



**Universidad**  
Zaragoza

# Proyecto Fin de Carrera

## MODELADO Y COMPENSACIÓN DE ERRORES DE SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Autor

**Daniel Alierta Gazol**

Directores

**Jorge Santolaria Mazo**  
**Jesús Velázquez Sancho**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL / EINA**  
**SEPTIEMBRE 2012**



## **RESUMEN**

El objetivo principal de este proyecto es la compensación de los diversos errores geométricos que nos encontramos en la fabricación mediante impresoras 3D, muy utilizadas en prototipado rápido.

El proyecto se centra en los errores geométricos de la pieza (posición, angulares, rectitud, perpendicularidad). Para la corrección de estos errores se parte del modelo cinemático de la impresora y se va trabajando hasta llegar a la obtención de los errores cometidos.

Para llegar a la obtención de los errores se han utilizado dos aproximaciones. Por un lado tenemos la aproximación geométrica que se basa en la caracterización de los errores de cada eje por separado, independientemente del modelo cinemático de la máquina y de su secuencia de movimientos mediante la medición directa de los errores a compensar en unas posiciones determinadas de la máquina. Y por otro lado tenemos la aproximación.

Por otro lado tenemos la aproximación volumétrica, que es un proceso de identificación intensiva de parámetros a partir de un modelo de optimización no lineal mediante la medición indirecta de los errores de la máquina en su volumen de trabajo. La verificación volumétrica trabaja a partir de la medición del efecto conjunto de los errores geométricos en cada punto a partir del modelo cinemático de la máquina y el movimiento multieje de la misma.

Para llevar a cabo todo este trabajo, se realiza una breve introducción al prototipado rápido, se comenta la tecnología que utiliza nuestra impresora 3D EDEN 350V, se plantean diferentes prototipos a fabricar para poder tomar medidas en la máquina de medir por coordenadas, así como ensayos de deformación con el programa Ansys.

Por último se realiza una comparación de los dos métodos de obtención de errores y se sacan conclusiones de cual es mejor y del porqué minimiza mas esos errores, a la vez que se realiza una pequeña explicación de en qué consiste la compensación STL.



## **Índice**

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>6</b>
1.1 Justificación del proyecto.....	6
1.2 Objetivos y estructura del proyecto.....	8
<b>Capítulo 2. Prototipado Rápido. Diseño y estudio de la pieza a fabricar.</b>	<b>11</b>
2.1 Introducción.....	11
2.2 Material de impresión.....	14
2.3 Diseño de la pieza.....	16
2.4 Ensayos de deformación con Ansys.....	19
2.5 Object Studio.....	24
<b>Capítulo 3. Fotografías del proceso de construcción y medición.....</b>	<b>29</b>
3.1 Proceso de impresión de la pieza.....	29
3.2 Proceso de limpieza de la pieza.....	31
3.3 Proceso de medición de la pieza.....	33
<b>Capítulo 4. Verificación Geométrica.....</b>	<b>36</b>
4.1 Introducción.....	36
4.2 Modelo cinemático de la impresora 3D.....	38
4.3 Cálculo de errores geométricos.....	41
4.3.1 Cálculo de errores geométricos en el eje X.....	41
4.3.2 Cálculo de errores geométricos en el eje Y.....	43
4.3.3 Cálculo de errores geométricos en el eje Z.....	44
4.4 Resultados.....	46
<b>Capítulo 5. Verificación Volumétrica.....</b>	<b>67</b>
5.1 Introducción.....	67

5.2 Modelo volumétrico de la impresora 3D.....	69
5.3 Resultados.....	74
<b>Capítulo 6. Gráficas comparativas. Conclusiones.....</b>	<b>82</b>
6.1 Gráficas comparativas errores.....	82
6.1.1 Gráficas comparativas errores geométricos eje X.....	82
6.1.2 Gráficas comparativas errores geométricos eje Y.....	83
6.1.3 Gráficas comparativas errores geométricos eje Z.....	86
6.2 Conclusiones.....	92
<b>Capítulo 7. Sistema de compensación de errores sobre piezas STL.....</b>	<b>94</b>
7.1 Introducción.....	94
7.2 Compensación Global.....	97
7.3 Compensación de Slices.....	100
<b>Bibliografía.....</b>	<b>104</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo1. Ensayos de deformación con Ansys.....</b>	<b>108</b>
A.1.1 Original.....	109
A.1.2 Sin Refuerzos.....	121
A.1.3 Vaciados.....	124



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Justificación del proyecto

En un entorno de alta competitividad en un sector como el de la máquina-herramienta (MH), la precisión y la posibilidad de compensación de los errores es una diferencia competitiva entre fabricantes y usuarios de las mismas, adquiriendo especial relevancia en el mecanizado de precisión.

Ninguna máquina-herramienta es perfecta, ya que todos los ejes tienen algún fallo: los fallos de paso de husillo son muy típicos, lo mismo que un cierto combado en caso de ejes largos o inclinaciones en caso de estructuras muy altas. En todos estos casos se trata de fallos a los que los modernos controles CNC pueden dar respuesta mediante una serie de funciones especiales. No obstante, por lo general se realizan estas compensaciones por cada eje por separado. De este modo, no se tienen en cuenta otros fallos como las pequeñas desviaciones de la angularidad de los ejes entre sí, así como las ligeras torsiones. Muy a menudo estos fallos son eliminados mediante correcciones en el programa de CN, algo que implica la desventaja de que no es posible utilizar este programa en otra máquina antes de haberla adaptado.

Tradicionalmente, la verificación geométrica ha sido ampliamente utilizada en la verificación de MH y máquinas de medir por coordenadas (MMC). Ésta se basa en la caracterización de los errores de cada eje por separado, independientemente del modelo cinemático de la máquina y de su secuencia de movimientos mediante la medición directa de los errores a compensar en unas posiciones determinadas de la máquina.

El objetivo de este proyecto es adaptar los conocimientos que se tienen de la verificación de máquina-herramienta, a una impresora 3-D. Estas impresoras están sufriendo un boom en la actualidad debido al auge del prototipado rápido.

El Prototipado Rápido es una tecnología que posibilita producir modelos y prototipos directamente a partir del modelo sólido 3D generado en el sistema CAD. Al contrario de los procesos de fabricación que sacan material de la pieza en bruto para obtener el modelo deseado, los sistemas de Prototipado Rápido generan la pieza a partir de la unión aditiva de líquidos, capa por capa, a partir de secciones transversales de la pieza obtenidas a partir del modelo 3D, las máquinas de Prototipado Rápido producen piezas en plásticos, madera, cerámica o metales. Los datos para las máquinas de Prototipado Rápido son generados por los sistemas CAD en formato STL, que aproxima el modelo sólido por pequeños triángulos o facetas. Cuanto más pequeños sean éstos triángulos, mejor la aproximación de la superficie, al coste,



naturalmente, del mayor tamaño del archivo STL, y de tiempo de procesamiento. Una vez que el archivo STL es generado, las demás operaciones son ejecutadas por el propio programa que acompaña a las máquinas de Prototipado Rápido. Básicamente este programa realizara operaciones básicas de visualización y la generación de secciones transversales del modelo que será construido. Tales datos serán entonces transmitidos a la máquina que ira depositando sucesivas capas hasta que la pieza sea generada.

Básicamente las técnicas de Prototipado Rápido, tienen como objetivo el obtener de manera rápida y exacta una réplica tridimensional de los diseños que han sido generados mediante aplicaciones CAD en 3D.

Estos modelos físicos pueden ser únicamente estéticos y útiles en consecuencia para estudio de formas y estudio de la aceptación por el mercado potencial al que van dirigidos, o pueden cumplir con algunas o buena parte de los requerimientos mecánicos que tendría la pieza definitiva, ofreciendo en este caso la posibilidad de realizar pruebas funcionales e incluso de homologación antes de que existan ni siquiera los moldes preliminares.

La mayor o menor similitud que pudiera existir entre el modelo definitivo y el obtenido mediante las técnicas de prototipado rápido dependerán básicamente del sistema utilizado para su generación y de limitaciones dimensionales, de complejidad y de postprocesos aplicados.

El proyecto se ha realizado en el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza. Es un proyecto novedoso, ya que hace poco que se tiene la impresora en el departamento y nunca se había procedido a la corrección de errores de esta máquina.

Lo que si podemos considerar como trabajo previo, es todo lo que se ha trabajado en este departamento en el tema de verificación de máquina herramienta:

- Experiencia en verificación de máquina-herramienta (MH) con interferómetro laser y métodos tradicionales desde la década de los 80.
- Verificación de máquinas de medir por coordenadas (MMC) con patrones de esferas desde la década de los 90.
- Desarrollo de palpadores autocentrantes y métodos de verificación de MH con barras de esferas.
- Primeros estudios de diferentes métodos de verificación de MH de diferentes tamaños, especialmente grandes. Utilización de Láser Trackers (LT) en colaboración con la empresa Metromecánica: 2009.

## **1.2 Objetivos y estructura del proyecto**

El presente proyecto se sitúa como punto de partida en la verificación de las impresoras 3D, muy utilizadas en la fabricación por prototipado rápido. Por lo tanto se intentara adecuar todo lo conocido sobre verificación de máquina herramienta a nuestra impresora y poder así compensar los errores cometido por la máquina al fabricar la pieza.

Como el título indica, y como se ha explicado en el apartado anterior, el principal objetivo es la corrección de errores geométricos en una máquina utilizada en prototipado rápido, en particular, una impresora 3D EDEN 350V.

Las diversas tareas que se ha realizado en el proyecto son las siguientes:

- 1- Introducción al prototipado rápido, con una explicación de cuál es su cometido y de la tecnología que utiliza la impresora EDEN 350V. También se realizara una explicación de los materiales que utiliza la impresora y cuáles son sus características.
- 2- Definición y estudio del problema a resolver. Modelado y corrección de los 21 errores geométricos existentes en la impresora 3D (posición, alabeo, cabeceo...).
- 3- A partir de la formulación existente para la verificación de máquina herramienta se diseñará y construirá una pieza que permita calcular los errores. Se realizarán unos ensayos de deformación con Ansys y se calculara el coste de material para fabricar dicha pieza.
- 4- Realización de un modelo geométrico en base a la formulación habitualmente utilizada en la verificación de máquina herramienta.
- 5- Realización de un modelo volumétrico que permita la identificación de parámetros de error mediante optimización no lineal.
- 6- Comparación de resultados de las dos aproximaciones (geométrica y volumétrica) y conclusiones.
- 7- Se realizara una compensación STL, es decir, a partir de los resultados obtenidos se intentara corregir el STL original de la pieza a fabricar, para que al fabricarla salga sin errores.

Los programas que se van a utilizar para realizar este proyecto son: Solid Edge, Ansys, Matlab, Object Studio y Metrolog.



## **Capítulo 2. Prototipado Rápido. Diseño y estudio de la pieza a fabricar**

### **2.1 Introducción**

Prototipado rápido se puede definir como un grupo de técnicas que se usan para fabricar rápidamente y a escala un modelo de una pieza usando como origen un fichero CAD generado en un ordenador. Existen algunas ventajas e inconvenientes de estas tecnologías comparándolas con las más tradicionales basadas en la sustracción de material, en vez de adición como son estas.

En prototipado rápido, la máquina lee los datos de un fichero CAD que contiene el dibujo de la pieza, y la realiza mediante la adición de sucesivas capas de líquido o material en polvo, construyendo así la pieza a partir de un conjunto de secciones transversales. Estas capas se pegan o se funden entre ellas (mediante un láser en la mayoría de los casos) para crear la figura final. Una gran ventaja de estas tecnologías de adición es su habilidad para crear prácticamente cualquier geometría.

La palabra “rápido” es relativa, ya que la construcción de un modelo con las máquinas actuales suele costar entre 3 y 72 horas, dependiendo del tipo de máquina y del tamaño de la pieza que queremos obtener. Usado en micro tecnologías, “rápido” es correcto, los productos se hacen muy rápidamente y las máquinas pueden construir las piezas en paralelo.

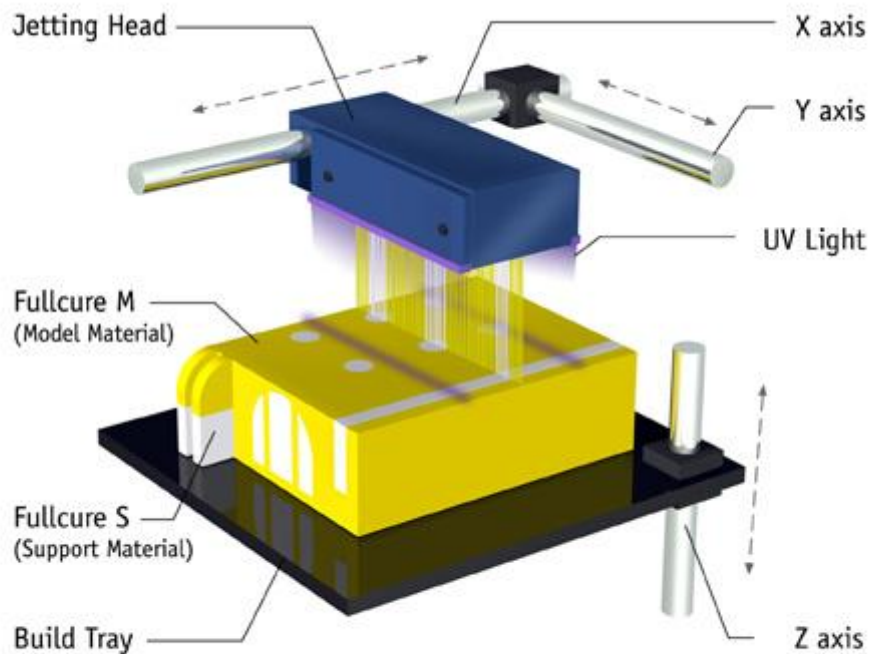
En el sector industrial, la productividad se consigue llevando una idea rápidamente al mercado y de la forma menos costosa posible, lo cual se consigue con el prototipado rápido. Con un modelo 3D se obtiene una mayor información del objeto a la vez que una mejor idea de él ya que se trata de una pieza real, por lo que es de gran ayuda para la fase de desarrollo del producto. El prototipado rápido es más rápido y económicamente mejor que los antiguos métodos de construcción de prototipos.

Los métodos de prototipado rápido líquidos se pueden dividir según el material usado:

- ❖ Fotopolímeros, que expulsan una resina líquida la cual solidificará mediante su exposición a una luz con una determinada longitud de onda.
- ❖ Termoplásticos, se inyecta material sólido que es fundido.
- ❖ Adhesivos

Estas tecnologías son capaces de crear piezas con pequeñas cavidades internas y complejas geometrías.

Entre las diferentes tecnologías existentes en prototipado rápido, en este proyecto, se va a utilizar una impresora que está basada en la tecnología Photopolymer Phase Change Inkjets.



### The Objet PolyJet Process

La compañía israelí Objet Geometries Ltd. Introdujo su primera máquina basada en la tecnología PolyJet™ a comienzos del año 2000. Se basa en fotorpolímeros, y usa un cabezal de inyección para expulsar el material de la pieza y el de soporte por el área de trabajo. Tras la deposición del material, se usa luz UV proveniente de una lámpara superior, para que el fotorpolímero reaccione y se endurezca. El material empleado como soporte también es un fotorpolímero, y una vez acabada la pieza, es eliminado con agua a presión.

Es una tecnología interesante, ya que ofrece especificaciones similares a la estereolitografía, aunque con un coste de tiempo mayor, pero con menor precio de sus impresoras. Las máquinas de la serie Objet's Eden son perfectas para oficina, con un espesor de capa de 16 micras que hace que las operaciones de acabado sean mínimas o incluso nulas en muchas ocasiones.

En julio de 2002, la empresa 3D Systems lanzó un sistema similar, llamado InVision™, también basado en fotorpolímeros, que usa la tecnología originalmente desarrollada por ThermoJet Modeler™. Una de las principales diferencias es que el material de soporte es cera, por lo que puede ser derretida con calor en vez de eliminada mediante agua. También existe una versión de mayor resolución de este método.

Los usuarios muestran su contento con la gran calidad de las piezas obtenidas y de comodidad de las máquinas al igual que de su tamaño, aunque en cuanto a las

características del modelo y de las propiedades del material sean peores que las de la estereolitografía. Sin embargo, estas tecnologías son recientes y seguramente en un tiempo se alcance un nivel similar al del SLA.

