Toggle 2

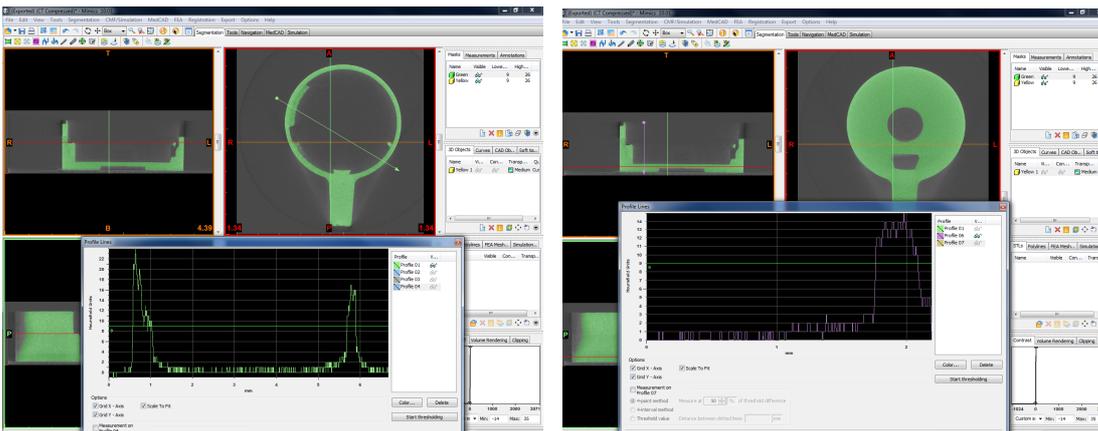


Figura A14. Perfiles en Toggle 2

- Toggle 3: umbral comprendido entre 1658-2884 en escala de grises

	OCMM ANTES	OCMM DESPUÉS	REFERENCIA	T3_1658_2884
H	0,4009733	0,396726667	0,39885	0,399996
d	1,5331367	1,532836667	1,532986667	1,528
D	5,3994367	5,399136667	5,399286667	5,457
D/d	3,5218235	3,522317011	3,522070231	3,57133508

Tabla A12. Medidas Toggle 3

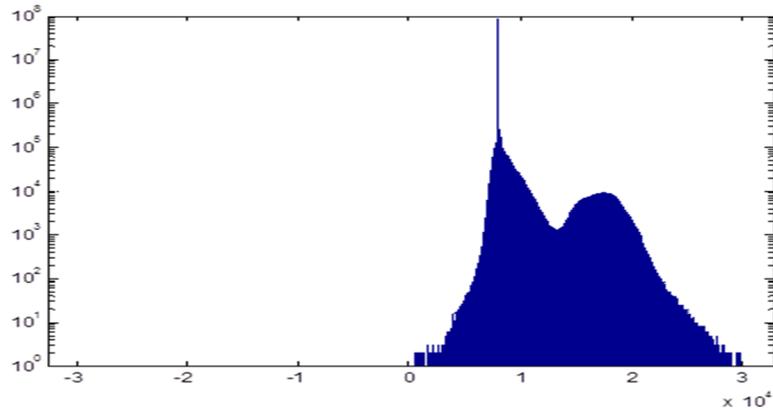


Figura A15. Histograma Toggle 3

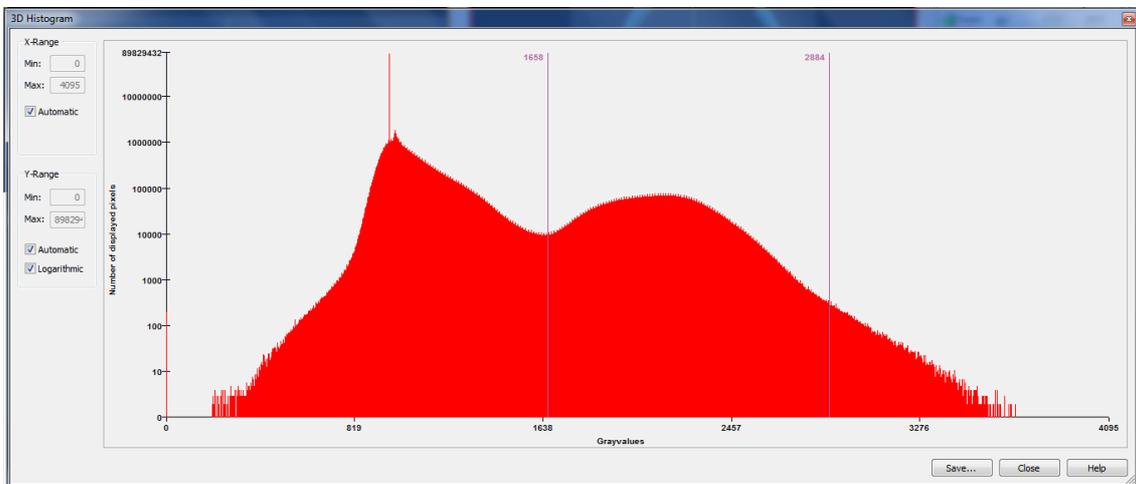


Figura A16. Histograma importado por Mimics en Toggle 3

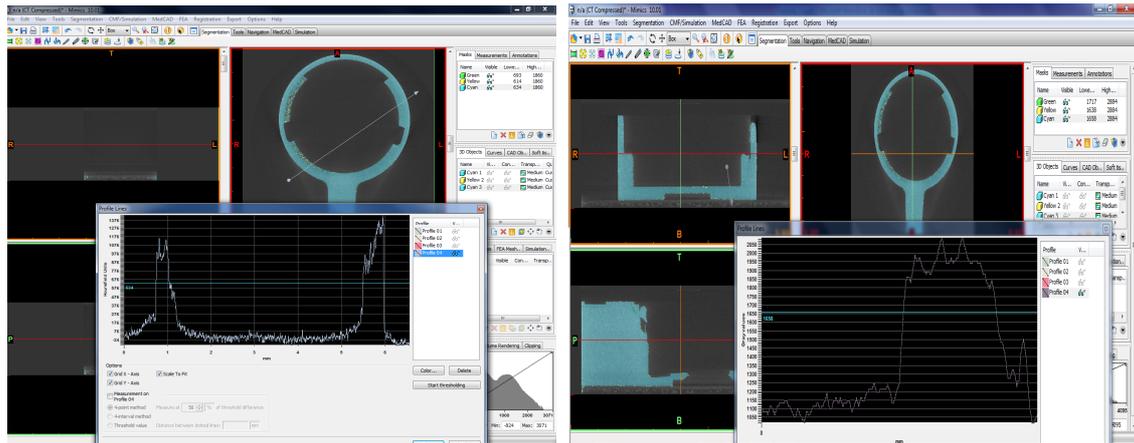


Figura 17. Perfiles en Toogle 3

## Anexo V: Corrección de errores en Toogle

En la tabla se muestran los valores medidos en las tres piezas Toogle, los valores de referencia, los valores promedio y los factores usados en la corrección.

Las correcciones que se realizaron fueron con cada pieza para las demás fueron:

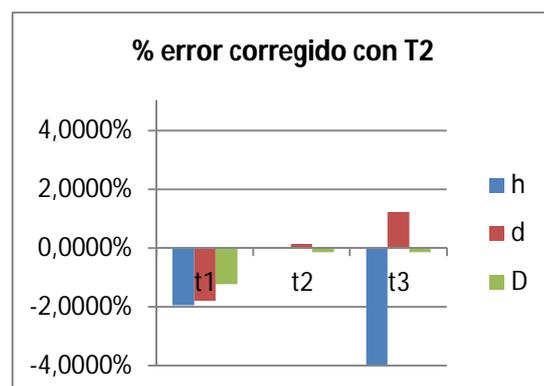
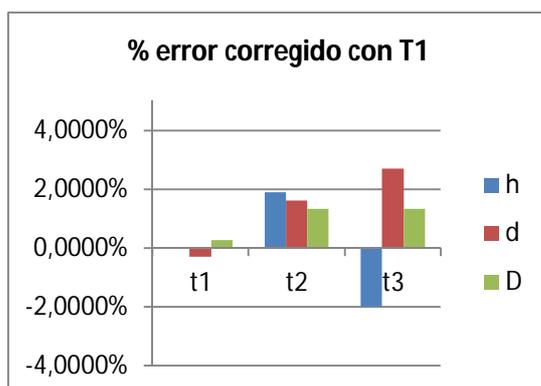
- Con el factor promedio de los diámetros aplicado a todas las dimensiones
- Con el factor promedio de las alturas aplicado a todas las dimensiones
- Con el factor promedio de los diámetros aplicado a los diámetros y el factor de las alturas aplicado a las alturas en la misma pieza.

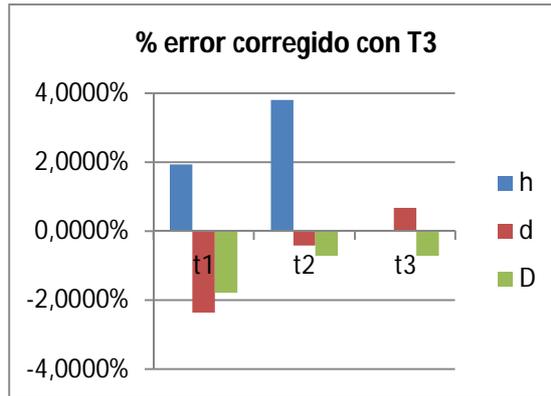
	REFERENCIA	T1_1689_2812	FACTOR DE ESCALA	ERROR
H	0,4014	0,39959	1,005	0,004615
d	1,533116667	1,575	0,973407407	-0,041883333
D	5,400346667	5,517	0,978855658	-0,116653333
		Promedio diámetros	0,976131533	
	REFERENCIA	T2_1033_1050		ERROR
H	0,4086	0,399043	1,024	0,007802
d	1,531996667	1,544	0,99222582	-0,012003333
D	5,398866667	5,457	0,989347016	-0,058133333
		Promedio diámetros	0,990786418	
	REFERENCIA	T3_1658_2884		ERROR
H	0,394	0,399996	0,985	-0,001146
d	1,532986667	1,528	1,003263525	0,004986667
D	5,399286667	5,457	0,989423981	-0,057713333
		Promedio diámetros	0,990786418	

**Tabla A13. Resumen valores Toggle**

En las siguientes graficas se pueden ver los resultados de la corrección de errores:

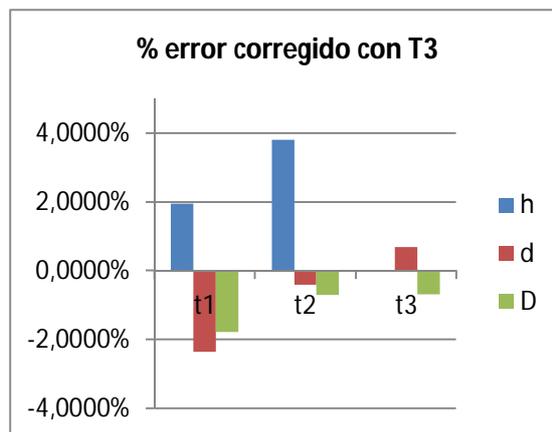
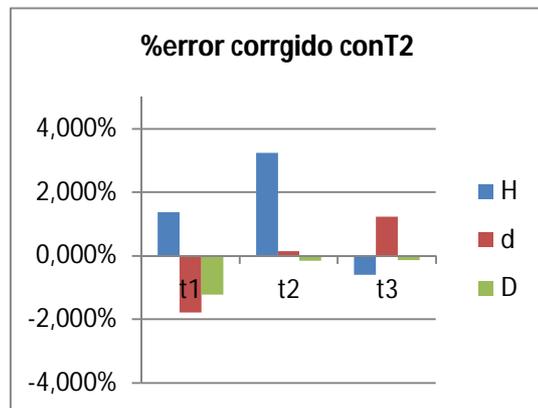
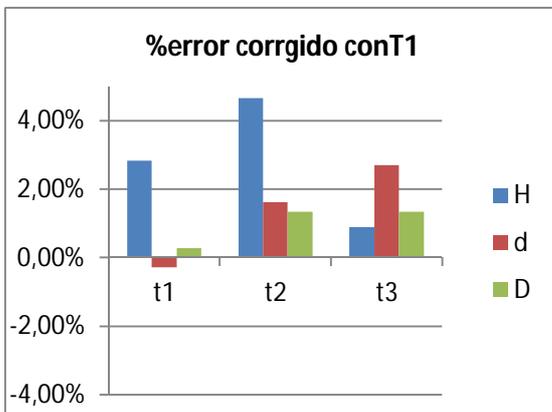
- Errores (%) aplicando corrección de factores de los diámetros y altura





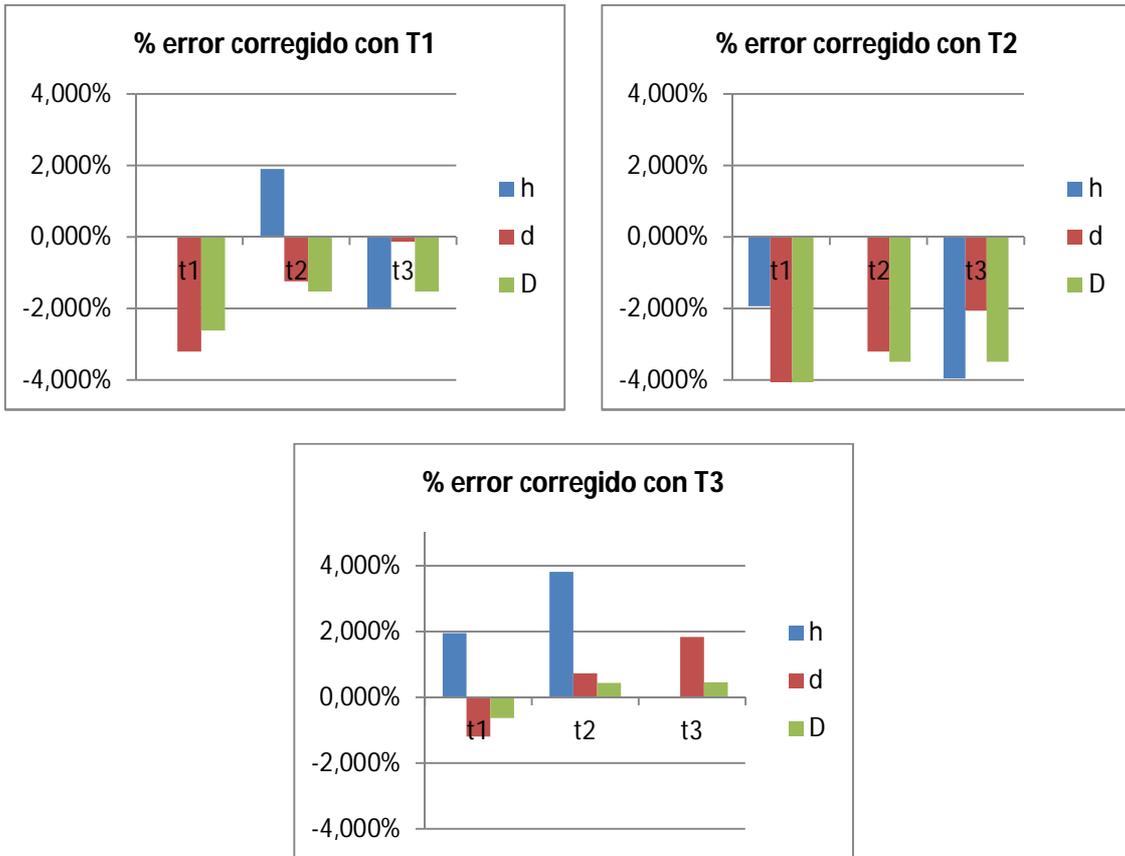
**Gráficos A1, A2, A3. Errores (%) corregidos usando diámetros y alturas**

- Errores (%) aplicando corrección de factores de los diámetros



**Gráficos A4, A5, A6. Errores (%) corregidos usando diámetros**

- Errores (%) aplicando corrección de factores de las alturas



Gráficos A7, A8, A9. Errores (%) corregidos usando alturas

## Anexo VI: Estudio de elección del valor umbral en piezas Dog Bone

### - Estudio de variación dimensional en función del umbral escogido

El objetivo de este estudio es observar tendencias en la variación dimensional de la pieza en los diferentes ejes, viendo variaciones en longitud, anchura y espesor según diferentes valores de umbral.

El estudio se realizó con la pieza DB3 y procedió como se indica a continuación:

#### 1. En Mimics:

Se eligieron tres valores umbral a criterio personal viendo diferentes perfiles en la pieza. Fueron un valor máximo, uno mínimo y otro intermedio: [1025 1620], [814 1620], [951 1620]. Estos valores pueden verse sobre un mismo perfil en las Figuras A18, A19 y A20.

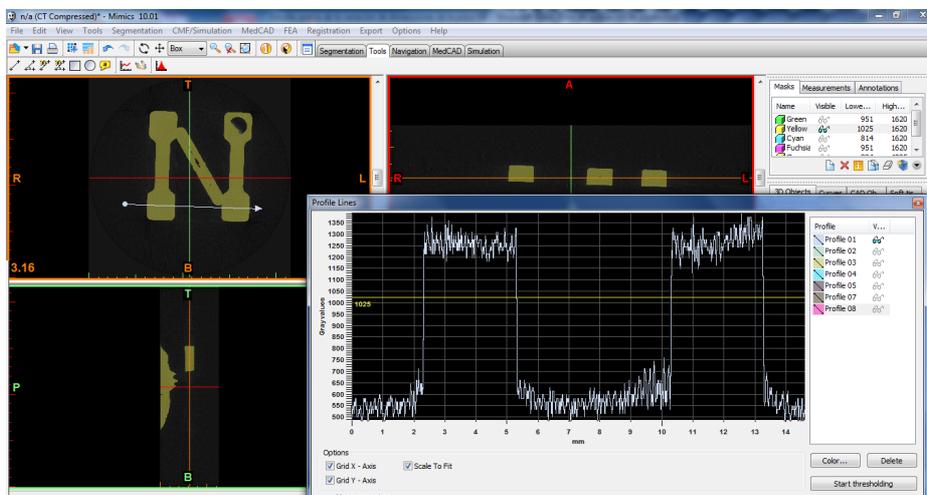


Figura A18. Umbral [1025 1620]

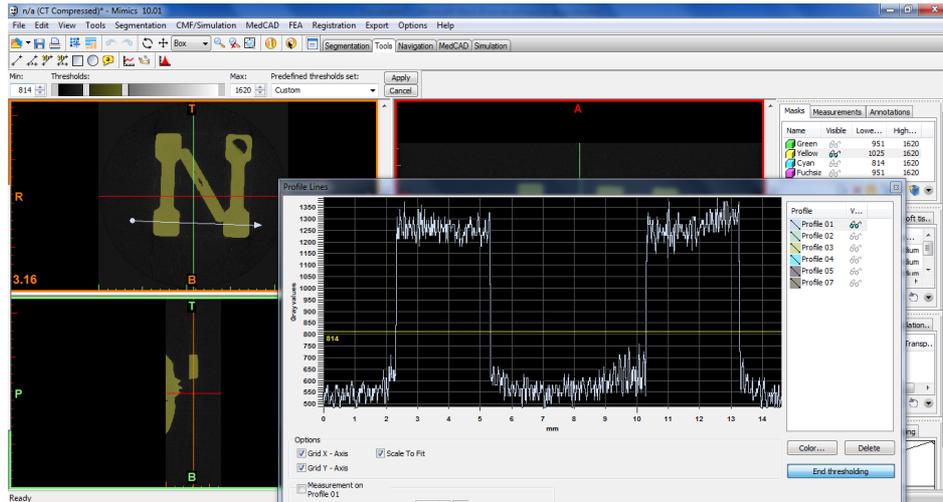


Figura A19. Umbral [814 1620]

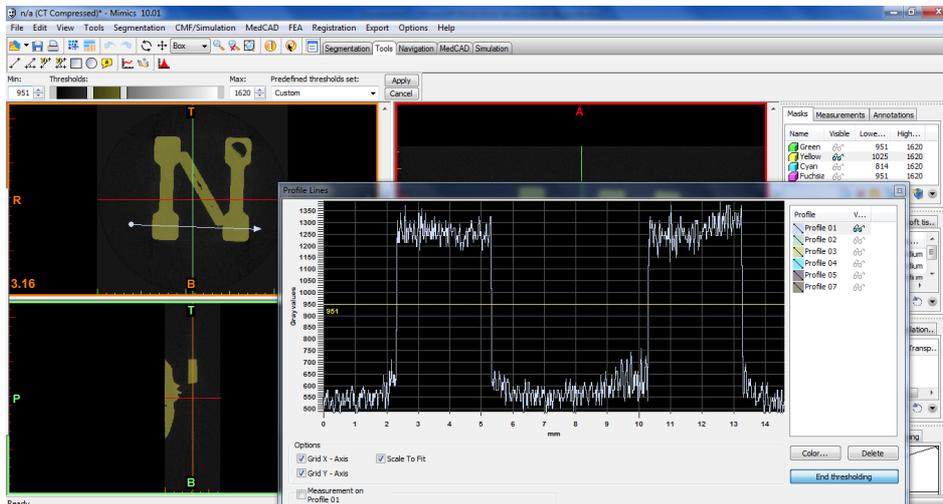


Figura A20. Umbral [951 1620]

2. En Geomagic:

1º Se crea un sistema de coordenadas según el protocolo de medición de piezas Dog Bone, para el posicionado de la pieza.

2º Se crean tres secciones (las secciones son creadas con la herramienta sección a través de objeto) en el plano XY en Z= -0.25, -0.5 y -0.75mm. Con estas secciones se mide longitud y anchura según la Figura A21 siguiente y para luego hacer una media de las medidas de las tres secciones.