A finales de 2007, Objet anunció el sistema Connex500™, siendo la primera máquina capaz de usar dos materiales de fabricación al mismo tiempo. Esto permite producir piezas cuyas propiedades varían de unas partes a otras

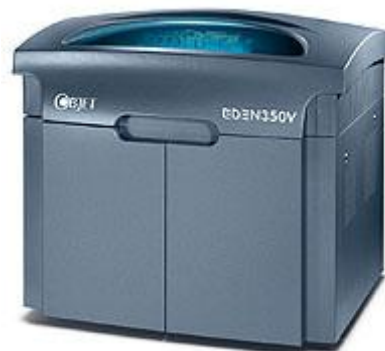
La impresora que se va a utilizar en el proyecto es una Objet Eden 350 V. Con los sistemas de impresión 3D de Objet tanto los ingenieros como los diseñadores pueden conseguir un prototipado rápido de alta resolución en el ámbito de oficinas. Basado en un software patentado, las impresoras 3D de Objet son la solución ideal para cualquier aplicación rápida de prototipado. Los sistemas de impresión se basan en la tecnología PolyJet™ y PolyJet matrix y funcionan con los sistemas de impresión 3D de piezas de múltiples materiales Objet FullCure y Objet Connex500 y Connex350.

Los sistemas de impresión 3D Eden ofrecen una rentabilidad de la inversión sin precedentes para aplicaciones profesionales de prototipado rápido. Las impresoras Eden imprimen con alta precisión (capas finas de 16µ) y producen modelos con detalles delicados y superficies lisas.

Los sistemas de impresión 3D Eden permiten seleccionar el mejor sistema para sus necesidades con respeto al tamaño de construcción, la productividad y la rentabilidad. Todos los sistemas Eden tienen un proceso de impresión limpio y por lo tanto son perfectamente adecuados para el ambiente de oficinas.

### **EDEN 350V**

<b>Technical Specifications</b>
<b>Tray size (X x Y x Z)</b> 350mm X 350mm X 200mm ( 13.8 X 13.8 X 7.9 inches )
<b>Print Resolution</b> X-axis: 600 dpi: 42 µ Y-axis: 600 dpi: 42 µ Z-axis: 1600 dpi: 16 µ
<b>Material Supported</b> Vero Family FullCure@720 VeroClear DurusWhite Tango Family VeroDent (only for Eden350V) MED610 (Rigid, biocompatible) Hearing Aids (only for Eden350)



<b>Input Format</b> STL and SLC File
<b>Machine Dimensions (W x D x H)</b> 1320mm x 990mm x 1200mm
<b>Machine weight</b> Net 410kg Gross (in crate) 500kg
<b>Operational Environment</b> Temperature 18°C to 25°C Relative Humidity 30-70%



## 2.2 Material de impresión

Los materiales FullCure de Objet se basan en materiales acrílicos y fotopolímeros que permiten construir modelos y piezas 3D de alta precisión con detalles finos para una amplia gama de aplicaciones de prototipado rápido.

La amplia gama de resinas Fullcure (incluye resinas transparentes, de color y opacas con propiedades rígidas) permite construir modelos que cumplen casi todos los requisitos de forma, función y textura. Combinando los materiales de soporte Fullcure con los materiales de modelo se puede conseguir geometrías muy complicadas como por ejemplo salientes y hendiduras.

Envasado en cartuchos herméticos de 2kg o 3.6kg, los materiales de soporte y modelo son muy seguros ya que hacen innecesario el contacto directo. El proceso de cargar y extraer los cartuchos es parecido a la instalación y la extracción de los cartuchos inkjet de impresoras de papel.

En este caso, el material que se ha utilizado es el FULLCURE 720, cuya tabla de características se muestra a continuación:



**FULLCURE 720**

PROPIEDAD		VALOR	UNIDADES
Color		Ámbar	
Densidad		1092	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength		60	MPa
Modulus of Elasticity		2870	MPa
Elongation at Break		20	%
Flexural Strength		76	MPa
Flexural Modulus		1718	MPa
Izod Notched Impact		24	J/m
Shore Hardness		83	Scale D
Rockwell Hardness		81	Scale M
HDT at 0.45 MPa		48	°C
HDT at 1.82 MPa		44	°C
Tg		49	°C
Ash Content		< 0,03	%
Water Absortion		1,53	%
Coefficient of Thermal Expansion	30-35°C	(34.6 ± 4.7) X 10 <sup>-6</sup>	m/m°C
	40-70°C	(60.8 ± 9.5) X 10 <sup>-6</sup>	m/m°C
	75-90°C	(104.4 ± 8.5) X 10 <sup>-6</sup>	m/m°C
	95-110°C	(122.2 ± 4.0) X 10 <sup>-6</sup>	m/m°C

**Ventajas Principales**

- Permite ver el flujo de líquidos y detalles internos
- No requiere ningún post procesamiento ya que los materiales están completamente tratados
- Estiramiento hasta un 20% habilitado para algunas operaciones funcionales
- Alta resistencia de impacto
- Los modelos se pueden tocar inmediatamente después de la construcción
- El material parecido a un gel es fácil de extraer y produce modelos de acabado liso
- Las superficies de los modelos absorben pintura fácilmente, sin necesidad de procesados adicionales
- El material de los modelos puede estar atornillado, cromado o usado como un molde

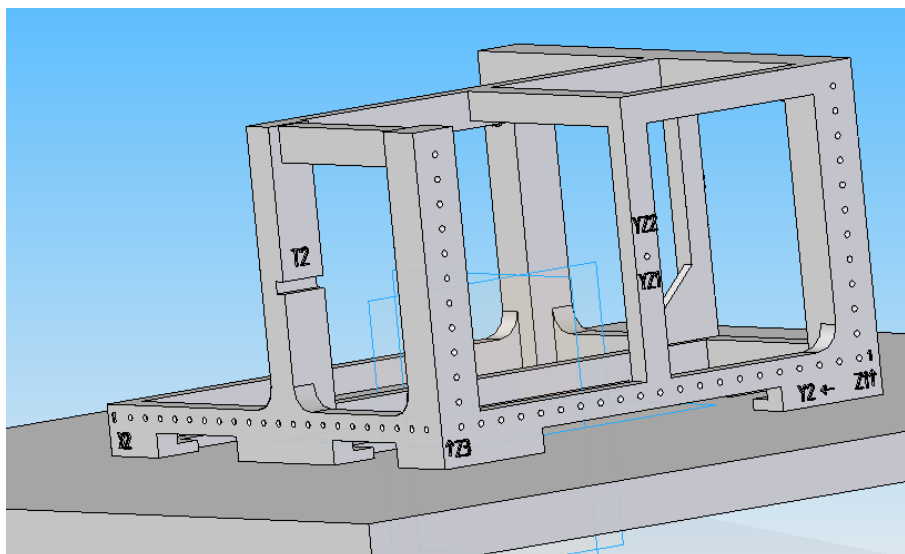
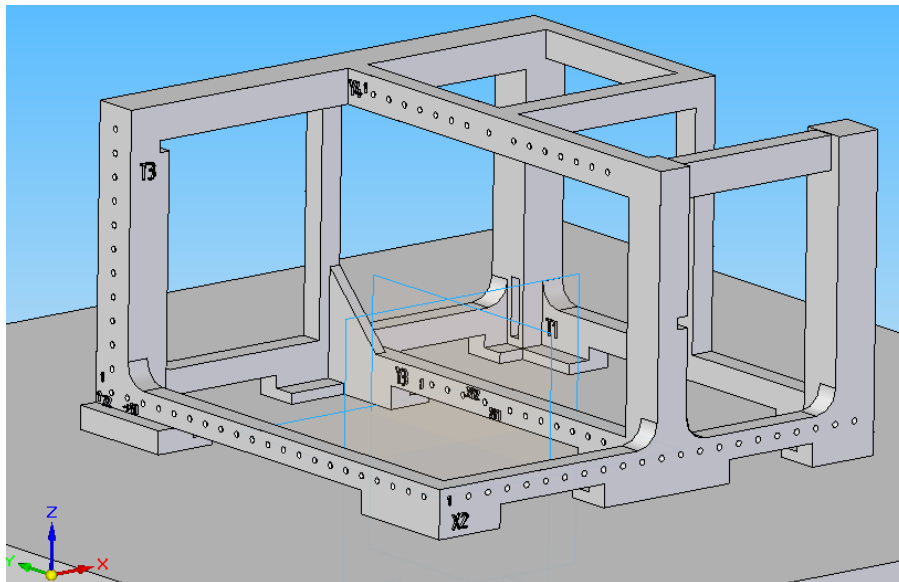
## 2.3 Diseño de la pieza

Debido al procedimiento que se va a llevar a cabo para calcular los errores, y ante la imposibilidad de montar objetos de medición en el cabezal de la impresora, se ha diseñado una pieza en la que se practican unos orificios en las diferentes barras y en las tres direcciones simulando el movimiento del cabezal. Los orificios son de forma cónica para que el palpador de la máquina de medir por coordenadas, con la opción de palpado autocentrante, capte exactamente y solo el punto centrado.

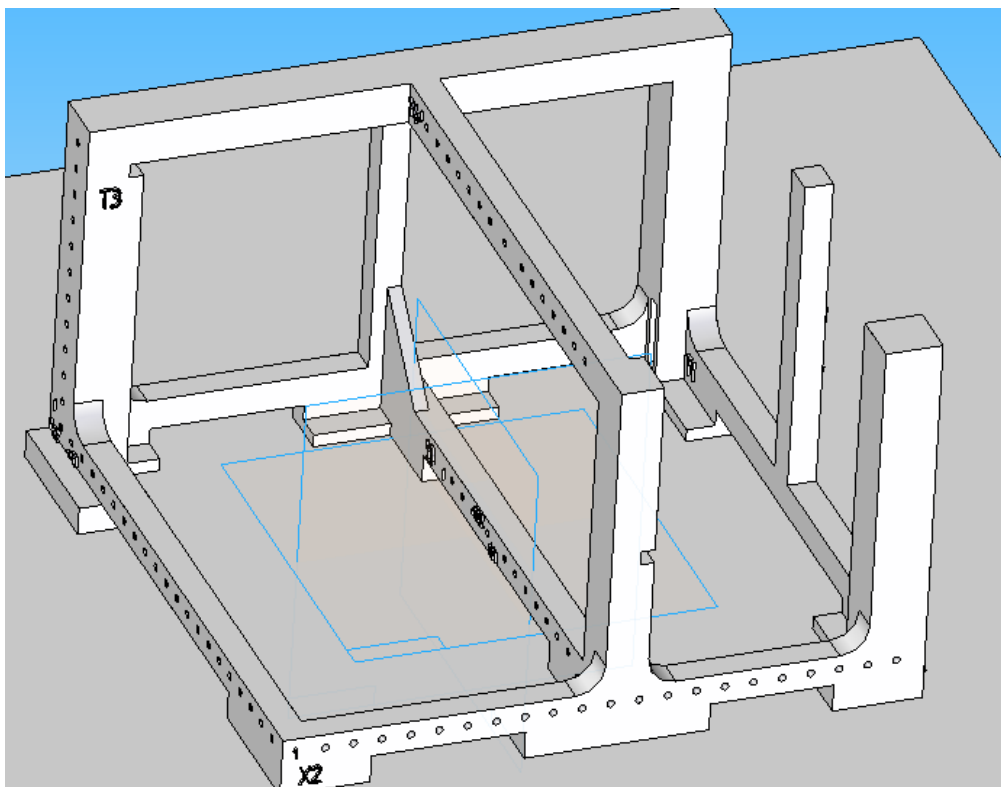
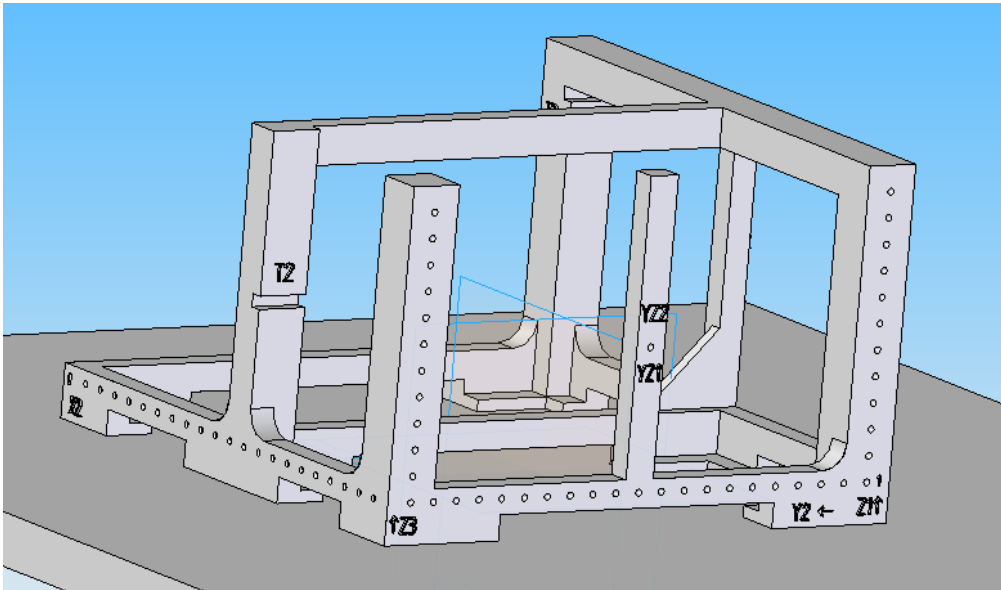
Se parte de una idea inicial, y después se han buscado dos alternativas para intentar ahorrar material, y por lo tanto, coste de fabricación. Las alternativas sugeridas han sido: quitar los refuerzos, y la otra, realizar vaciados.

A continuación se muestran imágenes de las tres opciones:

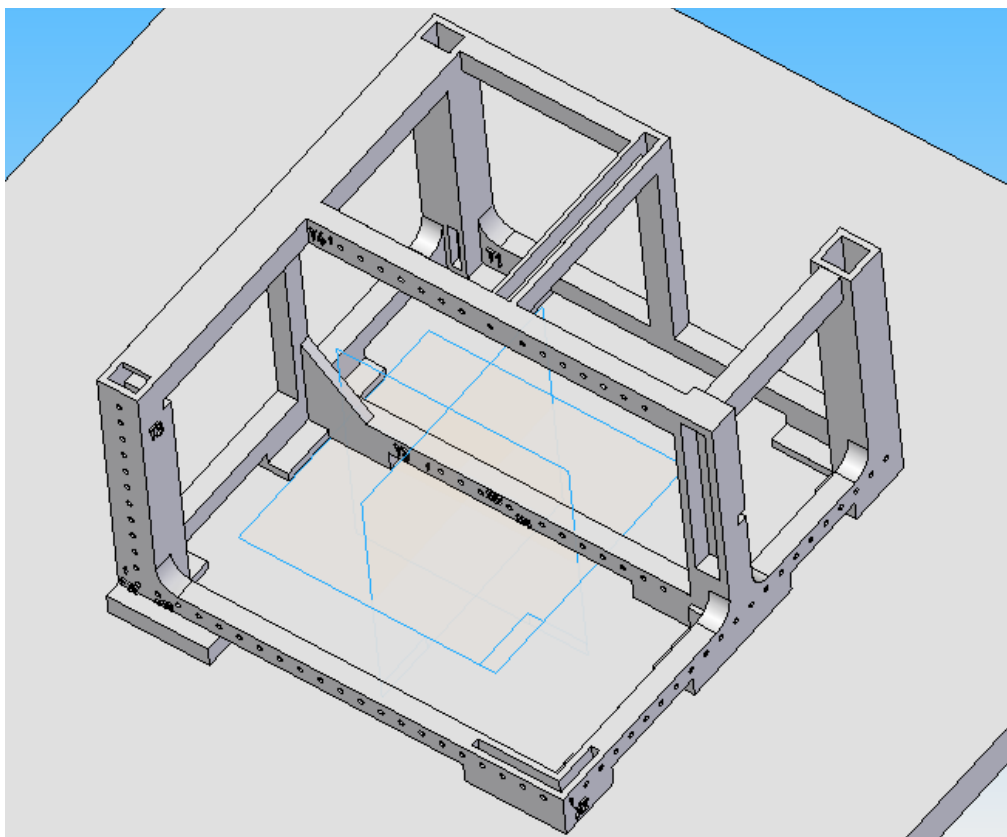
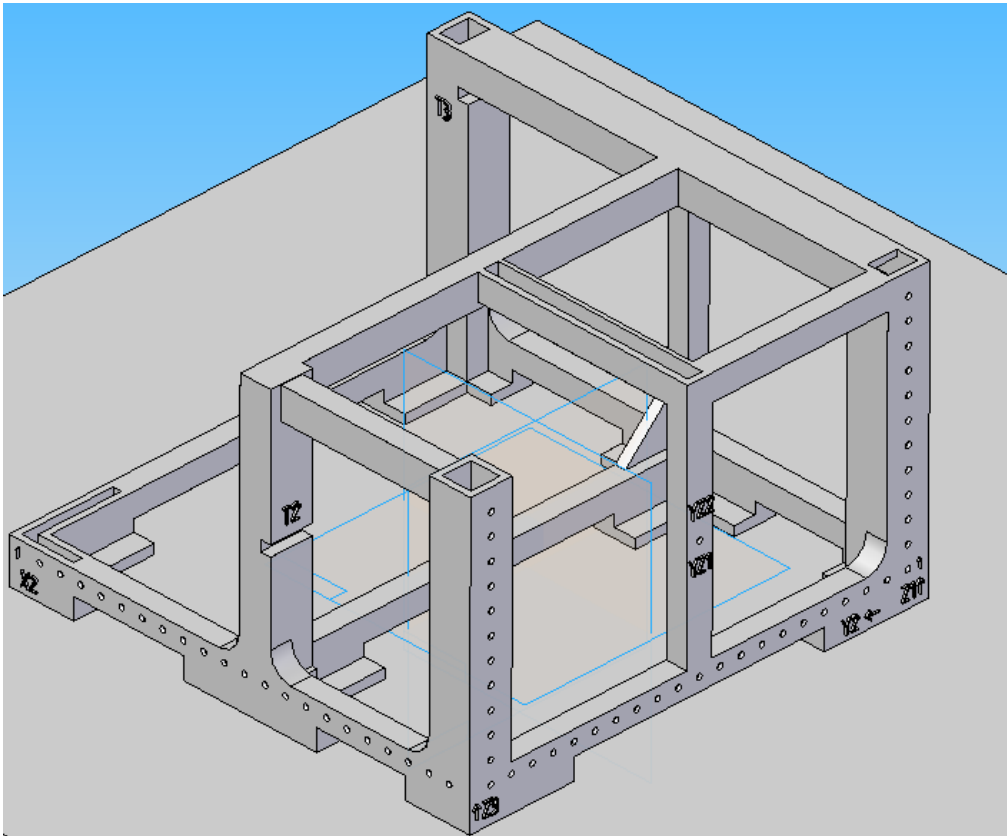
### 1. Pieza Original



2. Sin Refuerzos



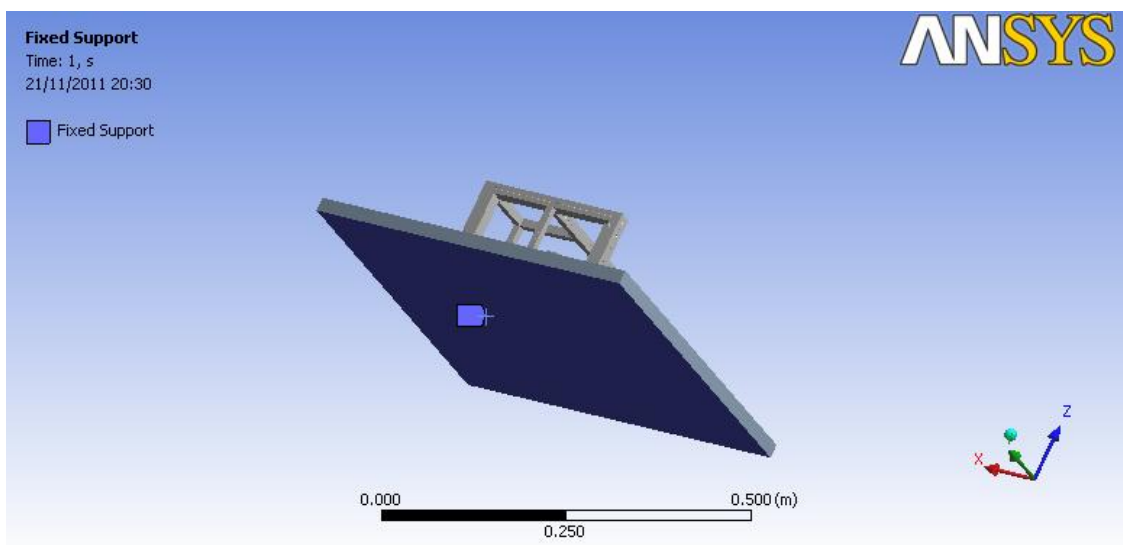
3. Con Vaciados y con Refuerzos



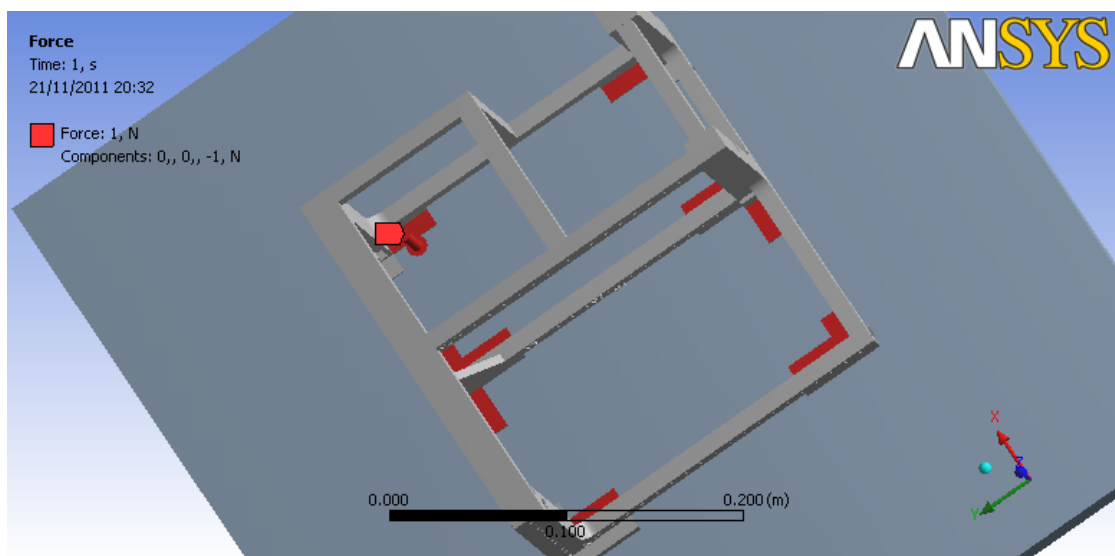
## 2.4 Ensayos de deformación con Ansys

A continuación se mostrarán las explicaciones de los ensayos de deformación y de coste y tiempo de fabricación, con la primera de las opciones. Es la que finalmente se ha decidido fabricar, debido al gran desconocimiento que se tiene del comportamiento de este material, y para poder evitar posibles deformaciones debidos a cambios de temperatura, hemos decidido fabricar la opción más rígida, es decir, la primera opción.

Una vez elegida la primera opción como pieza a fabricar, se va a realizar con el programa ANSYS, un estudio de posibles deformaciones que pueda experimentar la pieza al ser palpada en la máquina de medir por coordenadas.

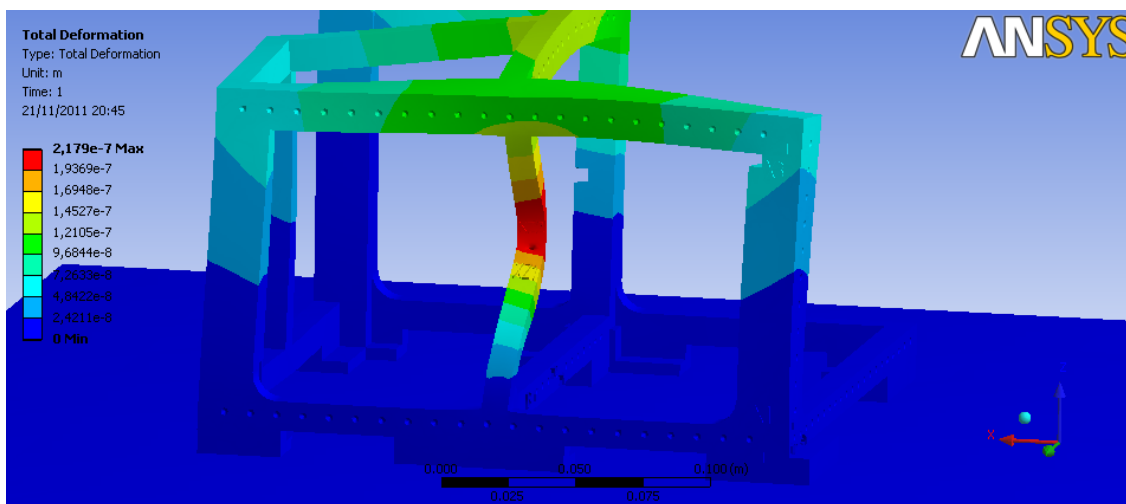
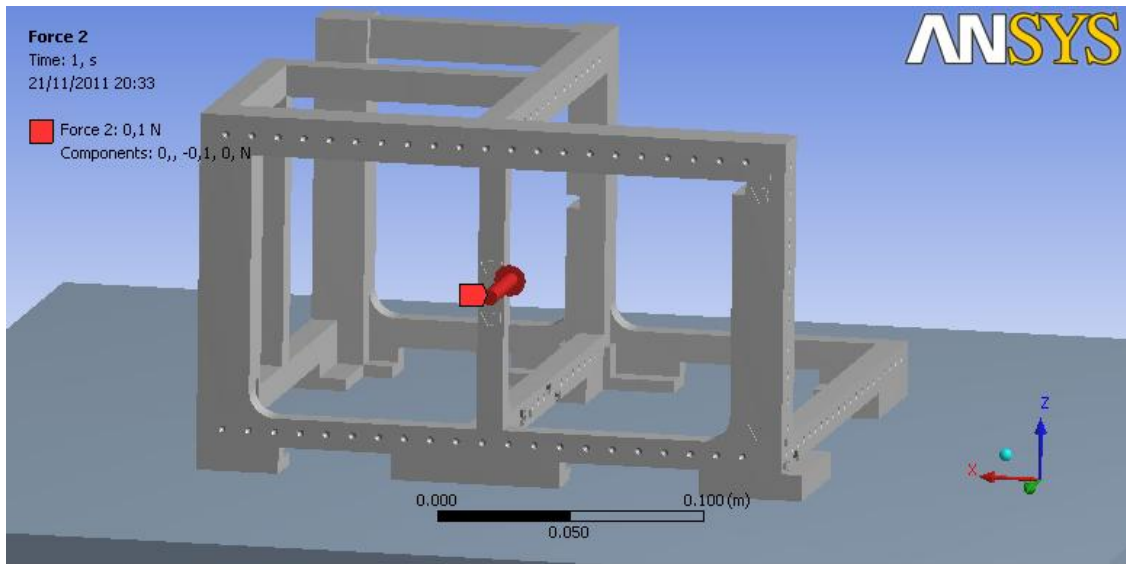


La premisa de la que se parte, es que la pieza no se puede deformar más de una micra al ser palpada. Para ello anclamos la pieza con ocho sujeciones de 1 Newton cada una:



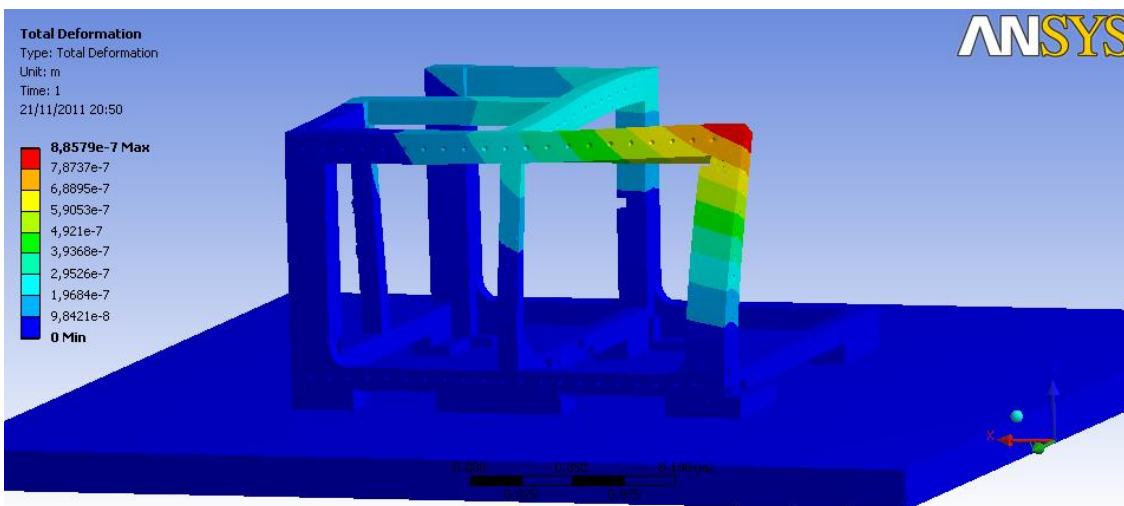
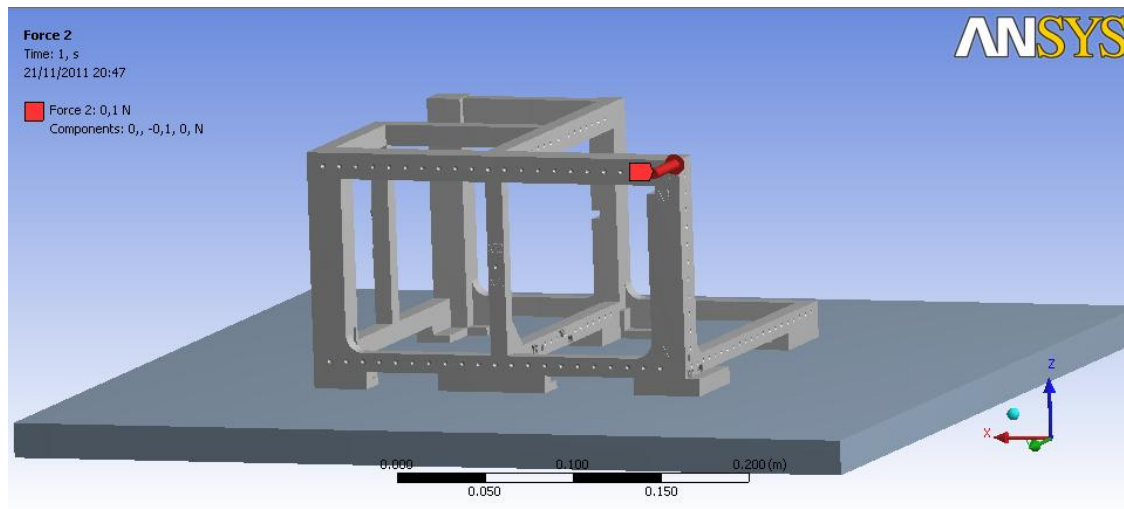
A continuación se realizan ensayos en distintos puntos de la pieza, aplicando fuerzas puntuales de un Newton y observando que la deformación que se experimenta es menos de 1 micrómetro.

- **1ª Simulación**



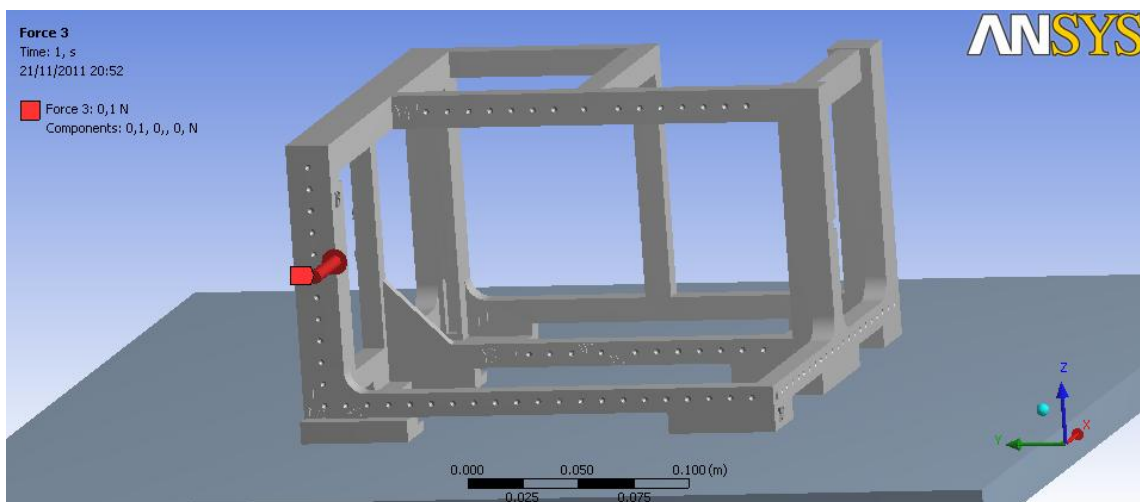
Deformación Máxima: **0,21 micras** → OK!!!