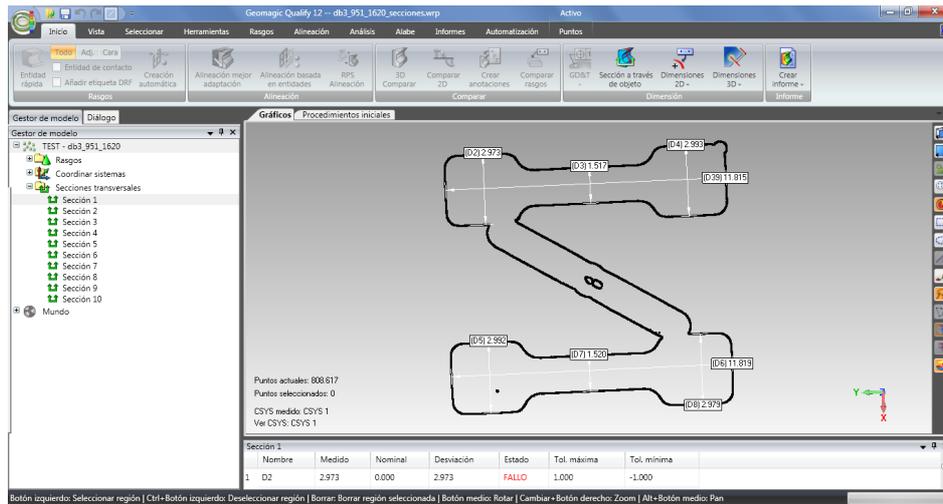


Figura A21. Sección para medición de largo y ancho en Dog Bone

3º La medida del espesor se toma realizando secciones con el plano XZ en Y= 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 11mm. En estas secciones se mide el espesor como indica la Figura A22.

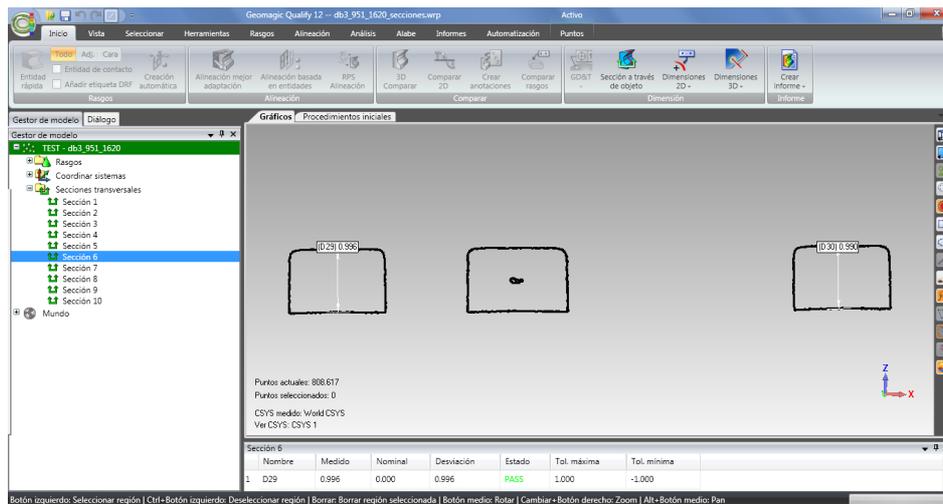
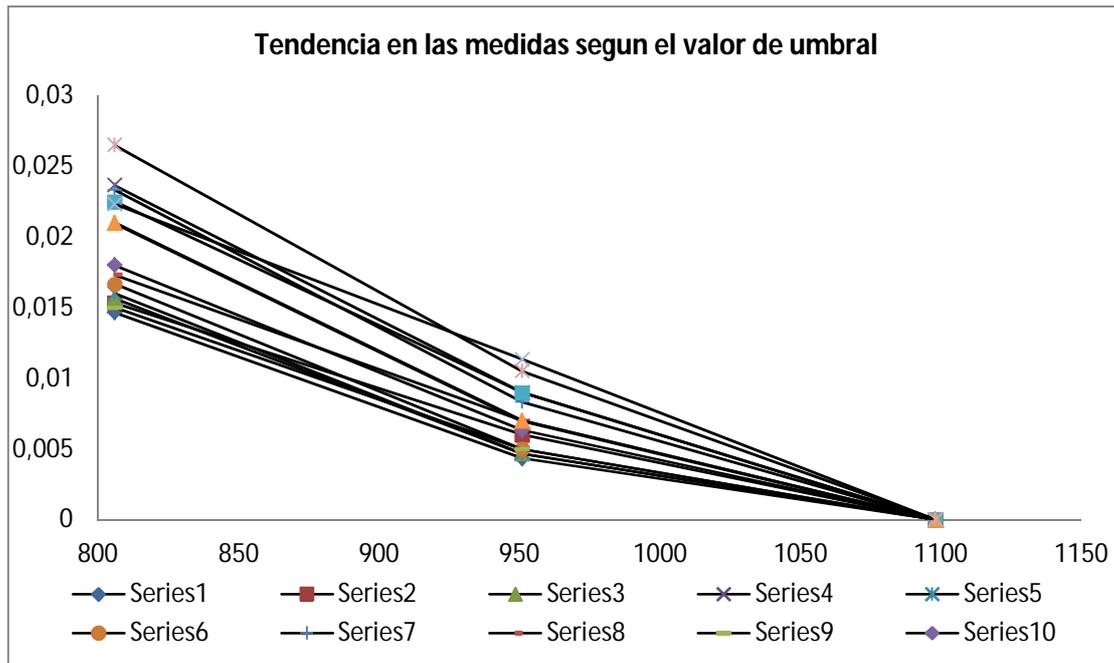


Figura A22. Sección para medición de espesor en Dog Bone

El proceso se repite para la pieza con los tres valores de umbral elegidos y se trabaja con los datos en una hoja de cálculo.

Los resultados obtenidos se muestran en el Gráfico A10, que muestra en X el valor de umbral y en Y la medida obtenida, en valor relativo para una mejor visualización, es decir, su valor menos el valor mínimo medido.



**Gráfico A10.** Tendencias en las medidas de DB3 según diferentes valores umbral

A partir del gráfico podemos observar que al disminuir el valor umbral las dimensiones aumentan, algo que sí que parecía claro a priori. El problema es que no aumentan linealmente, ni por igual en todos los ejes, con lo cual no podemos obtener ningún factor con el que evaluar el valor de umbral óptimo.

### - Proceso de elección del valor umbral

Para las piezas Dog Bone, al no tener la posibilidad de tomar ningún factor referencia como ocurría en las piezas Toggle, se decide utilizar la técnica del iso 50%. Esta técnica consiste en elegir como límite inferior del valor umbral el valor del punto medio entre los dos picos del histograma, es decir el punto medio entre el pico de aire y el pico de pieza. Como límite superior se escoge el valor final de la escala en la escala de grises, es decir 4095 (la elección del límite superior no suele tener influencia).

En la primera parte del estudio se trabajó con los histogramas tal cual eran importados por Mimics pero en algunas piezas el programa no recogía todos los puntos dando lugar a histogramas anómalos y por lo tanto valores en la medición incorrectos.

Realizando la medición de las 5 piezas con la técnica del iso 50% y en base a los resultados obtenidos y la correspondencia entre los histogramas reales y los histogramas que importa Mimics, se elige una pieza como referencia (DB3 en ese caso) y se normalizan el resto de histogramas, mediante Matlab, de acuerdo a esa pieza. De esta manera se consigue situar los picos de aire y pieza en los mismos valores para todas las piezas y se toma el valor de umbral del punto medio de los dos picos, que es el mismo para todas las piezas.

- Fase I: Medidas con los histogramas originales importados por Mimics y elección del histograma de DB3 como histograma de referencia.
  - o DB1