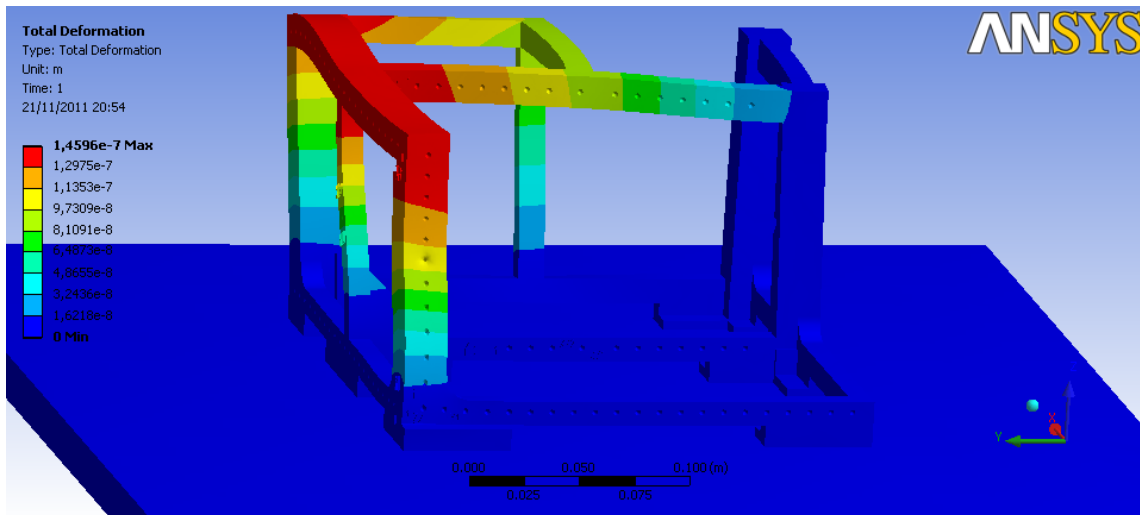
- 2ª Simulación



Deformación Máxima: **0,88 micras** → OK!!!

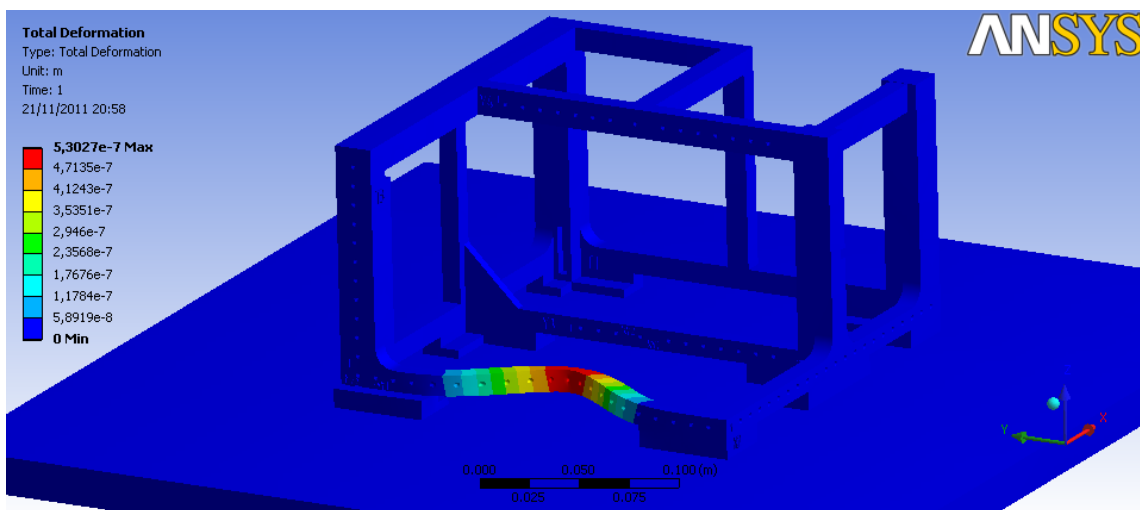
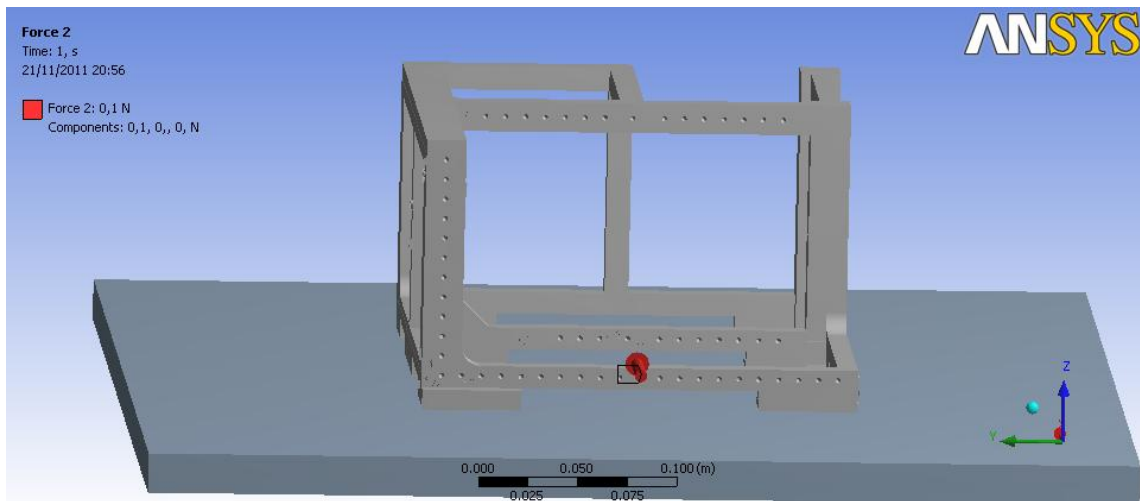
- 3ª Simulación





Deformación Máxima: **0,14 micras** → OK!!!

- **4ª Simulación**



Deformación Máxima: **0,53 micras** → OK!!!



El resto de simulaciones para este diseño, y para los otros dos se adjuntan en un anexo, ANEXO 1. Se puede comprobar que los tres diseños cumplen la especificación de que no se supere la deformación de un micrómetro.

Por lo tanto, ya se puede avanzar a la siguiente fase, que es la de calcular el coste de material y el tiempo de fabricación de la pieza en la impresora.

## 2.5 Objet Studio

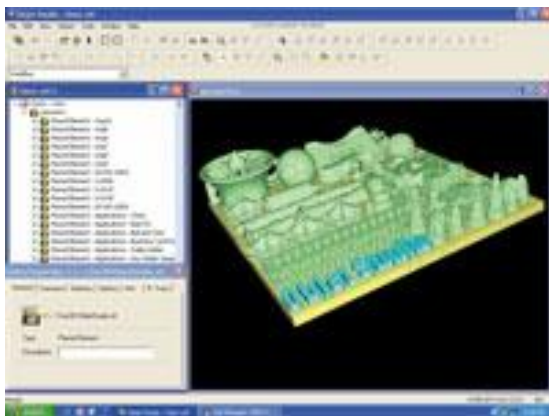
El software cliente/servidor Objet Studio™ proporciona una construcción de alta calidad y gran detalle, produciendo modelos de forma rápida y eficiente.

Desarrollado específicamente para la serie **Eden**, Objet Studio soporta ficheros STL y SLC a partir de cualquier aplicación CAD 3D. El software ofrece con un simple “click & build” la preparación y edición de la bandeja, suministrando una estimación del tiempo de trabajo y la propia gestión de la cola. Además, incluye asistentes que facilitan las tareas de mantenimiento.

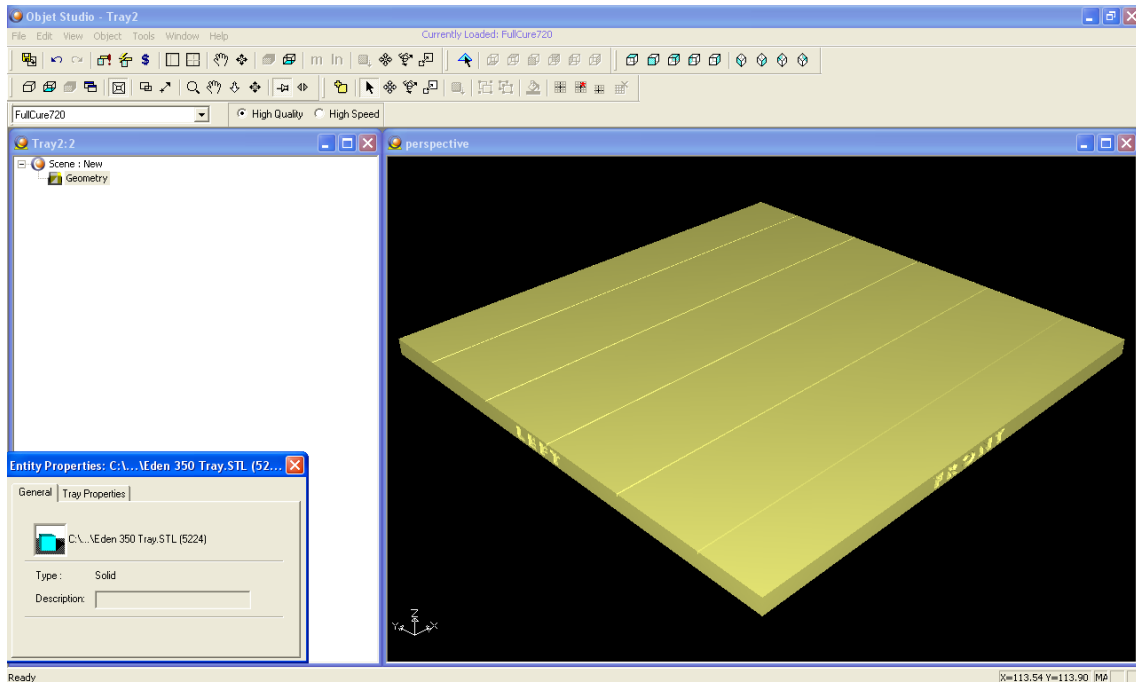
### Ventajas

- Generación automática de soporte
- Posibilidad de múltiples usuarios a través de la red
- Configuración simple de la bandeja de construcción
- El seccionado en tiempo real reduce drásticamente el tiempo de pre impresión
- Auto posicionamiento de la bandeja, asegurando un posicionamiento preciso y consistente
- Mantenimiento intuitivo, guiado por asistentes

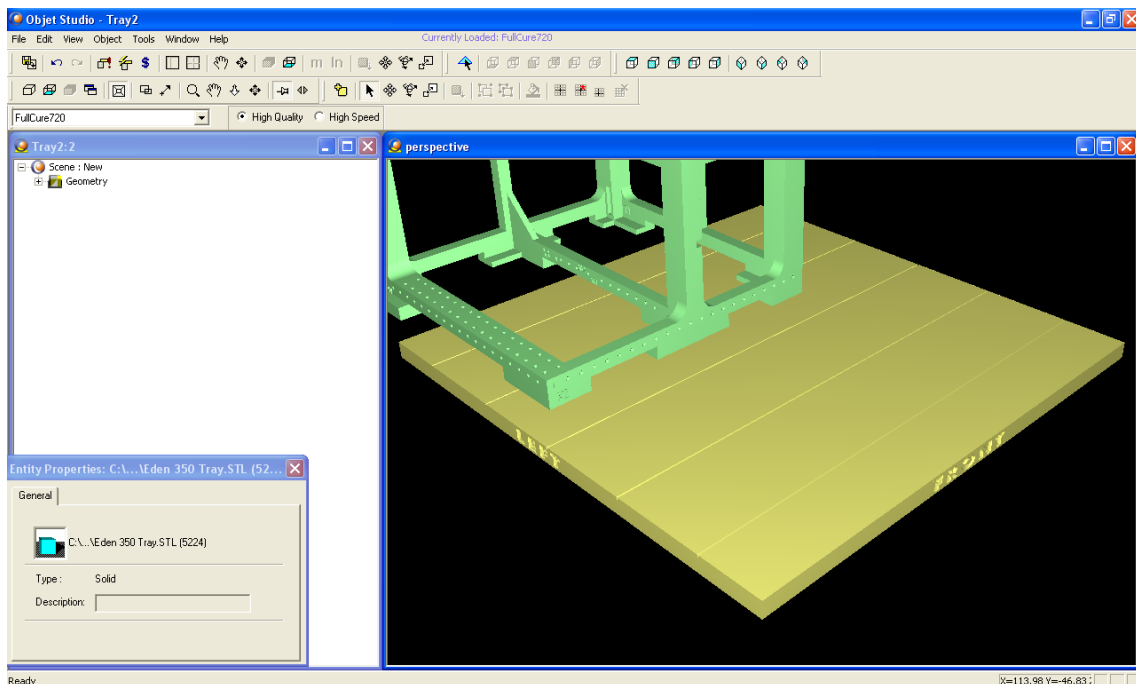
El software se compone de dos módulos: Objet Studio y Job Manager. Ambos se instalan en el puesto de trabajo servidor del sistema Eden y en cualquier puesto cliente. Esta operación posibilita el trabajo en paralelo y el envío de jobs desde cualquier ordenador de la red al servidor. Los jobs se colocan en cola de acuerdo a los parámetros configurados por el administrador del sistema, o en orden cronológico. La cola de jobs, es totalmente gestionable, cada usuario tiene acceso a sus propios jobs, y el administrador puede ajustar los parámetros y derechos de acceso.



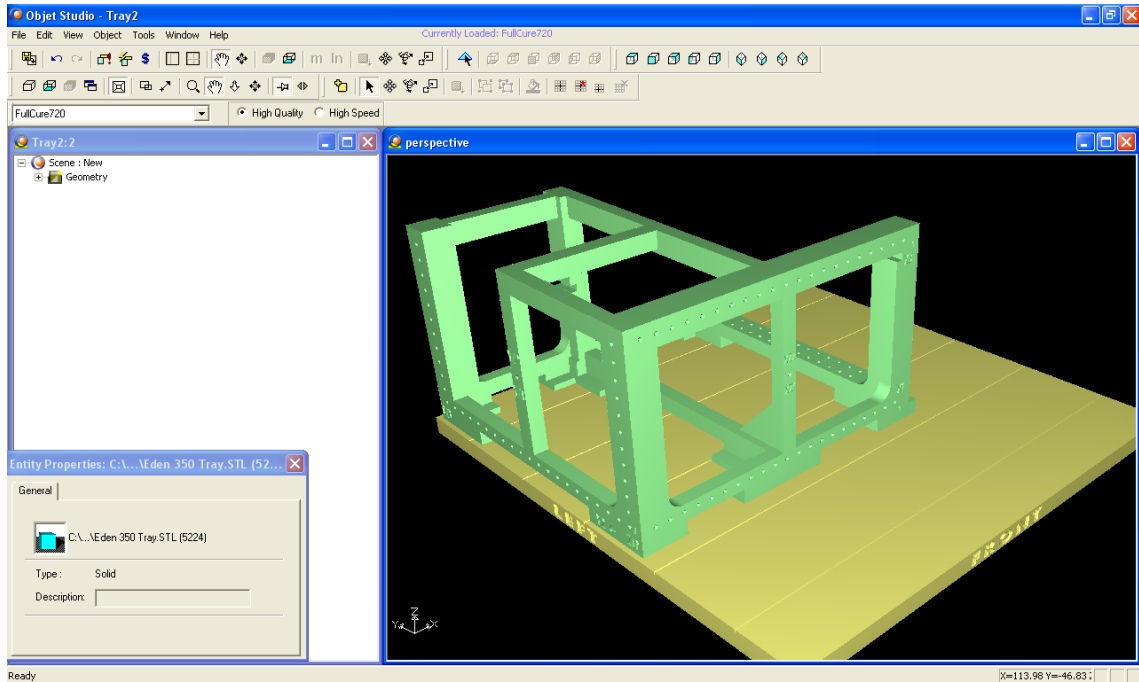
Objet Studio, una vez importada la pieza, y colocada en la mesa de trabajo, te informa sobre la cantidad de material de fabricación y de material de soporte, así como el tiempo de fabricación de la pieza. A continuación y con el ejemplo de la pieza original, se describirán los paso a seguir.



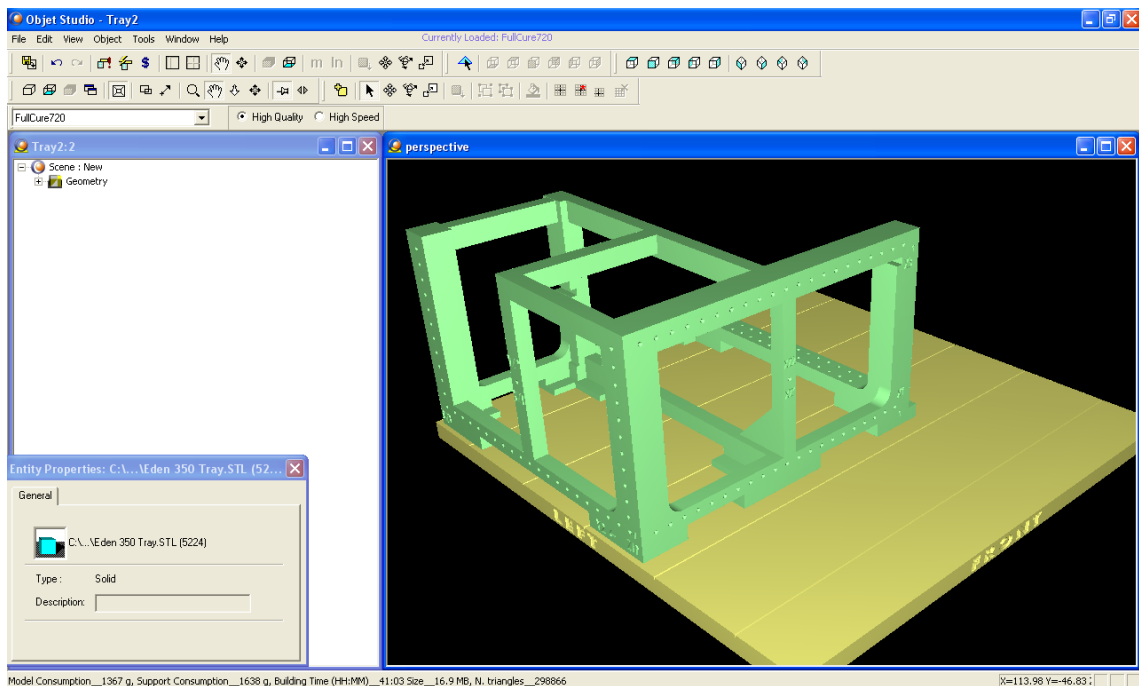
1º → Importamos la pieza



2º → Colocamos la pieza de tal manera en la que se consuma menor material, y una vez situada, será como se fabricada en la impresora



3º → Calculamos el gasto de material y el tiempo de fabricación



Model Consumption\_\_1367 g, Support Consumption\_\_1638 g, Building Time (HH:MM)\_\_41:03 Size\_\_16.9 MB, N. triangles\_\_298866

Consumo de material de modelo: 1367 gramos

Consumo de material de soporte: 1638 gramos

Tiempo de fabricación: 41 horas y 3 minutos

Los comandos que hemos utilizado en el software son los siguientes:



AUTOMATIC PLACEMENT: Coloca la pieza de la mejor manera posible.



TRAY VALIDATION: Comprueba que todo está correcto.



STIMATE CONSUMPTIONS: Estima el gasto de material y el tiempo de fabricación.

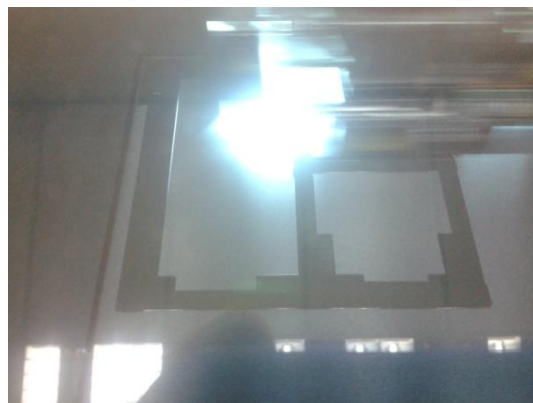


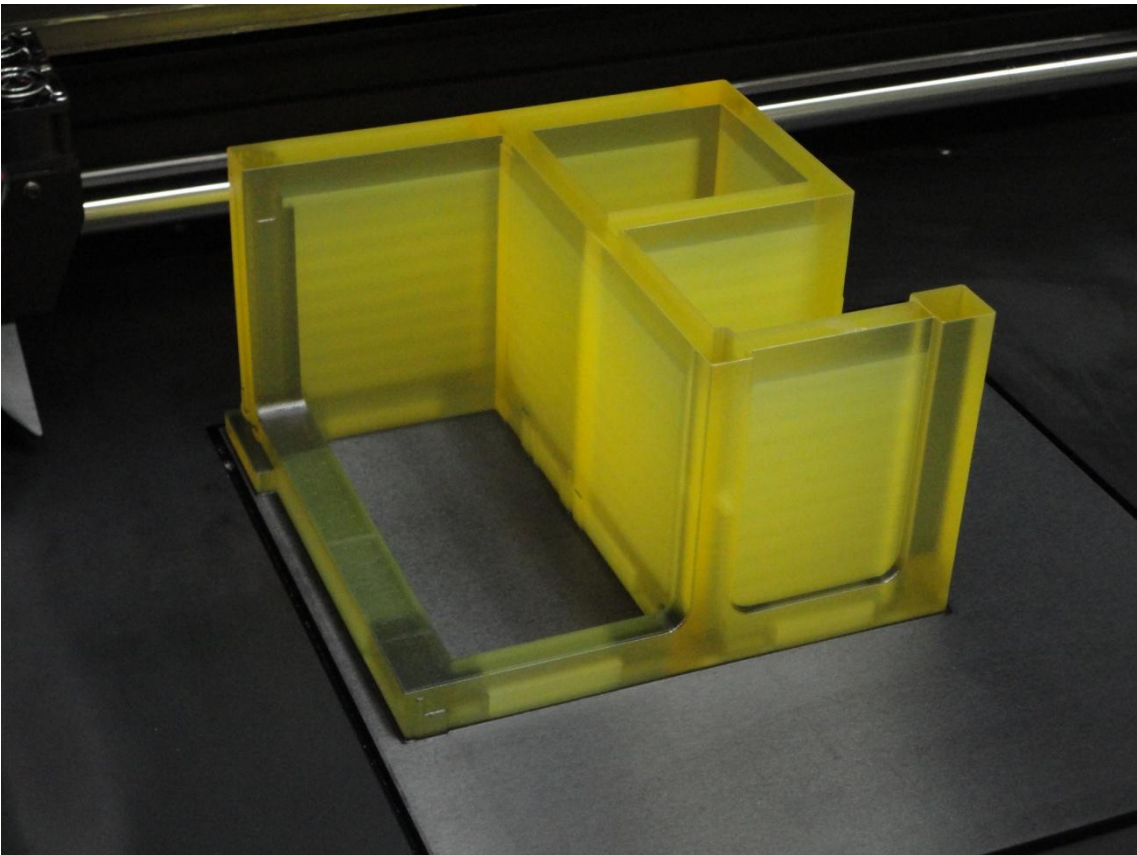
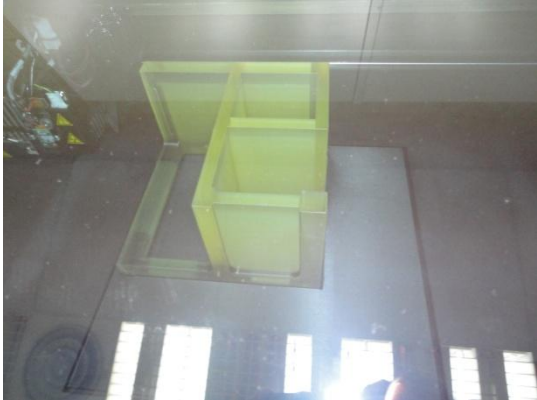
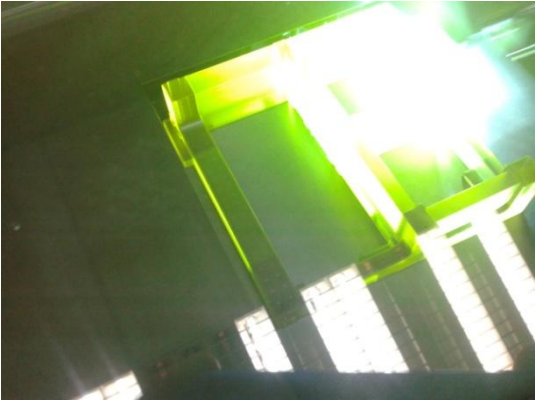
## **Capítulo 3. Fotografías del proceso de Construcción y Medición**

En este capítulo se van a mostrar diversas imágenes de cómo se imprimió la pieza en la impresora 3D, como se procedió a su posterior limpieza y finalmente, como se midieron los puntos con la máquina de medir por coordenadas.

### **3.1 Proceso de impresión de la pieza**

En las imágenes que van a aparecer a continuación se va a observar como la impresora va depositando capa a capa el material, y como la pieza modelo va creciendo en vertical. Cuando acabe este proceso se verá la pieza acabada completamente y preparada ya para eliminar el material de soporte.

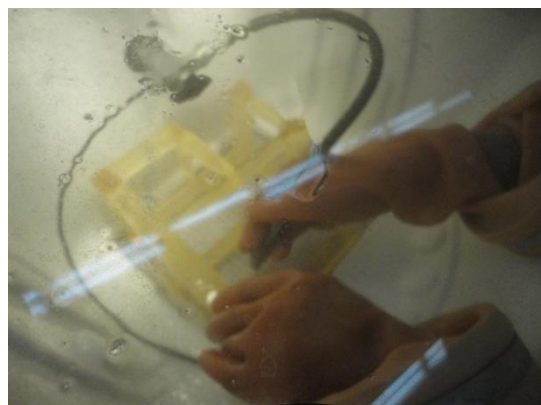
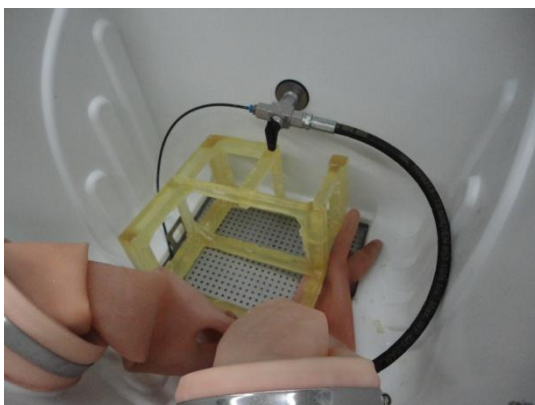


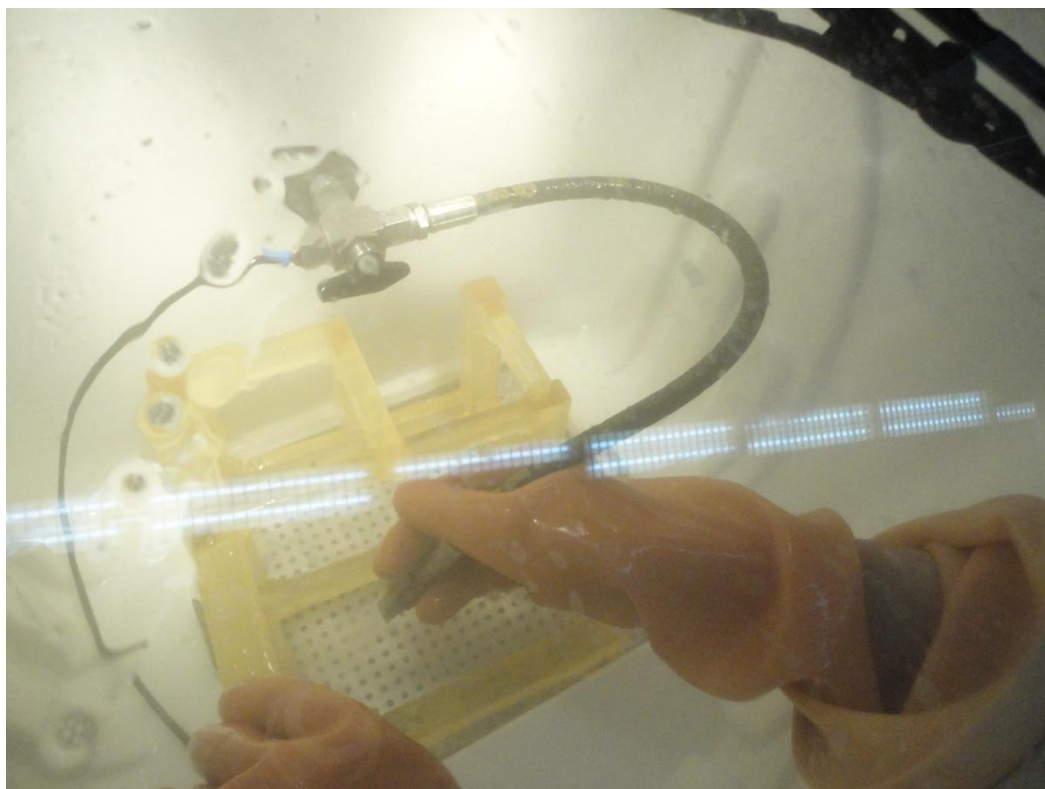




### **3.2 Proceso de limpieza de la pieza**

En este apartado se van a mostrar imágenes de cómo se ha eliminado el material sobrante en una máquina que impulsa agua a presión. Es muy importante para que la medición sea lo más real posible, que todo el material sobrante sea eliminado, por ello, y para poder eliminar bien todo el material de los agujeros cónicos, se procedió a meter la pieza en una cuba con sosa.

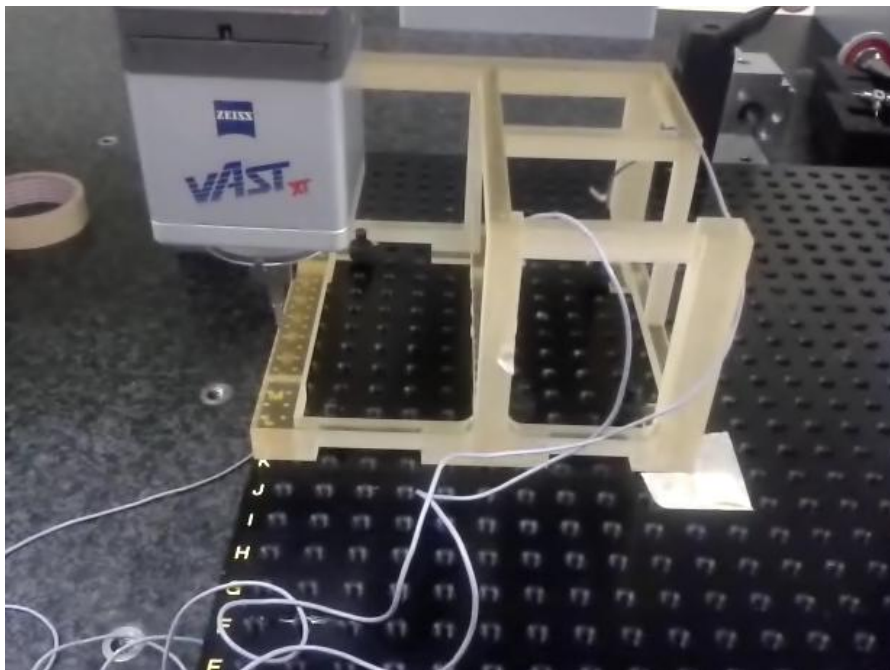




### **3.3 Proceso de Medición de la pieza**

En este apartado se muestran las imágenes del proceso de medida de la pieza con la máquina de medir por coordenadas. Se utilizaron cinco posiciones distintas de palpador para poder acceder a todas las filas de agujeros cónicos de la pieza, sin tener que mover la pieza de su posición de anclaje.

La pieza se ancló a la bancada mediante plastilina y unas pinzas que sujetaban unos pequeños salientes de la pieza que ya se fabricaron pensando en el amarre para su medición.