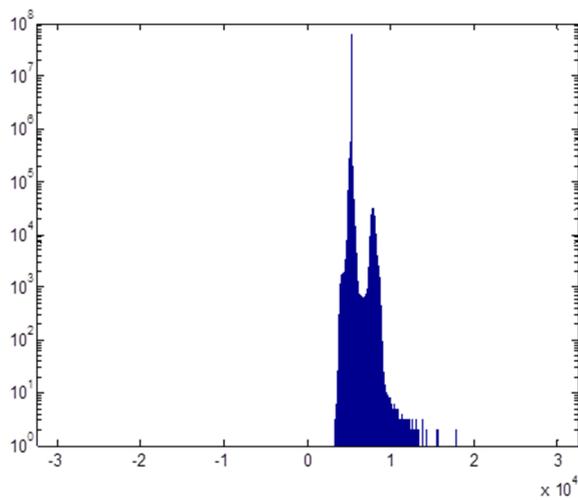


Figura A23. Histograma DB1

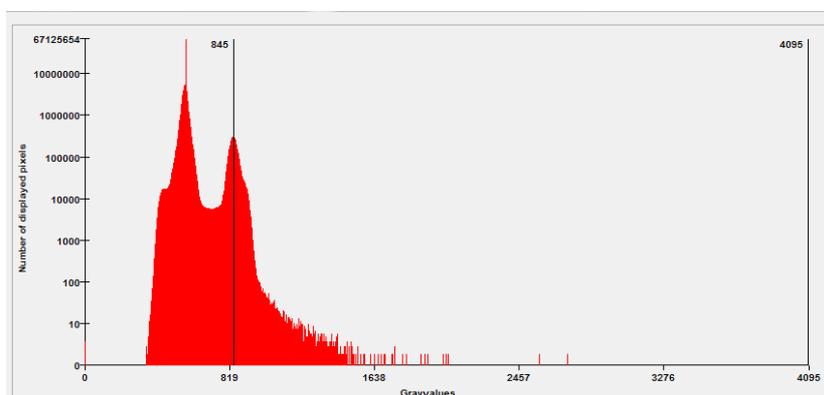


Figura A24. Histograma en Mimics DB1

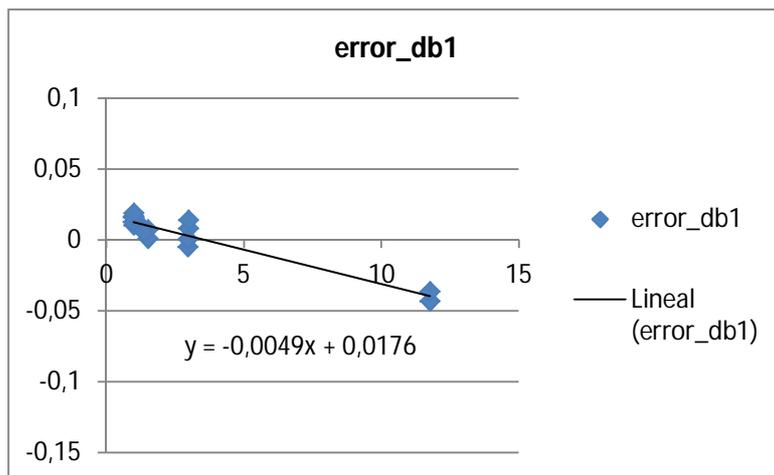


Gráfico A11. Gráfico de trompeta con errores en DB1

○ DB2

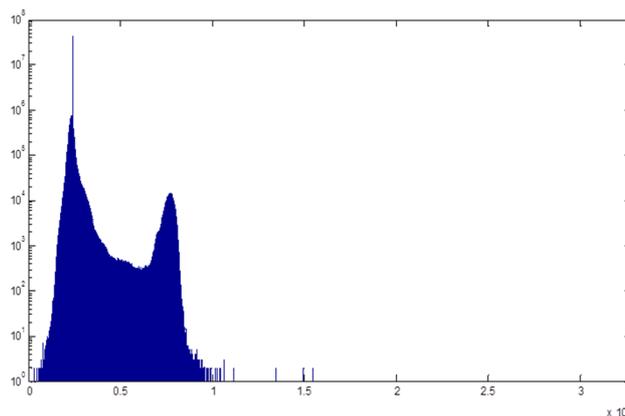


Figura A25. Histograma DB2

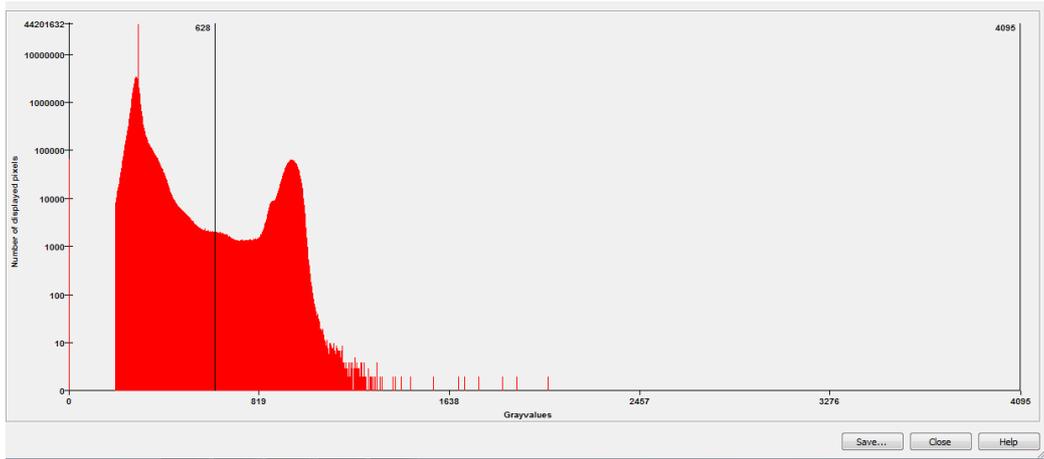


Figura A26. Histograma en Mimics DB2

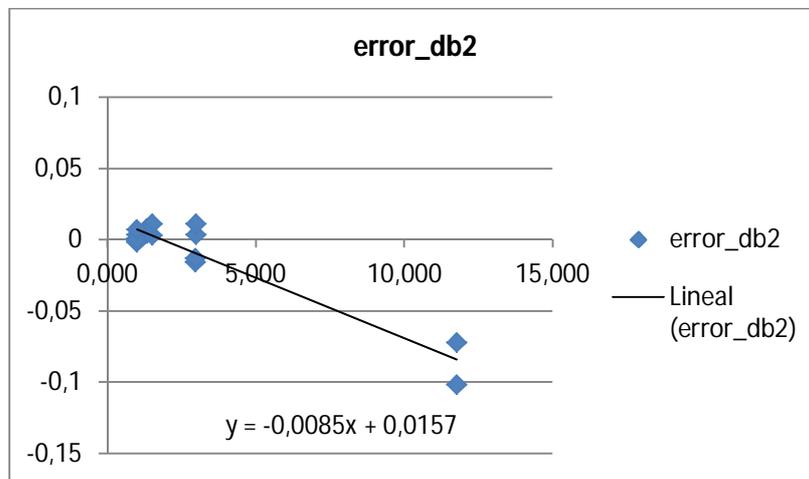


Gráfico A12. Gráfico de trompeta con errores en DB2

o DB3

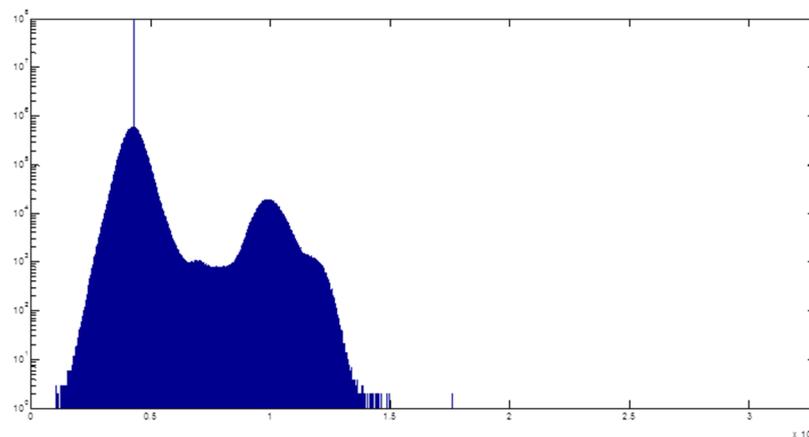


Figura A27. Histograma DB3

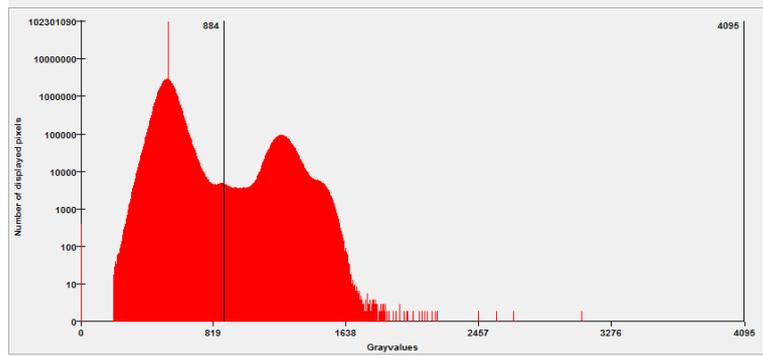


Figura A28. Histograma en Mimics DB3

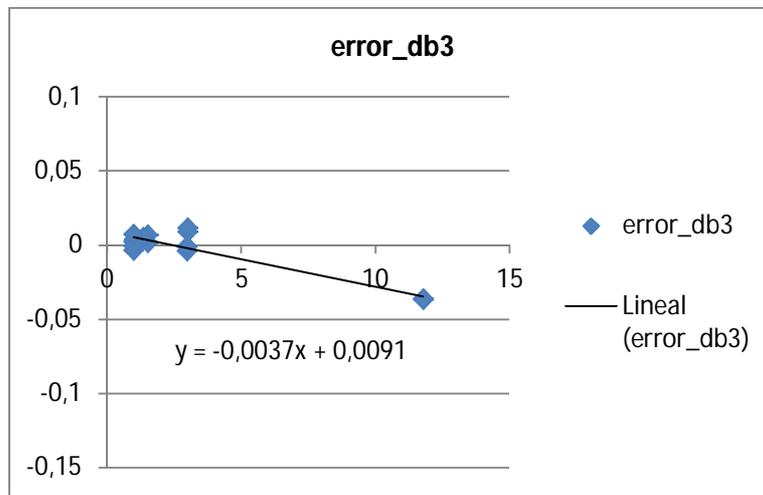


Gráfico A13. Gráfico de trompeta con errores en DB3

o DB4

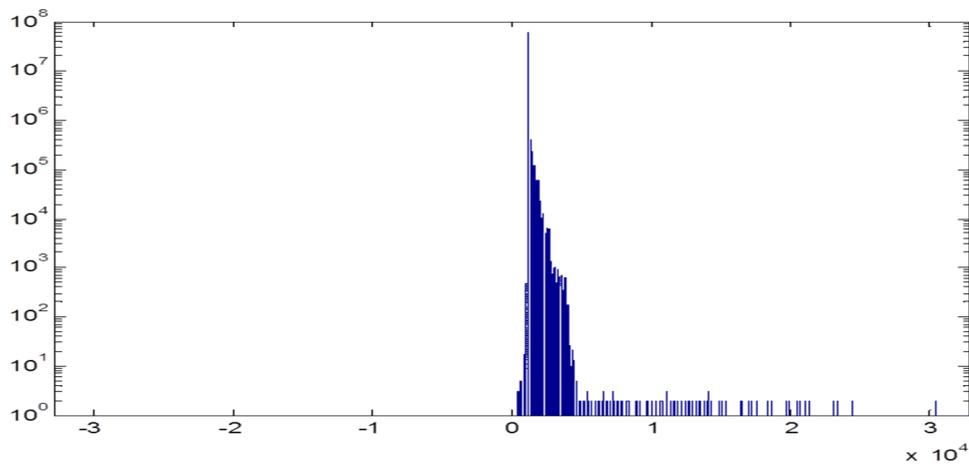


Figura A29. Histograma DB4

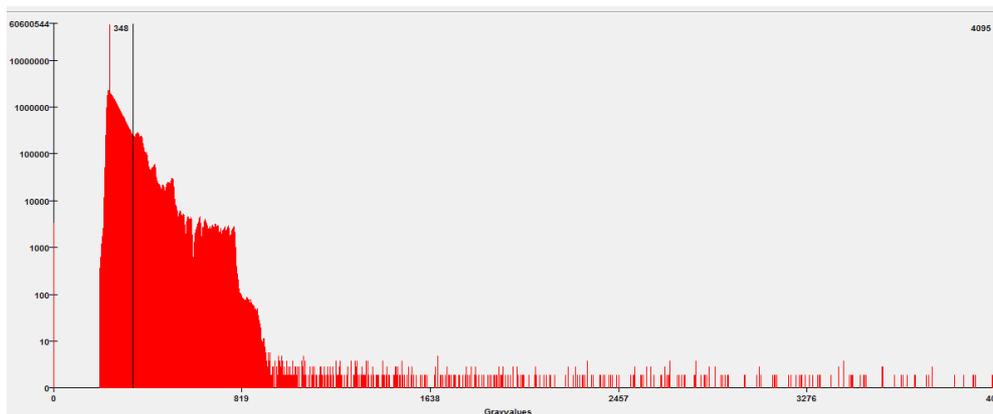


Figura A30. Histograma en Mimics DB4

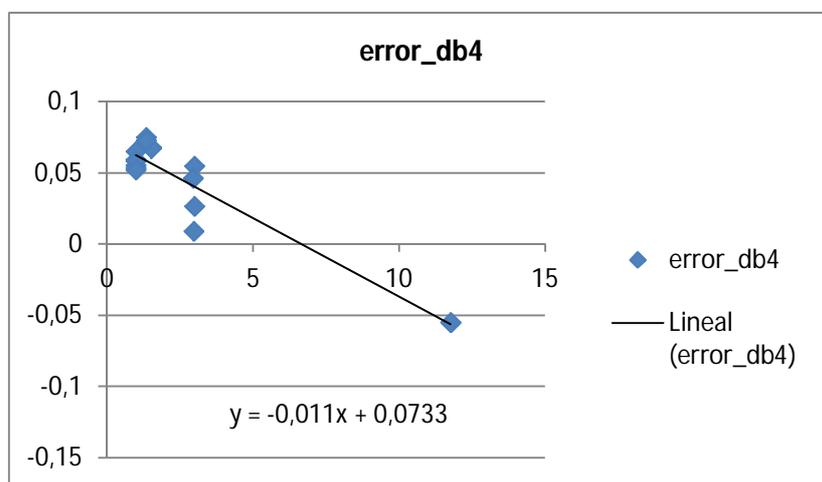


Gráfico A14. Gráfico de trompeta con errores en DB4

○ DB5

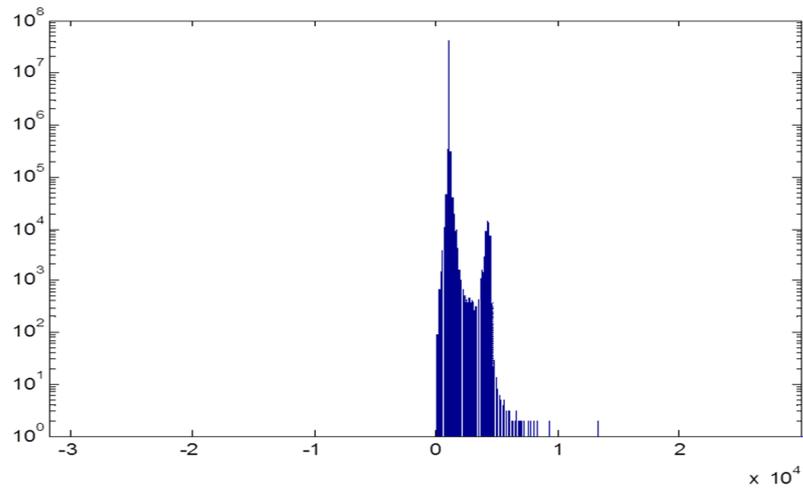


Figura A31. Histograma DB5

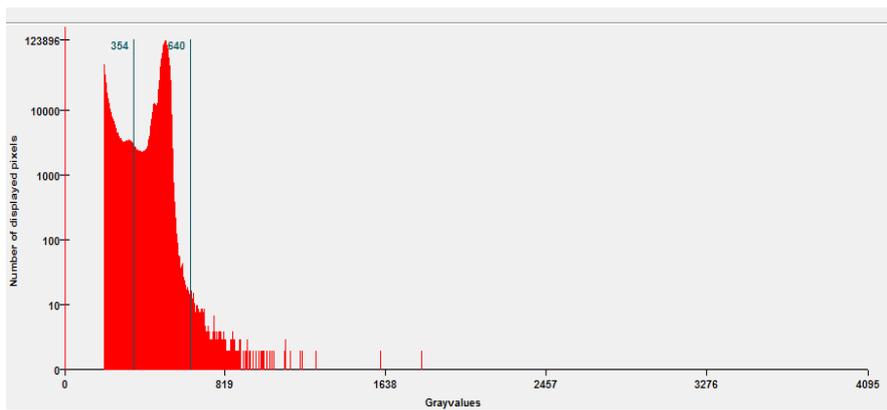
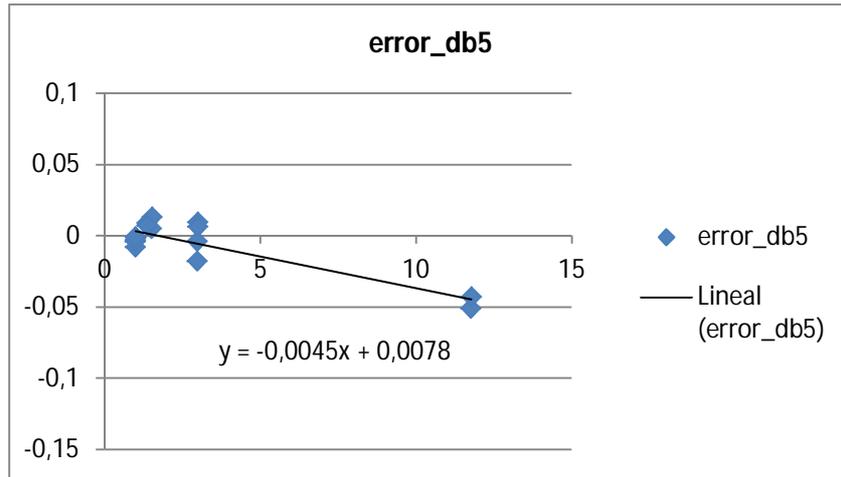


Figura A32. Histograma en Mimics DB5



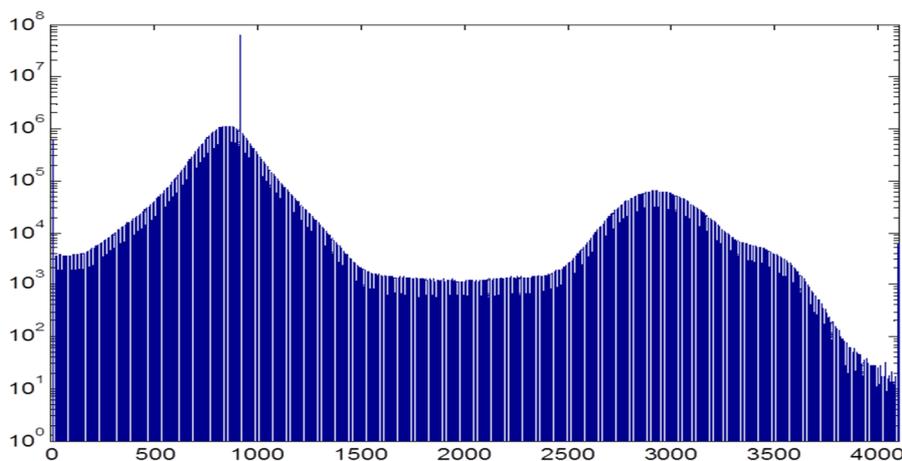
**Gráfico A15.** Gráfico de trompeta con errores en DB5

- Fase II: Normalización de histogramas referenciados a histograma de DB3

Una vez elegido la pieza DB3 como referencia se trabajara con los histogramas normalizados a partir de esta pieza. A continuación se muestran estos histogramas normalizados en su forma real y el importado por Mimics. También se muestran perfiles de cada pieza con el umbral elegido.

No se incluyen los resultado de la pieza DB4 pués visto su histograma y los malos datos obtenidos en el apartado anterior, debio producirse algún error durante el tomografiado o en los protocolos y no resulta oportuno seguir trabajando con esta pieza pues no podríamos extraer conclusiones de ella.

- DB1



**Figura A33.** Histograma normalizado DB1

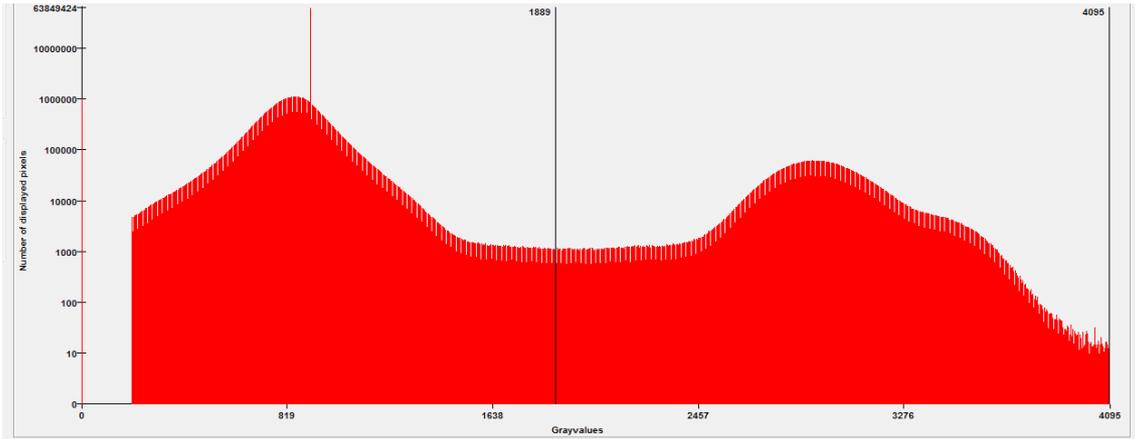


Figura A34. Histograma normalizado DB1 en Mimics

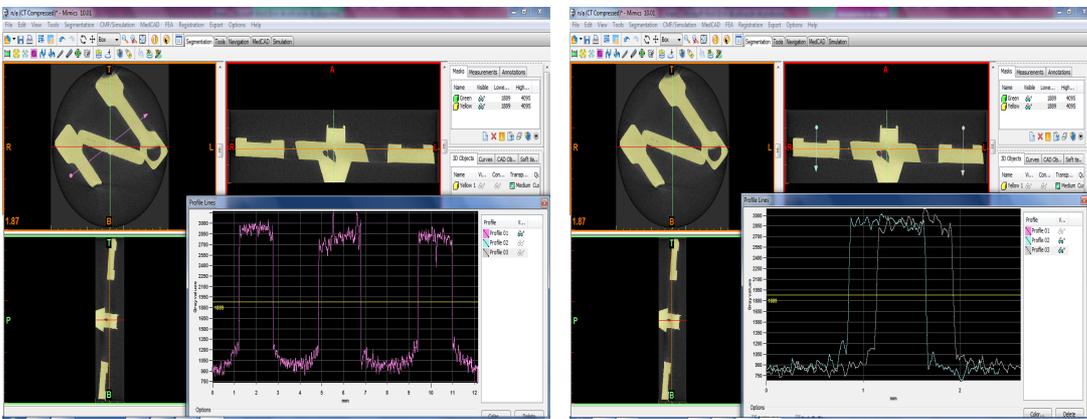


Figura A35. Perfiles DB1

o DB2:

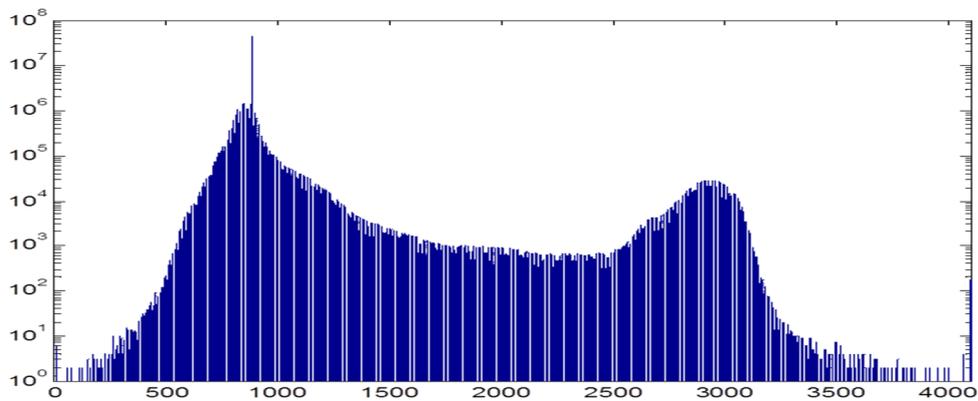


Figura A36. Histograma normalizado DB2

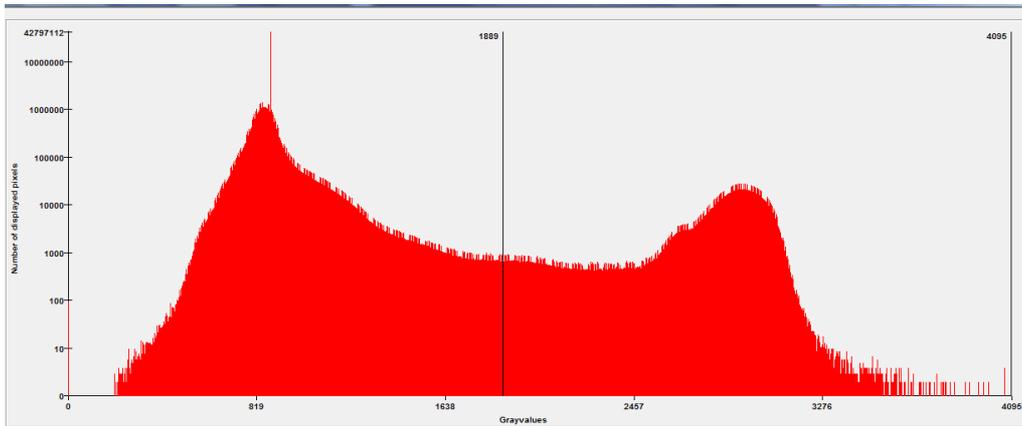


Figura A37. Histograma normalizado DB2 en Mimics

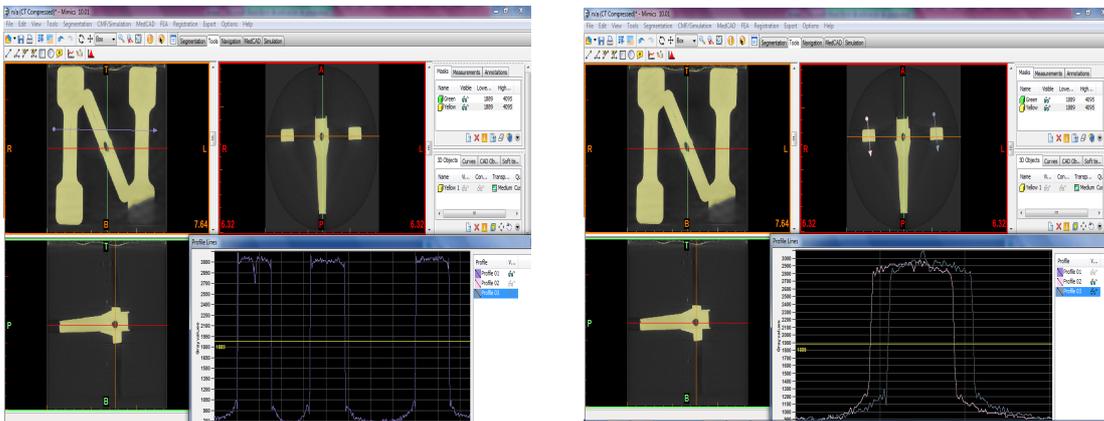


Figura A38. Perfiles DB2

○ DB3

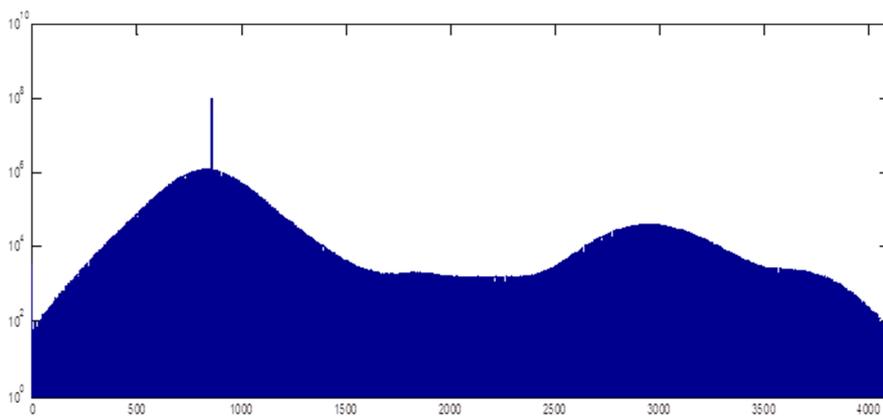


Figura A39. Histograma normalizado DB3

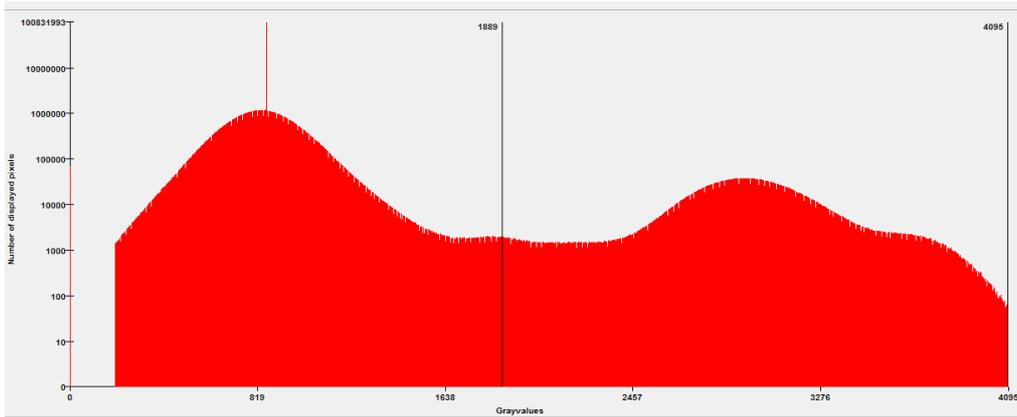


Figura A40. Histograma normalizado DB3 en Mimics

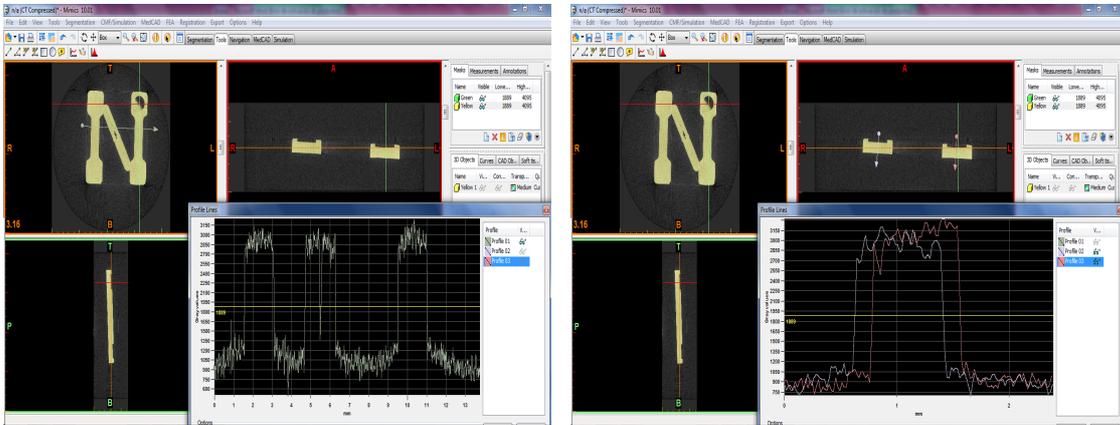


Figura A41. Perfiles DB3

○ DB5

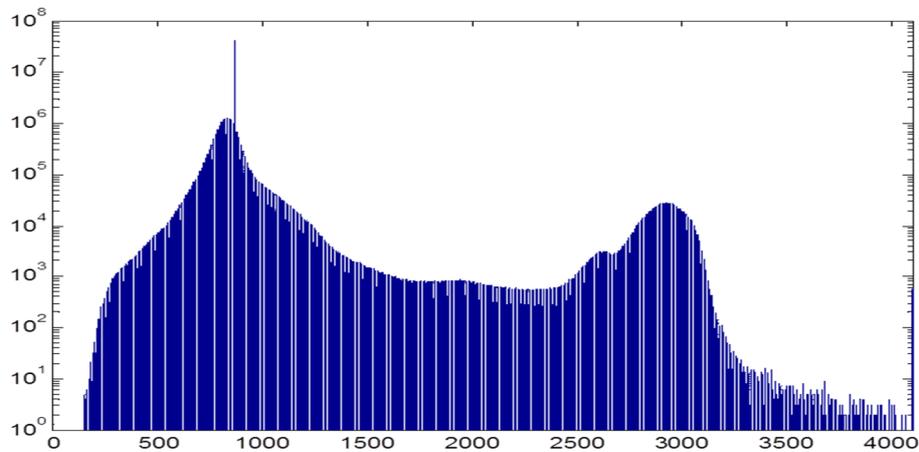


Figura A42. Histograma normalizado DB5

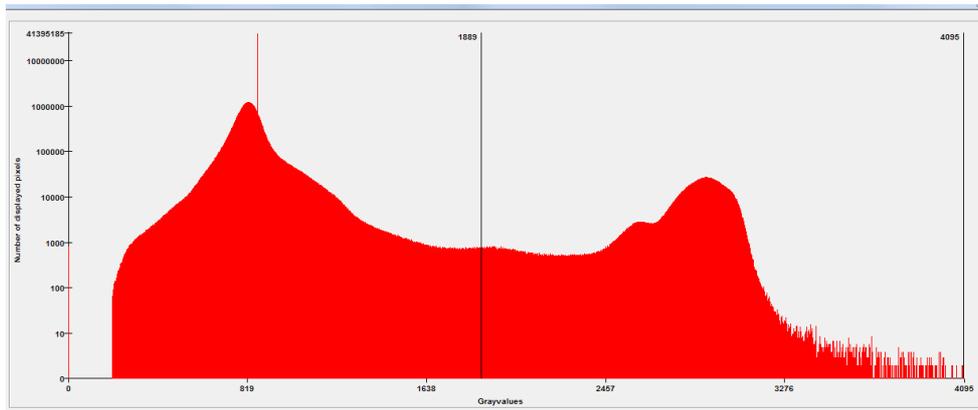


Figura A43. Histograma normalizado DB5 en Mimics

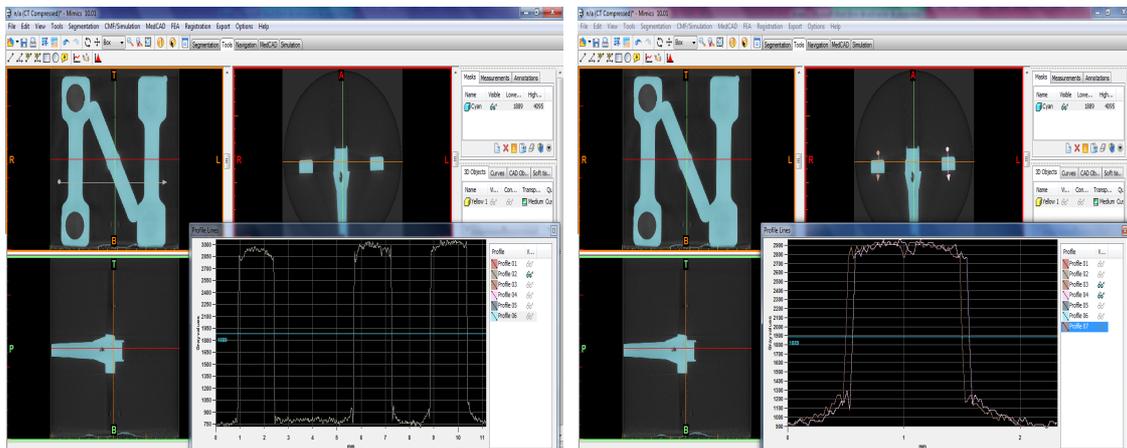


Figura A44. Perfiles DB5

## **Anexo VII:**

### **Corrección de errores en Dog Bone**

Los procedimientos para las correcciones finales realizados en cada pieza para la otra pieza de su grupo fueron:

- Usando la ecuación de la recta.
- Según la dimensión
- Según la dirección

La tabla A14 muestra los valores medidos para cada dimensión, los valores de referencia, los errores y factores obtenidos para piezas DB1 y DB3 tomografiadas en posición horizontal. La tabla A15 muestra el mismo grupo de valores para piezas DB2 y DB5 tomografiadas en posición vertical.