## Capítulo 4. Verificación Geométrica

### 4.1 Introducción

La verificación geométrica tiene por finalidad, controlar las posiciones de los órganos, ejes o trayectorias de la máquina. Constituye una verificación de la máquina en estado estático y mediante análisis detallado permiten establecer un verdadero diagnóstico de la disposición geométrica del conjunto.

Sin embargo, máquinas geoméricamente correctas, no producen necesariamente un trabajo aceptable, en razón principalmente de las vibraciones debidas a engranajes defectuosos o mal montados, o a defectos de construcción tales como apoyos imperfectos de carros, no revelados por las verificaciones geométricas.

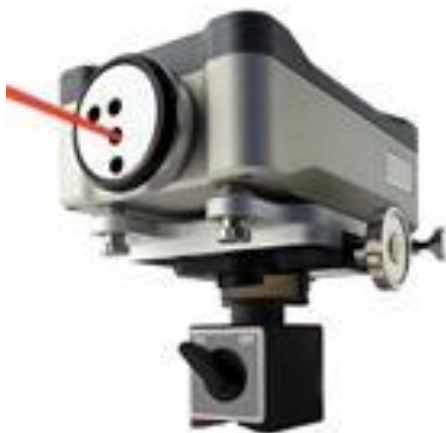
La correcta ejecución de la verificación geométrica es larga y, sobre todo, no está al alcance de todos los talleres. Para efectuarlas es necesario disponer de determinado material metrológico, saber emplearlo e interpretar los resultados obtenidos.

Tradicionalmente, la verificación geométrica ha sido ampliamente utilizada en la verificación de máquina herramienta y máquinas de medir por coordenadas. Ésta se basa en la caracterización de los errores de cada eje por separado, independientemente del modelo cinemático de la máquina y de su secuencia de movimientos mediante la medición directa de los errores a compensar en unas posiciones determinadas de la máquina.

La extrapolación de las funciones obtenidas mediante este método de trabajo al resto del volumen de trabajo es un proceso complejo. La verificación geométrica es un proceso lento y costoso en máquinas de grandes dimensiones.

Los métodos de medida más habituales en esta verificación son los siguientes:

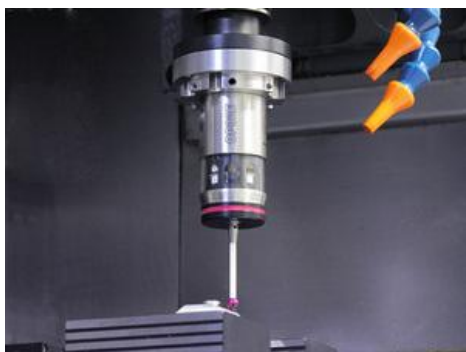
- Interferómetro Laser



- Nivel Electrónico



- Palpadores Autocentrantes

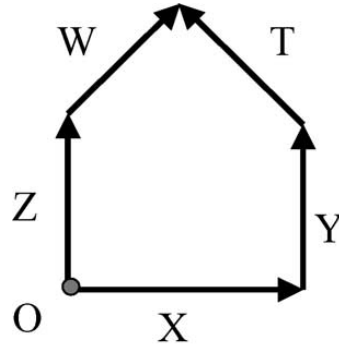


- Ball- Bar (Barras de Bolas)



## 4.2 Modelo cinemático de la Impresora 3D

Los ensayos experimentales se han realizado en el taller del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (Universidad de Zaragoza) en una impresora 3D EDEN 350 V. La configuración de la máquina según sus movimientos corresponde a ZFXY. Donde el eje delante de la F muestra el movimiento de la pieza de trabajo con respecto a la base, y los ejes detrás de la F muestran las direcciones de movimiento disponible del cabezal con respecto a la base. En nuestro caso, el cabezal de la impresora se mueve en los ejes X e Y, y la mesa de trabajo se mueve de arriba abajo en el eje Z.



Esquema cinemático de movimiento

Siguiendo la cadena cinemática de los ejes de la máquina se construye el modelo de error de movimiento de ésta. Igualando los dos caminos por los que podemos llegar a la punta del cabezal y teniendo en cuenta los errores de rotación de los ejes X, Y y Z:

$$\bar{Z} + \bar{R}^{-1}(Z)\bar{W} = \bar{X} + \bar{R}^{-1}(Z)\bar{Y} + \left(\bar{R}^{-1}(X)\bar{R}^{-1}(Y)\right)\bar{T}$$

Despejando  $\bar{W}$  se obtiene la siguiente ecuación:

$$\bar{W} = \bar{R}(Z)\bar{X} + \bar{R}(Z)\bar{R}^{-1}(X)\bar{Y} - \bar{R}(Z)\bar{Z} + \left(\bar{R}(Z)\bar{R}^{-1}(X)\bar{R}^{-1}(Y)\right)\bar{T}$$

$\bar{T}$  = Vector del offset del palpador.

$\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{Z}$  = Vectores de los errores lineales de los ejes de la máquina.

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} X + XTX \\ XTY \\ XTZ \end{pmatrix}, \quad \bar{Y} = \begin{pmatrix} YTX - XWY * Y \\ Y + YTY \\ YTZ \end{pmatrix}, \quad \bar{Z} = \begin{pmatrix} ZTX - ZWX * Z \\ ZTY - ZWY * Z \\ Z + ZTZ \end{pmatrix},$$

$$\bar{T} = \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix}, \quad \bar{W} = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}$$



$\bar{R}(u)$  = La matriz de los errores de rotación de los ejes según el eje u.

$$R(u) = \begin{bmatrix} 1 & URZ & -URY \\ -URZ & 1 & URX \\ URY & -URX & 1 \end{bmatrix}$$

$$R^{-1}(u) = \begin{bmatrix} 1 & -URZ & URY \\ URZ & 1 & -URX \\ -URY & URX & 1 \end{bmatrix}$$

Sustituyendo las ecuaciones y despejando se puede generalizar una expresión vectorial del modelo de cálculo para la corrección de errores geométricos de la máquina ZFX Y mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{W} = \bar{V} + \bar{E} \text{ Siendo } \bar{E} = \bar{P} + \bar{A} * \bar{V} + \bar{A}_p * \bar{T}$$

$\bar{E}$  = Vector error para una posición de ref.  $\bar{V}$  de la máquina y un offset de la herramienta  $\bar{T}$ .

$\bar{T}$  = Vector del offset del palpador.

$\bar{V}$  = Vector de posición de la máquina.

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$\bar{P}$  = Matriz de errores de traslación.

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} XTX + YTX - ZTX \\ XTY + YTY - ZTY \\ XTZ + YTZ - ZTZ \end{bmatrix}$$

$\bar{A}$  = Matriz de errores de rotación del vector de error en la posición definida por  $\bar{V}$ .

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -XWY - XRZ + ZRZ & ZWX + ZRY \\ -ZRZ & 0 & ZWY - ZRX \\ ZRY & XRX - ZRX & 0 \end{bmatrix}$$

$\bar{A}_p$  = Matriz de errores de rotación del vector de error en la posición  $\bar{T}$ .

$$\bar{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & -XRZ - YRZ + ZRZ & XRY + YRY - ZRY \\ XRZ + YRZ - ZRZ & 0 & -XRX - YRX + ZRX \\ -XRY - YRY - ZRY & XRX + YRX - ZRX & 0 \end{bmatrix}$$

En definitiva, en un punto cualquiera de la máquina, una ecuación vectorial en la que se suman los errores debidos a la traslación y a la rotación (como multiplicación de matrices de rotación por vectores de posición y de palpado), y que engloba los 21 términos que representan el error relativo entre la herramienta y la mesa de la MH.

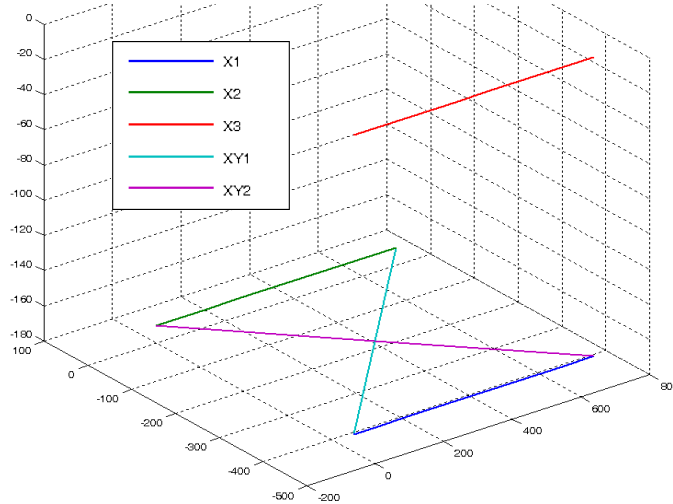
Entonces los pasos que se van a seguir para la medición y corrección de los errores son los siguientes:

- Por un lado tenemos los puntos nominales, y por otro los puntos medidos con la MMC, a los que se les ha realiza un cambio de base para evitar posibles errores al tomar el sistema de coordenadas con la MMC. Restando a los puntos medidos los nominales, se obtiene el residuo inicial.
- Luego introduciríamos los puntos medidos y los nominales a nuestras formulas de errores geométricos (que se desarrollan en el siguiente apartado) y obtendríamos los errores de máquina.
- Los opuestos de estos errores los introducíamos en el modelo y se lo aplicaríamos a los puntos medidos para obtener los puntos corregidos y sacar el residuo final entre puntos nominales y corregidos.
- Por otro lado también con los opuestos de los errores obtenidos se podría aplicar a los puntos nominales para sacar los puntos para fabricar pieza definitiva.

### 4.3 Cálculo de errores geométricos

#### 4.3.1 Cálculo de errores geométricos en el eje X

Para estimar los errores del eje X, se toman posiciones de diferentes puntos de 5 trayectorias lineales (3 paralelas al eje a medir y dos diagonales al plano de la base).



Esquema de trayectorias para calcular errores del eje X.

Los errores de rumbo y cabeceo son evaluados midiendo la diferencia de posición, entre dos líneas paralelas al eje de movimiento, dividido por la distancia entre ellas. En la anotación, X, Y y Z son las coordenadas del punto de cada una de las líneas. Por ejemplo  $X_{1i}(Y)$  representa el valor de la coordenada Y en la posición i de la línea 1 del eje de movimiento X.

Cabeceo  $XRY$ : rotación del eje Y que afecta la posición del eje X. Para calcular este error se evalúan los errores diferenciales de posición divididos por las distancias que separan las barras.

$$XRY = \left( \frac{X_{3i}(X) - X_{1i}(X)}{X_{3cali}(Z) - X_{1cali}(Z)} \right)$$

Rumbo  $XRZ$ : rotación del eje Z que afecta la posición del eje X. Para calcular este error se evalúan los errores diferenciales de posición divididos por las distancias que separan las barras.

$$XRZ = - \left( \frac{X_{2i}(X) - X_{1i}(X)}{X_{2cali}(Y) - X_{1cali}(Y)} \right)$$

Posición *XTX*: error de posición del eje X. Se mide evaluando diferentes posiciones, sobre el eje a medir. En cada posición se corrige los errores de cabeceo y rumbo anteriormente calculados y se comparan con las posiciones teóricas o calibradas a las que la máquina debería haber ido.

$$XTX = \frac{\left( (X_{1i}(X) - X_{1cali}(X) + (XRZ * X_{1cali}(Y))) + (X_{2i}(X) - X_{1cali}(X) + (XRZ * X_{2cali}(Y))) + (- (XRY * Z2P)) \right)}{2}$$

Vuelco *RRX*: Rotación del eje X que afecta al mismo eje. Para calcular este error, primero se tiene que corregir la desviación de planitud de la mesa de la MH. Esta corrección es realizada por la medición de puntos en 2 diagonales de la mesa (*XY1* y *XY2*). Una vez corregidas las posiciones  $X_{2i}(Zcorr)$  el error es calculado como la diferencia de rectitudes divididas por su distancia.

$$RRX = - \left( \frac{X_{1i}(Z) - X_{2i}(Zcorr)}{X_{2cali}(Y) - X_{1cali}(Y)} \right)$$

Por último los errores de rectitud son evaluados en las barras paralelas a los ejes una vez corregidos los errores de giro multiplicados por las distancias de la barra al eje de coordenadas respectivo. Se van a mostrar las ecuaciones simplificadas, para obtener la ecuación completa bastaría con realizar las mismas operaciones con las barras X2 y X3 y realizar el promedio de las tres barras.

*XTZ*: Rectitud del eje X en la dirección del eje Z.

$$XTZ = \left( X_{1cal}(Z) - X_{1i}(Z) - (RRX * X_{1cali}(Y)) - ZRY(X_{1cali}(Z)) * X_{1cali}(X) + ZRX(X_{1cali}(Z)) * X_{1cali}(Y) \right)$$

*XTY*: Rectitud del eje X en la dirección del eje Y.

$$XTY = \left( (X_{1i}(Y) - X_{1cal}(Y)) + ZRZ(X_{1cali}(Z)) * X_{1cali}(X) \right) + RRX * Z2P$$

### 4.3.2 Cálculo de errores geométricos en el eje Y

Cabeceo  $YRX$ : rotación del eje X que afecta la posición del eje Y. Para calcular este error se evalúan los errores diferenciales de posición divididos por las distancias que separan las barras.

$$YRX = - \left( \frac{Y_{4i}(Y) - Y_{3i}(Y)}{Y_{3cali}(Z) - Y_{4cali}(Z)} \right)$$

Rumbo  $YRZ$ : rotación del eje Z que afecta la posición del eje Y. Para calcular este error se evalúan los errores diferenciales de posición divididos por las distancias que separan las barras.

$$YRZ = - \left( \frac{Y_{1i}(Y) - Y_{2i}(Y)}{Y_{1cali}(X) - Y_{2cali}(X)} \right)$$

Posición  $YTY$ : error de posición del eje Y. Se mide evaluando diferentes posiciones, sobre el eje a medir. En cada posición se corrige los errores de cabeceo y rumbo anteriormente calculados y se comparan con las posiciones teóricas o calibradas a las que la máquina debería haber ido.

$$YTY = ((-Y_{cal}(Y) + X_{1i}(Y) + (YRZ * Y_{1i}(Y))) + (-Y_{2cal}(Y) + X_{2i}(X) + (YRZ * Y_{2i}(Y))) + (-Y_{1cal}(Y) + Y_{4i}(Y) + (YRX * Z_{2i}(P))))/3$$

Vuelco  $YRY$ : Rotación del eje Y que afecta al mismo eje. Para calcular este error, primero se tiene que corregir la desviación de planitud de la mesa de la MH.

$$YRY = - \left( \frac{Y_{2i}(Zcorr) - Y_{1i}(Zcorr)}{Y_{1cali}(X) - Y_{2cali}(X)} \right)$$

Por último los errores de rectitud son evaluados en las barras paralelas a los ejes una vez corregidos los errores de giro multiplicados por las distancias de la barra al eje de coordenadas respectivo. Se van a mostrar las ecuaciones simplificadas, para obtener la ecuación completa bastaría con realizar las mismas operaciones con las barras Y2, Y3 e Y4 y realizar el promedio de las tres barras.