		db1h	OCMM	err_db1h	OCCM/db	db3h	OCMM	err_db3h	OCCM/db
L	I	11,8159	11,7701	-0,0458	0,9961	11,8119	11,7735	-0,0384	0,9967
	a	2,9962	3,0024	0,0062	1,0021	2,9931	3,0017	0,0086	1,0029
	b	1,5209	1,5193	-0,0016	0,9990	1,5174	1,5192	0,0018	1,0012
	c	2,9767	2,9698	-0,0069	0,9977	2,9750	2,9695	-0,0055	0,9981
	d	1,3532	1,3579	0,0047	1,0035	1,3532	1,3575	0,0043	1,0032
R	I	11,8166	11,7811	-0,0355	0,9970	11,8172	11,7800	-0,0372	0,9969
	a	2,9777	2,9767	-0,0010	0,9997	2,9765	2,9767	0,0002	1,0001
	b	1,5190	1,5239	0,0049	1,0032	1,5176	1,5238	0,0062	1,0041
	c	2,9835	2,9955	0,0120	1,0040	2,9819	2,9949	0,0130	1,0044
	d	1,3548	1,3583	0,0035	1,0026	1,3535	1,3586	0,0051	1,0037
T	A	0,9939	1,0052	0,0113	1,0114	0,9992	1,0018	0,0026	1,0026
	B	0,9784	1,0014	0,0230	1,0235	1,0008	0,9962	-0,0046	0,9954
	C	1,0041	1,0054	0,0013	1,0013	0,9989	1,0022	0,0033	1,0034
	D	0,9910	0,9989	0,0079	1,0079	0,9949	0,9973	0,0024	1,0024
	E	0,9848	0,9971	0,0123	1,0125	0,9923	0,9933	0,0010	1,0010
	F	0,9871	1,0029	0,0158	1,0160	0,9924	0,9998	0,0074	1,0074

**Tabla A14. Valores DB1 y DB3**

		db5h	OCMM	err_db5h	OCCM/db	db2h	OCMM	err_db2h	OCCM/db
L	I	11,8583	11,7729	-0,0855	0,9928	11,8716	11,7698	-0,1018	0,9914
	a	2,9969	3,0010	0,0041	1,0014	2,9981	3,0021	0,0040	1,0013
	b	1,5195	1,5193	-0,0002	0,9999	1,5171	1,5192	0,0021	1,0014
	c	2,9905	2,9691	-0,0214	0,9929	2,9838	2,9696	-0,0142	0,9953
	d	1,3495	1,3577	0,0082	1,0061	1,3502	1,3579	0,0077	1,0057
R	I	11,8571	11,7794	-0,0776	0,9935	11,8537	11,7807	-0,0731	0,9938
	a	2,9903	2,9768	-0,0135	0,9955	2,9872	2,9764	-0,0108	0,9964
	b	1,5152	1,5236	0,0084	1,0056	1,5134	1,5239	0,0104	1,0069
	c	2,9911	2,9949	0,0037	1,0013	2,9818	2,9955	0,0137	1,0046
	d	1,3576	1,3587	0,0011	1,0008	1,3537	1,3583	0,0046	1,0034
T	A	1,0121	1,0046	-0,0075	0,9925	0,9988	1,0023	0,0035	1,0035
	B	1,0083	0,9977	-0,0106	0,9895	0,9977	0,9968	-0,0009	0,9991
	C	1,0137	1,0069	-0,0068	0,9933	1,0028	1,0007	-0,0021	0,9979
	D	1,0067	0,9990	-0,0077	0,9923	0,9985	0,9965	-0,0020	0,9980
	E	1,0012	0,9932	-0,0080	0,9921	0,9944	0,9926	-0,0018	0,9982
	F	1,0068	1,0016	-0,0052	0,9948	0,9904	0,9978	0,0074	1,0075

**Tabla A15.** Valores DB2 y DB5

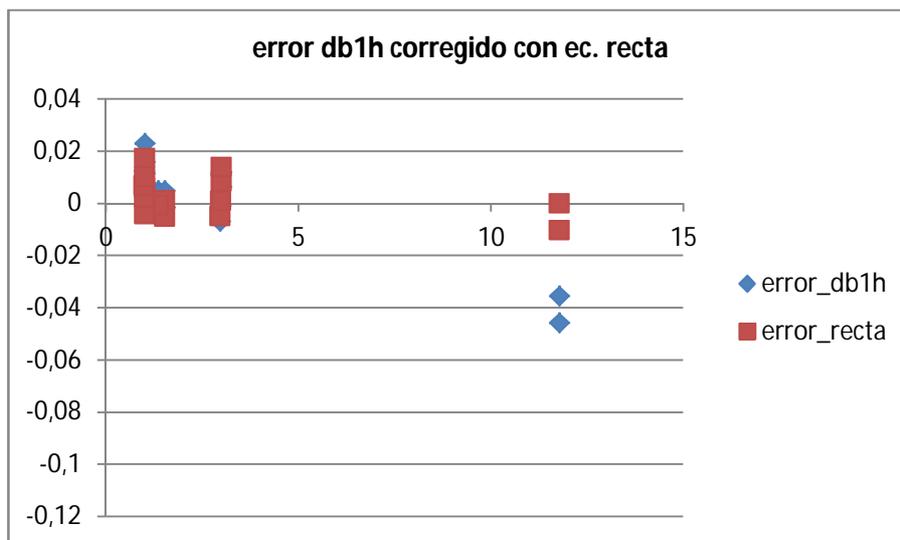
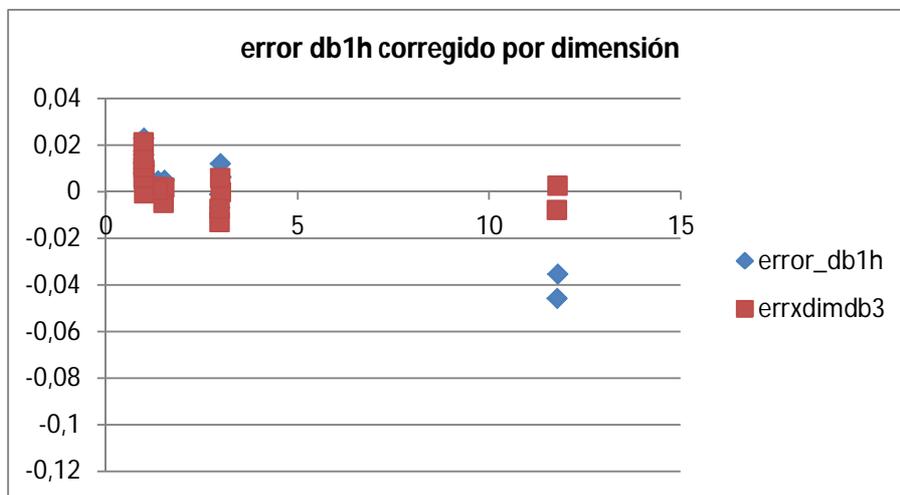
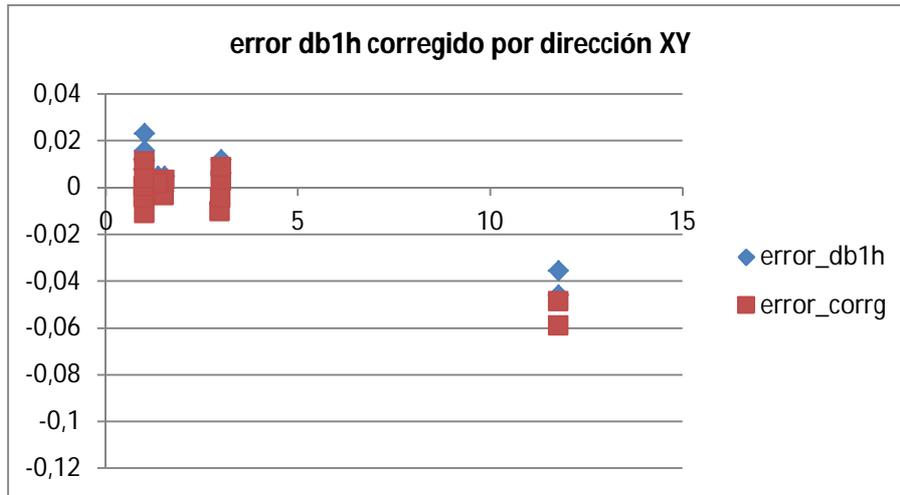
Los distintos factores obtenidos como cociente del valor de referencia entre el valor de la medida y promediado para cada zona se muestran en la tabla A16.

	Factor long.	factor Ancho	factor esp.	factor_dimX	factor_dimY
DB1	0,9965609	1,00145668	1,01211399	1,000477528	1,012113994
DB3	0,99679777	1,00212997	1,00203013	1,001123427	1,002030132
DB2	0,99263021	1,0018744	1,00071382	1,001377008	0,992630209
DB5	0,99312206	1,00041281	0,99241851	0,996986681	0,993122062

**Tabla A16.** Factores Dog Bone

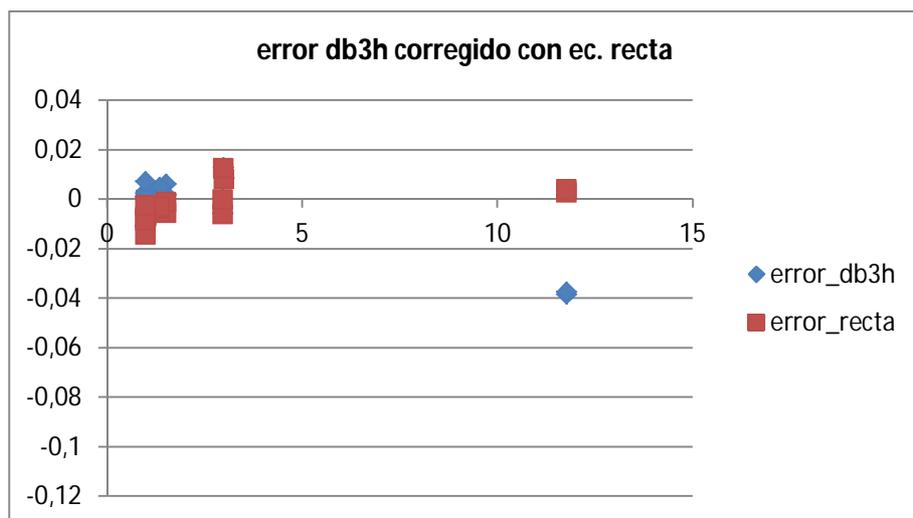
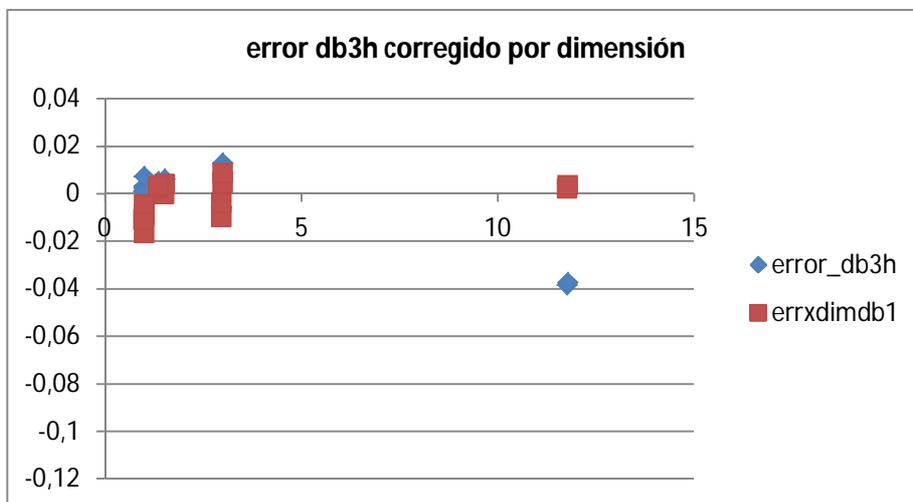
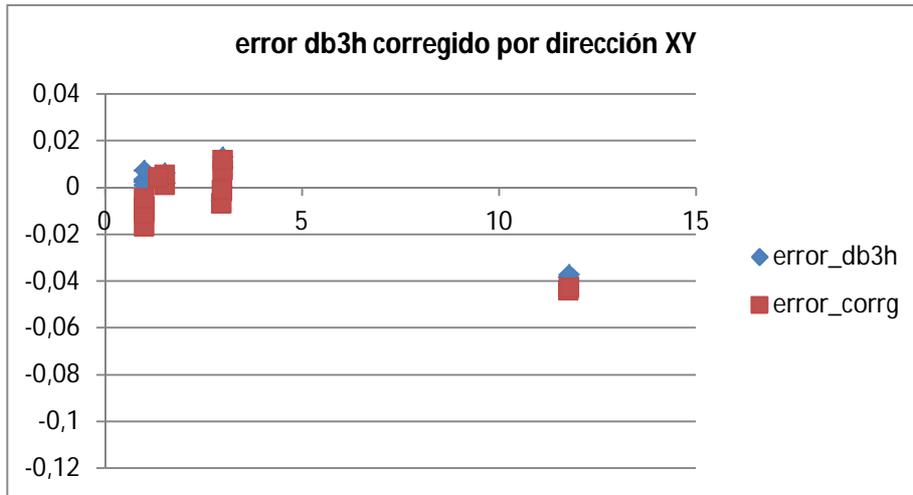
Los siguientes gráficos muestran el error corregido (usando la otra pieza de su grupo) según el método de corrección y el error inicial en función de la magnitud medida.