$YTX$ : Rectitud del eje Y en la dirección del eje X.

$$YTX = \left( Y_{1i}(X) - Y_{1cali}(X) - ZRZ(Y_{1cali}(Z)) * Y_{1cali}(Y) + XRZ(Y_{1cali}(X)) * Y_{1cali}(Y) \right)$$

YTZ: Rectitud del eje Y en la dirección del eje Z.

$$YTZ = \left( (Y_{1cali}(Z) - Y_{1i}(Z)) + XRX(Y_{1cali}(X)) * Y_{1cali}(Y) + ZRX(Y_{1cali}(Z)) * Y_{1cali}(Y) \right) + XRY * Y1P$$

#### 4.3.3 Cálculo de errores geométricos en el eje Z

Rumbo ZRY: rotación del eje Y que afecta la posición del eje Z. Para calcular este error se evalúan los errores diferenciales de posición divididos por las distancias que separan las barras.

$$ZRY = - \left( \frac{Z_{1i}(Z) - Z_{2i}(Z)}{Z_{1cali}(X) - Z_{2cali}(X)} \right)$$

Cabeceo ZRX: rotación del eje X que afecta la posición del eje Z. Para calcular este error se evalúan los errores diferenciales de posición divididos por las distancias que separan las barras.

$$ZRX = - \left( \frac{Z_{3i}(Z) - Z_{1i}(Z)}{Z_{3cali}(Y) - Z_{1cali}(Y)} \right)$$

Posición ZTZ: error de posición del eje Z. Se mide evaluando diferentes posiciones, sobre el eje a medir. En cada posición se corrige los errores de cabeceo y rumbo anteriormente calculados y se comparan con las posiciones teóricas o calibradas a las que la máquina debería haber ido.

$$ZTZ = \left( Z_{1i}(Z) - Z_{1cali}(Z) + (ZRY * Z_{1cali}(X)) - (ZRX * Z_{1cali}(Y)) + Z_{2i}(Z) - Z_{1cali}(Z) + (ZRY * Z_{2cali}(X)) - (ZRX * Z_{2cali}(Y)) \right) / 2$$

Vuelco ZRZ: Rotación del eje Z que afecta al mismo eje. Para calcular este error, primero se tiene que corregir la desviación de planitud de la mesa de la MH.

$$ZRZ = \frac{- \left( \left( \frac{Z_{3i}(Xcorr) - Z_{1i}(X)}{Z_{3cali}(Y) - Z_{1cali}(Y)} \right) + \left( \frac{Z_{1i}(Y) - Z_{2i}(Ycorr)}{Z_{1cali}(X) - Z_{2cali}(X)} \right) \right)}{2}$$

Por último los errores de rectitud son evaluados en las barras paralelas a los ejes una vez corregidos los errores de giro multiplicados por las distancias de la barra al eje de coordenadas respectivo. Se van a mostrar las ecuaciones simplificadas, para

obtener la ecuación completa bastaría con realizar las mismas operaciones con las barras Z2 y Z3 y realizar el promedio de las tres barras.

*ZTX*: Rectitud del eje Z en la dirección del eje X.

$$ZTX = (Z_{1cali}(X) - Z_{1i}(X)) + ZRZ * Z_{1cali}(Y) + ZRY * Z_{1cali}(Z)$$

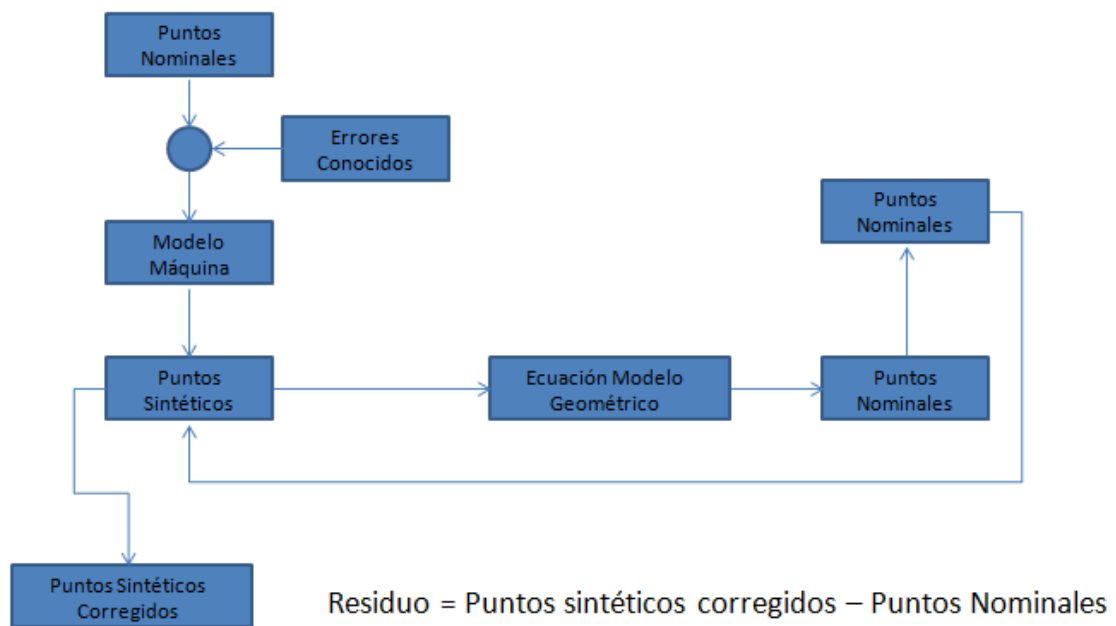
*ZTY*: Rectitud del eje Z en la dirección del eje Y.

$$ZTY = (Z_{1cali}(Y) - Z_{1i}(Y)) + ZRZ * Z_{1cali}(X) + ZRX * Z_{1cali}(Z)$$

#### 4.4 Resultados

Como desconocemos si el método funciona o no, lo que primero vamos a hacer es verificar su funcionalidad. Para ello partimos de los puntos nominales, a los que les introducimos un error conocido. Después de hacer esto aplicamos el modelo expuesto anteriormente y se obtienen unos puntos sintéticos.

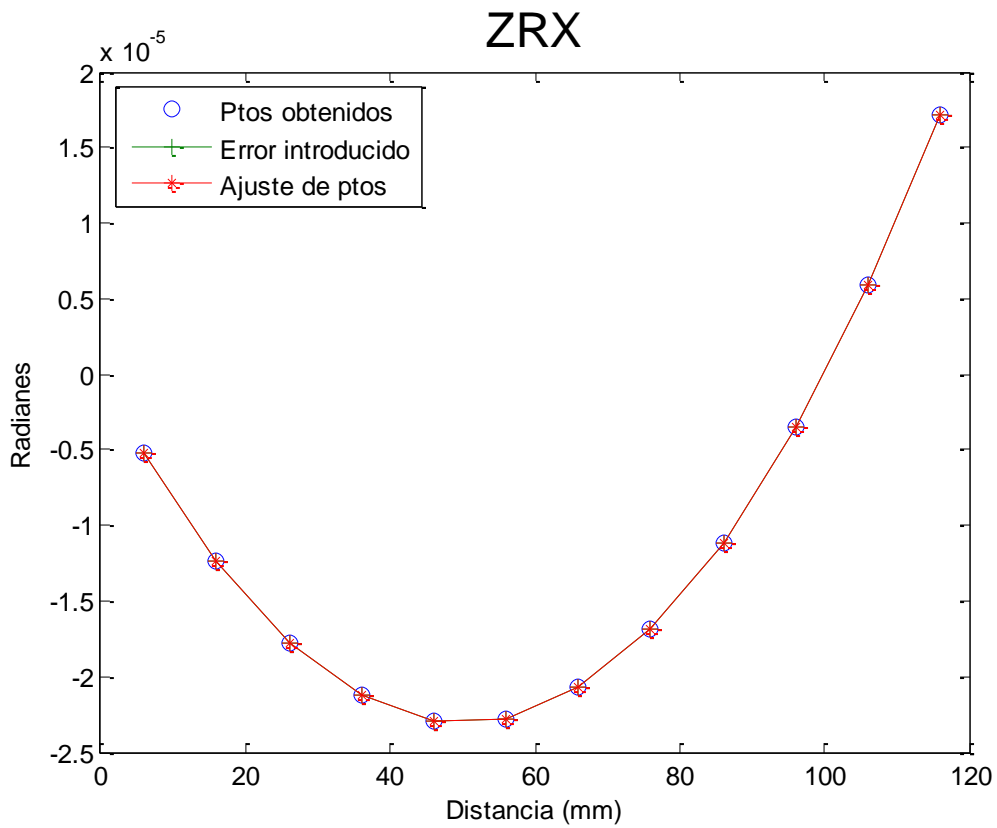
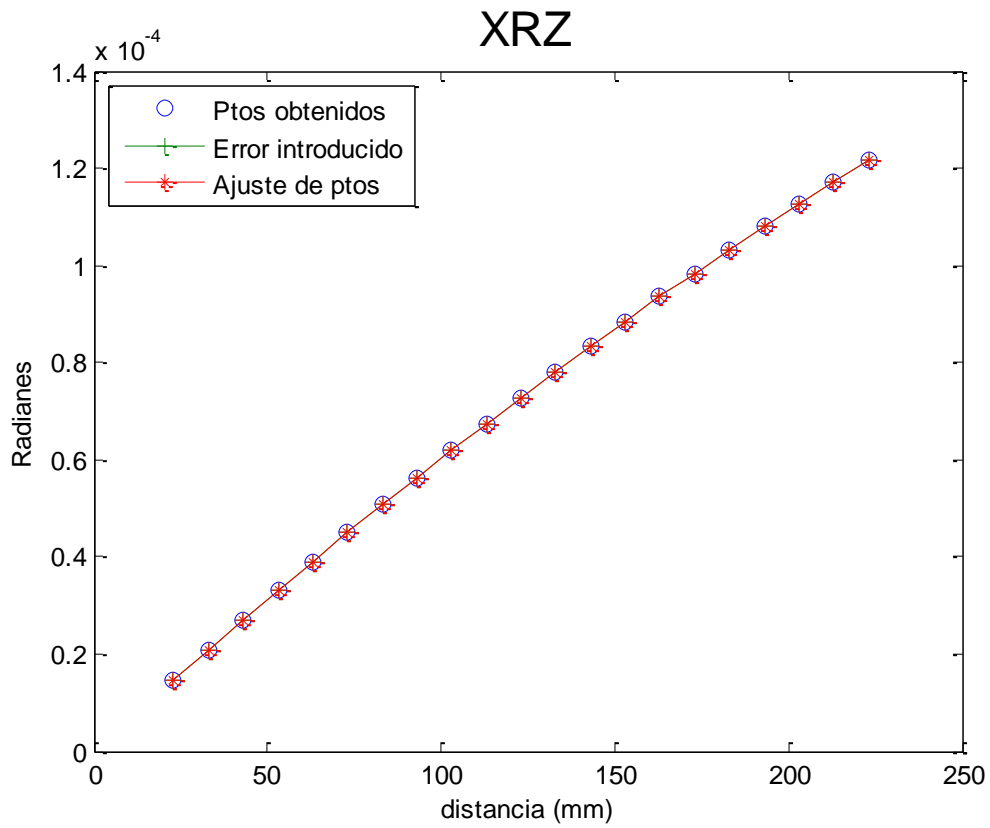
Con estos puntos sintéticos y los puntos nominales podemos obtener los errores de la máquina a partir de las ecuaciones del modelo geométrico. Si estos errores obtenidos coinciden con los errores que hemos introducido al principio será que el método funciona perfectamente.

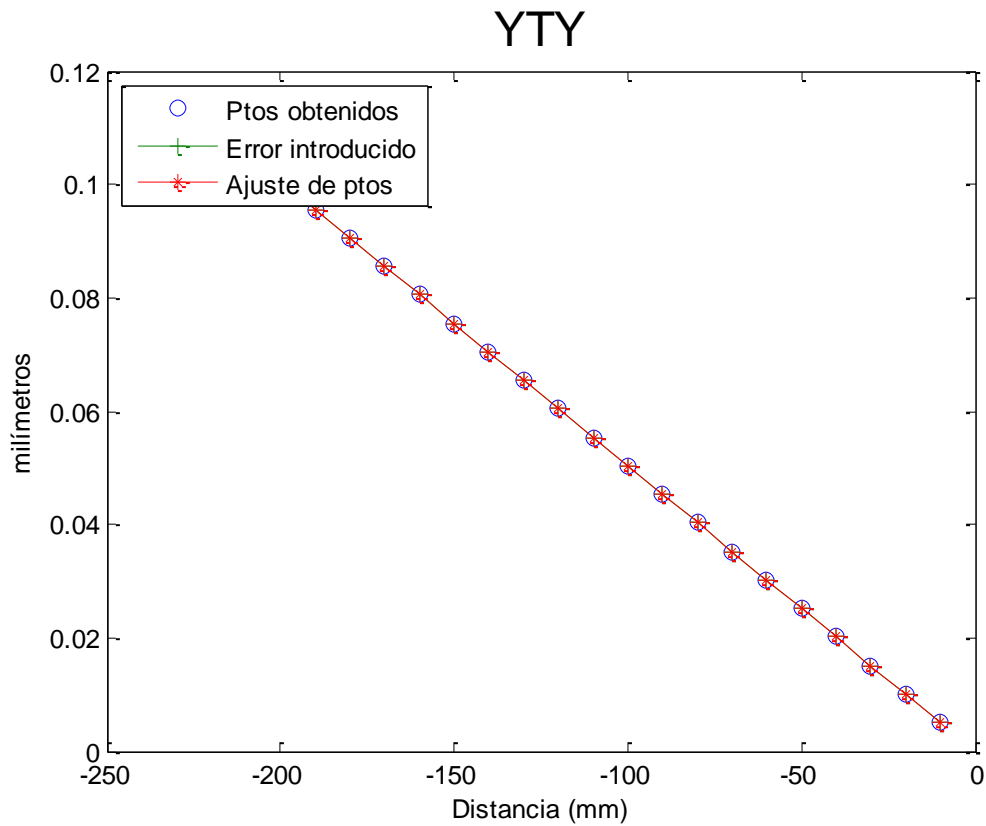


Esquema del funcionamiento de la verificación geométrica

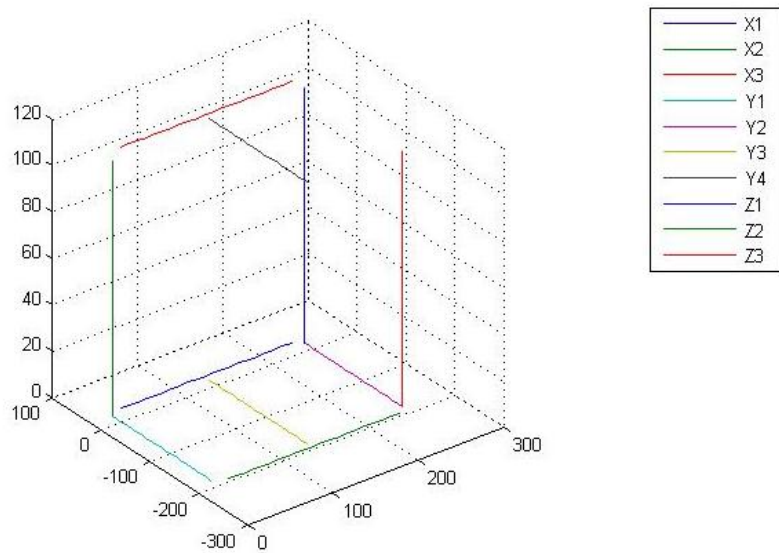
Entonces, esta es la secuencia que seguimos nosotros antes de empezar a medir la pieza, y como se puede comprobar en las gráficas que se muestran a continuación, los errores obtenidos coinciden con los errores introducidos al principio.







Una vez comprobado que el método funciona, se procede a medir con la MMC los puntos fabricados en la pieza, para así, junto a los puntos nominales y las ecuaciones de los errores, poder obtener los errores.