- DB1



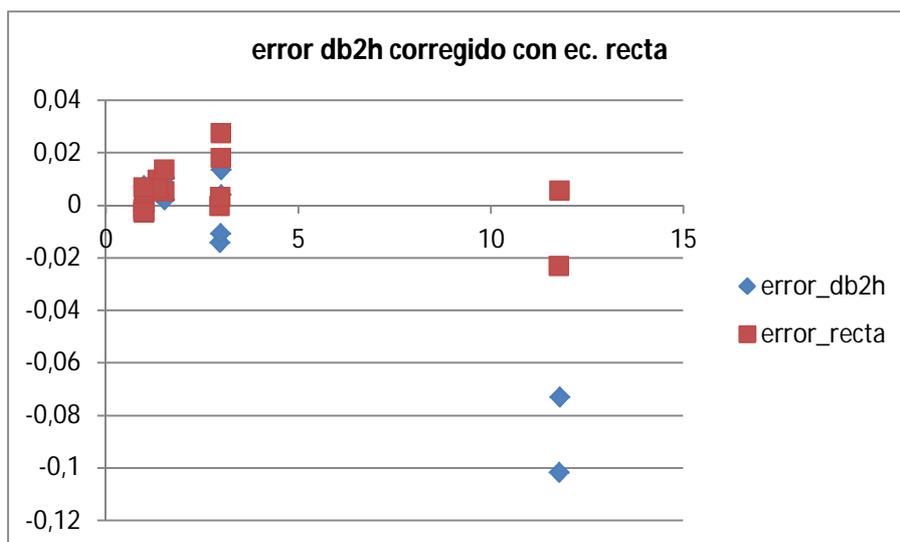
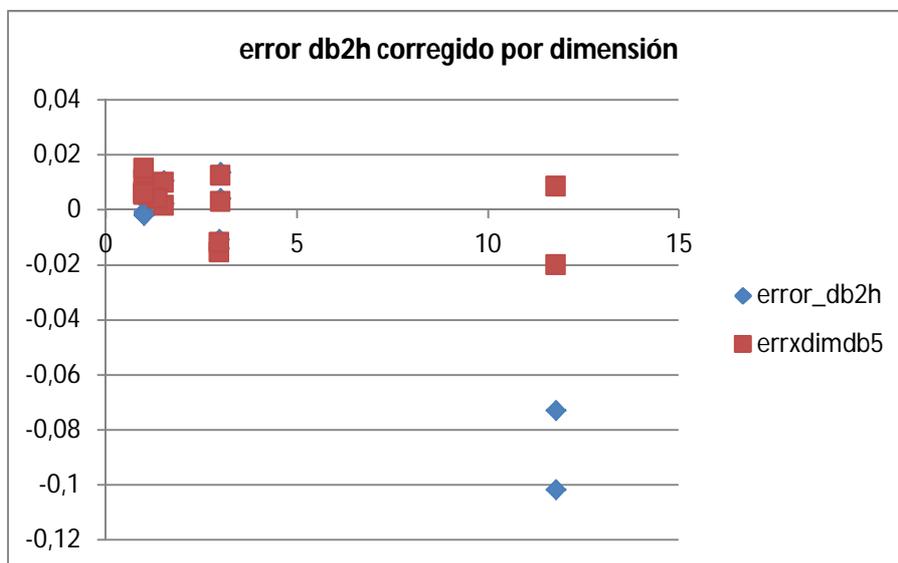
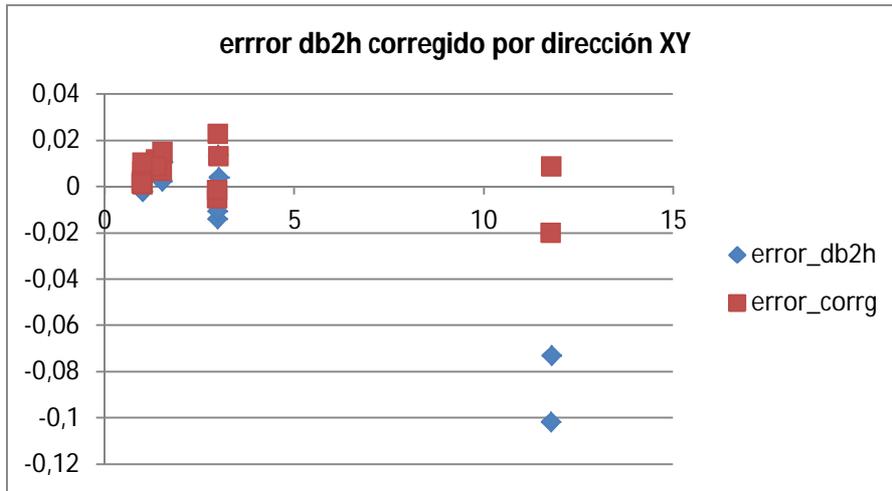
**Gráficos A16, A17, A18.** Gráficos de trompeta con errores inicial y corregido según método en DB1

- DB3



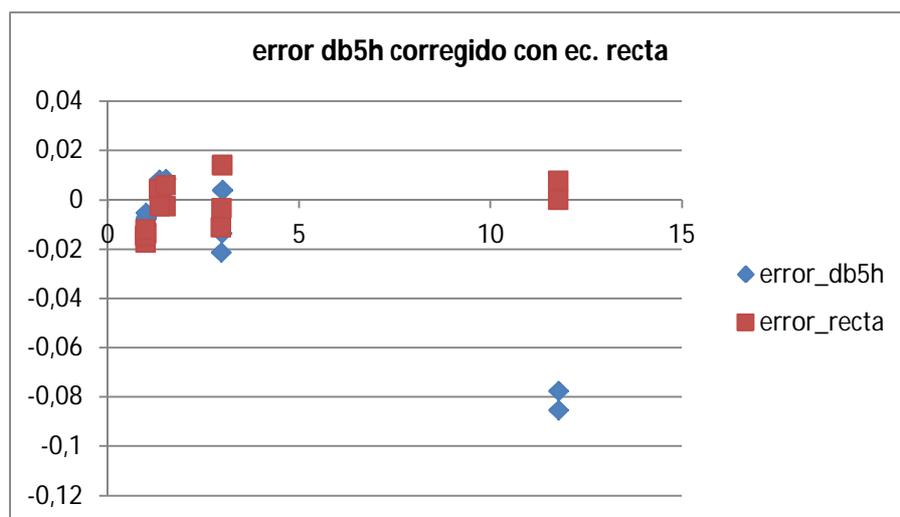
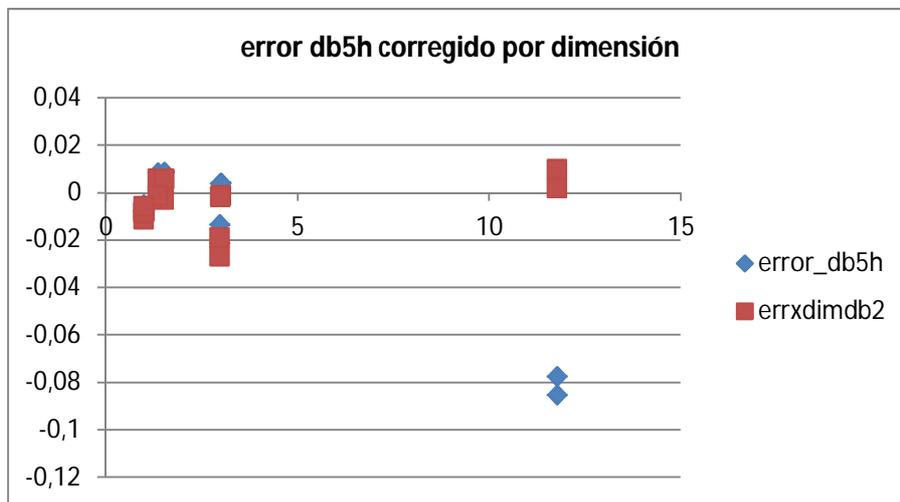
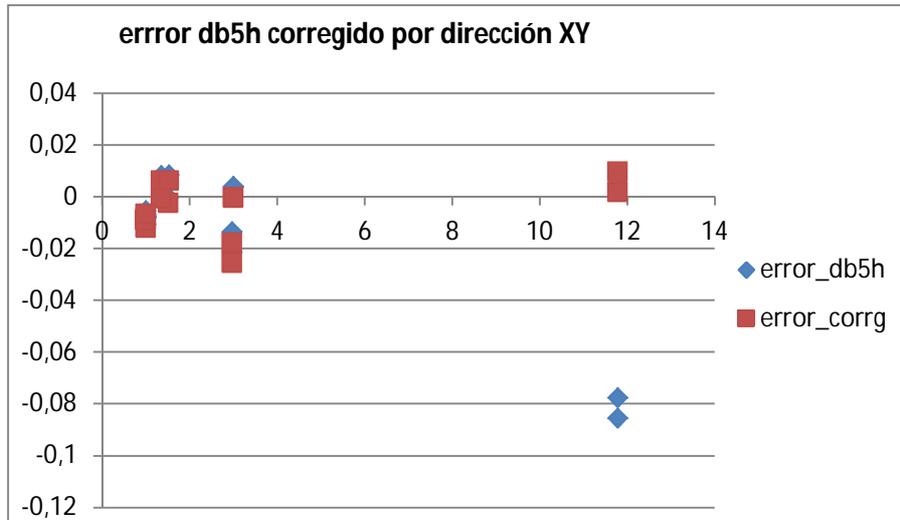
Gráficos A19, A20, A21. Gráficos de trompeta con errores inicial y corregido según método en DB3

- o DB2



Gráficos A22, A23, A24. Gráficos de trompeta con errores inicial y corregido según método en DB2

- DB5



**Gráficos A25, A26, A27.** Gráficos de trompeta con errores inicial y corregido según método en DB5