Los puntos nominales de los que partimos son los siguientes:

X	Y	Z
X1		
23,0000	0,0000	6,0000
33,0000	0,0000	6,0000
43,0000	0,0000	6,0000
53,0000	0,0000	6,0000
63,0000	0,0000	6,0000
73,0000	0,0000	6,0000
83,0000	0,0000	6,0000
93,0000	0,0000	6,0000
103,0000	0,0000	6,0000
113,0000	0,0000	6,0000
123,0000	0,0000	6,0000
133,0000	0,0000	6,0000
143,0000	0,0000	6,0000
153,0000	0,0000	6,0000
163,0000	0,0000	6,0000
173,0000	0,0000	6,0000
183,0000	0,0000	6,0000
193,0000	0,0000	6,0000
203,0000	0,0000	6,0000
213,0000	0,0000	6,0000
223,0000	0,0000	6,0000

X	Y	Z
X2		
23,0000	-220,0000	6,0000
33,0000	-220,0000	6,0000
43,0000	-220,0000	6,0000
53,0000	-220,0000	6,0000
63,0000	-220,0000	6,0000
73,0000	-220,0000	6,0000
83,0000	-220,0000	6,0000
93,0000	-220,0000	6,0000
103,0000	-220,0000	6,0000
113,0000	-220,0000	6,0000
123,0000	-220,0000	6,0000
133,0000	-220,0000	6,0000
143,0000	-220,0000	6,0000
153,0000	-220,0000	6,0000
163,0000	-220,0000	6,0000
173,0000	-220,0000	6,0000
183,0000	-220,0000	6,0000
193,0000	-220,0000	6,0000
203,0000	-220,0000	6,0000
213,0000	-220,0000	6,0000
223,0000	-220,0000	6,0000

X	Y	Z
X3		
23,0000	0,0000	118,5000
33,0000	0,0000	118,5000
43,0000	0,0000	118,5000
53,0000	0,0000	118,5000
63,0000	0,0000	118,5000
73,0000	0,0000	118,5000
83,0000	0,0000	118,5000
93,0000	0,0000	118,5000
103,0000	0,0000	118,5000
113,0000	0,0000	118,5000
123,0000	0,0000	118,5000
133,0000	0,0000	118,5000
143,0000	0,0000	118,5000
153,0000	0,0000	118,5000
163,0000	0,0000	118,5000
173,0000	0,0000	118,5000

X	Y	Z
Y1		
8,0000	-10,0000	6,0000
8,0000	-20,0000	6,0000
8,0000	-30,0000	6,0000
8,0000	-40,0000	6,0000
8,0000	-50,0000	6,0000
8,0000	-60,0000	6,0000
8,0000	-70,0000	6,0000
8,0000	-80,0000	6,0000
8,0000	-90,0000	6,0000
8,0000	-100,0000	6,0000
8,0000	-110,0000	6,0000
8,0000	-120,0000	6,0000
8,0000	-130,0000	6,0000
8,0000	-140,0000	6,0000
8,0000	-150,0000	6,0000
8,0000	-160,0000	6,0000

*Modelado y Compensación de errores de Sistemas de Prototipado Rápido*

---

183,0000	0,0000	118,5000
193,0000	0,0000	118,5000
203,0000	0,0000	118,5000
213,0000	0,0000	118,5000
223,0000	0,0000	118,5000

8,0000	-170,0000	6,0000
8,0000	-180,0000	6,0000
8,0000	-190,0000	6,0000
8,0000	-200,0000	6,0000
8,0000	-210,0000	6,0000

X	Y	Z
Y2		
233,0000	-10,0000	6,0000
233,0000	-20,0000	6,0000
233,0000	-30,0000	6,0000
233,0000	-40,0000	6,0000
233,0000	-50,0000	6,0000
233,0000	-60,0000	6,0000
233,0000	-70,0000	6,0000
233,0000	-80,0000	6,0000
233,0000	-90,0000	6,0000
233,0000	-100,0000	6,0000
233,0000	-110,0000	6,0000
233,0000	-120,0000	6,0000
233,0000	-130,0000	6,0000
233,0000	-140,0000	6,0000
233,0000	-150,0000	6,0000
233,0000	-160,0000	6,0000
233,0000	-170,0000	6,0000
233,0000	-180,0000	6,0000
233,0000	-190,0000	6,0000
233,0000	-200,0000	6,0000
233,0000	-210,0000	6,0000

X	Y	Z
Y3		
120,5000	-70,0000	6,0000
120,5000	-80,0000	6,0000
120,5000	-90,0000	6,0000
120,5000	-100,0000	6,0000
120,5000	-110,0000	6,0000
120,5000	-120,0000	6,0000
120,5000	-130,0000	6,0000
120,5000	-140,0000	6,0000
120,5000	-150,0000	6,0000
120,5000	-160,0000	6,0000
120,5000	-170,0000	6,0000

X	Y	Z
Y4		
120,5000	-70,0000	118,5000
120,5000	-80,0000	118,5000
120,5000	-90,0000	118,5000
120,5000	-100,0000	118,5000
120,5000	-110,0000	118,5000
120,5000	-120,0000	118,5000
120,5000	-130,0000	118,5000
120,5000	-140,0000	118,5000
120,5000	-150,0000	118,5000
120,5000	-160,0000	118,5000
120,5000	-170,0000	118,5000

X	Y	Z
Z1		
233,0000	-10,0000	6,0000
233,0000	-10,0000	16,0000
233,0000	-10,0000	26,0000
233,0000	-10,0000	36,0000
233,0000	-10,0000	46,0000
233,0000	-10,0000	56,0000
233,0000	-10,0000	66,0000
233,0000	-10,0000	76,0000
233,0000	-10,0000	86,0000
233,0000	-10,0000	96,0000
233,0000	-10,0000	106,0000
233,0000	-10,0000	116,0000

X	Y	Z
Z2		
8,0000	-10,0000	6,0000
8,0000	-10,0000	16,0000
8,0000	-10,0000	26,0000
8,0000	-10,0000	36,0000
8,0000	-10,0000	46,0000
8,0000	-10,0000	56,0000
8,0000	-10,0000	66,0000
8,0000	-10,0000	76,0000
8,0000	-10,0000	86,0000
8,0000	-10,0000	96,0000
8,0000	-10,0000	106,0000
8,0000	-10,0000	116,0000

X	Y	Z
Z3		
233,0000	-210,0000	6,0000
233,0000	-210,0000	16,0000
233,0000	-210,0000	26,0000
233,0000	-210,0000	36,0000
233,0000	-210,0000	46,0000
233,0000	-210,0000	56,0000
233,0000	-210,0000	66,0000
233,0000	-210,0000	76,0000
233,0000	-210,0000	86,0000
233,0000	-210,0000	96,0000
233,0000	-210,0000	106,0000
233,0000	-210,0000	116,0000

Y los puntos de las diagonales que son necesarios para el cálculo de algunos errores son:

	X	Y	Z
	DIAGONALES		
XY	123,0000	-110,0000	6,0000
XZ	120,5000	-10,0000	61,0000
YZ	233,0000	-110,0000	61,0000

Con la máquina de medir por coordenadas se han obtenido los siguientes puntos en las diferentes barras:

X	Y	Z
X1		
23,00916	0,00719	5,99618
33,01363	0,00931	5,99491
43,01929	0,01091	5,99048
53,02580	0,01515	5,99016
63,02960	0,01826	5,98775
73,03293	0,01876	5,98759
83,03876	0,02162	5,98201
93,04580	0,02551	5,98028
103,05043	0,02926	5,97866
113,05510	0,02898	5,97972
123,05961	0,03123	5,97650
133,06393	0,03384	5,97574
143,07094	0,03412	5,97014
153,07700	0,03848	5,96813
163,08163	0,04288	5,97055
173,08839	0,04465	5,96609
183,09292	0,04555	5,96694
193,09639	0,04912	5,96566
203,10265	0,04936	5,96273
213,10686	0,04977	5,96167
223,11387	0,05194	5,96121

X	Y	Z
X2		
22,98413	-220,08967	6,08168
32,99122	-220,08947	6,08100
42,99899	-220,08414	6,08722
53,00428	-220,08163	6,08895
63,01036	-220,08274	6,08991
73,01359	-220,07697	6,09470
83,02239	-220,07404	6,09813
93,02683	-220,07221	6,09875
103,03530	-220,07064	6,10180
113,04048	-220,06553	6,10657
123,04749	-220,06545	6,10801
133,05566	-220,06333	6,11466
143,06236	-220,05928	6,11717
153,07074	-220,05989	6,12146
163,07857	-220,05380	6,12531
173,08340	-220,05230	6,12672
183,09465	-220,04963	6,12888
193,10058	-220,04887	6,13319
203,10982	-220,04854	6,13657
213,11904	-220,04374	6,14300
223,12592	-220,04117	6,14563

X	Y	Z
X3		
23,06395	-0,00115	118,50674
33,06597	0,00716	118,49321
43,07186	0,01519	118,48336
53,07905	0,02197	118,47151
63,08367	0,02727	118,45664
73,08950	0,03262	118,44867
83,09565	0,04376	118,43517
93,09989	0,05136	118,42260
103,10281	0,05744	118,41259
113,10865	0,06448	118,39825
123,11621	0,07234	118,38635
133,11804	0,07870	118,37631
143,12733	0,08870	118,36214
153,13008	0,09477	118,35238
163,13354	0,10184	118,34055

X	Y	Z
Y1		
8,00158	-10,00253	6,00054
7,99929	-20,00672	6,00335
7,99797	-30,01135	6,00660
7,99477	-40,01524	6,00927
7,99274	-50,02203	6,01074
7,99128	-60,02466	6,01285
7,99083	-70,02805	6,01845
7,98858	-80,03485	6,01924
7,99018	-90,03927	6,02236
7,98761	-100,04380	6,02571
7,98614	-110,04403	6,02812
7,98788	-120,04936	6,03379
7,98214	-130,05362	6,03818
7,98237	-140,05863	6,04292
7,98506	-150,06505	6,04505

*Modelado y Compensación de errores de Sistemas de Prototipado Rápido*

---

173,14148	0,10665	118,32920
183,14308	0,11544	118,31890
193,15362	0,12229	118,30590
203,15599	0,12906	118,29392
213,16164	0,13575	118,28463
223,16633	0,14161	118,27298

7,98047	-160,06963	6,05104
7,98089	-170,07306	6,05273
7,97997	-180,07777	6,05774
7,97871	-190,07977	6,06172
7,97832	-200,08684	6,06598
7,97764	-210,09138	6,07184

X	Y	Z
Y2		
233,11796	-9,94891	5,96523
233,11944	-19,95178	5,97307
233,11919	-29,95725	5,97959
233,11707	-39,96066	5,98553
233,11967	-49,96606	5,99570
233,12168	-59,97015	6,00397
233,12218	-69,97257	6,01276
233,12061	-79,97960	6,01965
233,12261	-89,98349	6,02876
233,12365	-99,98912	6,03574
233,12260	-109,99142	6,04512
233,12386	-119,99434	6,05528
233,12348	-129,99918	6,06295
233,12646	-140,00515	6,07241
233,12809	-150,00792	6,08104
233,12576	-160,01399	6,09081
233,12837	-170,01990	6,09918
233,12945	-180,02010	6,10871
233,13268	-190,02733	6,11744
233,13002	-200,03182	6,13000
233,13164	-210,03577	6,13785

X	Y	Z
Y3		
120,55442	-69,99893	6,01048
120,54962	-80,00234	6,01487
120,55145	-90,00665	6,02173
120,55068	-100,01209	6,02831
120,54903	-110,01763	6,03254
120,55177	-120,01985	6,03982
120,54764	-130,02604	6,04608
120,54945	-140,02917	6,05073
120,54826	-150,03289	6,05782
120,54703	-160,04082	6,06662
120,54838	-170,04430	6,07357

X	Y	Z
Y4		
120,63893	-69,96132	118,42186
120,64473	-79,96561	118,42596
120,64648	-89,97052	118,43321
120,65050	-99,97402	118,43807
120,65826	-109,97903	118,44413
120,66148	-119,98085	118,45102
120,66334	-129,98462	118,45560
120,67014	-139,98931	118,46147
120,67366	-149,99326	118,46816
120,68037	-159,99822	118,47296
120,68453	-170,00336	118,48248

X	Y	Z
Z1		
233,12016	-9,94691	5,96506
233,11477	-9,93485	15,95634
233,11210	-9,92272	25,94760
233,10963	-9,90994	35,93481
233,11004	-9,89846	45,92194
233,11335	-9,88864	55,90510
233,11486	-9,87963	65,88653
233,12156	-9,87077	75,86902
233,13100	-9,86545	85,84628
233,14058	-9,86282	95,82578
233,15535	-9,85761	105,80120
233,17243	-9,85776	115,77325

X	Y	Z
Z2		
7,99995	-10,00392	6,00308
7,99488	-10,00558	16,00495
7,99488	-10,00570	26,00790
7,99194	-10,00507	36,01240
7,99099	-10,00556	46,01589
7,99540	-10,00768	56,01799
7,99798	-10,01089	66,01931
8,00231	-10,00838	76,02086
8,01305	-10,00953	86,02367
8,02257	-10,01250	96,02392
8,03653	-10,01524	106,02565
8,05379	-10,01723	116,02605

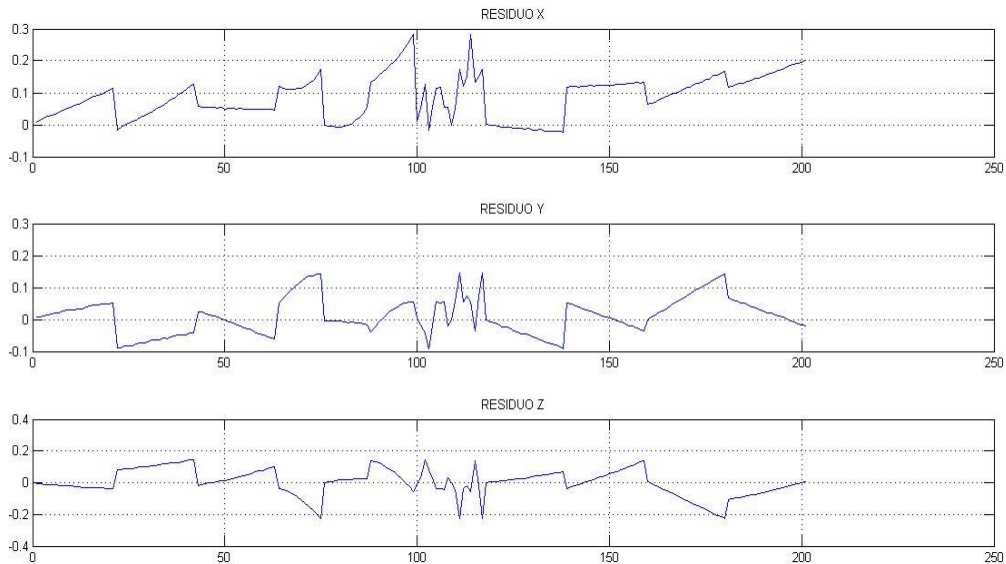
X	Y	Z
Z3		
233,13217	-210,03838	6,13987
233,14277	-210,02219	16,13262
233,15408	-210,00873	26,12466
233,16463	-209,99901	36,11128
233,17364	-209,98472	46,09714
233,18480	-209,97429	56,08443
233,19853	-209,96700	66,06679
233,21112	-209,96021	76,04485
233,22713	-209,95247	86,02536
233,24300	-209,94894	95,99834
233,26387	-209,94581	105,97353
233,28352	-209,94432	115,94104

Y los puntos de las diagonales:

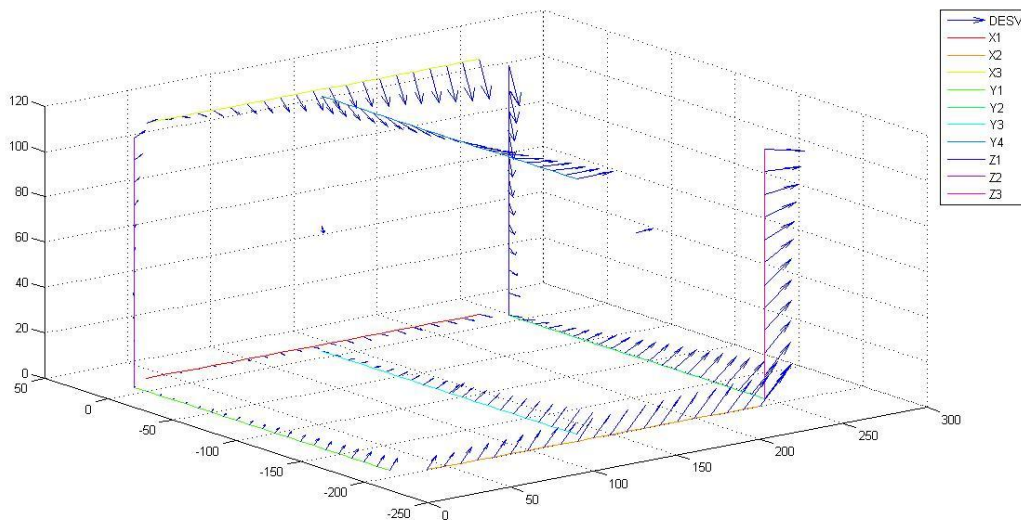
	X	Y	Z
	DIAGONALES		
XY	123,05243	-110,01791	6,03436
XZ	120,55502	-9,94499	60,95328
YZ	233,15228	-109,92596	60,98016



En las dos siguientes gráficas se van a mostrar los resultados iniciales obtenidos. La primera gráfica muestra los residuos que se obtienen en cada eje al restar los puntos medidos a los puntos nominales en las diferentes barras de nuestra pieza fabricada. Vemos que el mayor error es de casi 0,3 mm en la coordenada X.



En la siguiente gráfica se muestra un gráfico tridimensional hecho con una aplicación de Matlab, donde se muestra la deformación que se ha producido en las barras al fabricar la pieza, tanto en módulo como en dirección.



Para cuantificar los errores se muestra una tabla donde aparecen los errores máximos y medios en distancia euclídea, y posteriormente en cada eje, expresados en milímetros:

Error máximo	Error medio	Error máximo eje X	Error medio eje X
0,05084	0,01097	0,28352	0,08590
Error máximo eje Y	Error medio eje Y	Error máximo eje Z	Error medio eje Z
0,14537	0,01044	-0,22702	0,00048

A continuación se introducen los puntos nominales y los puntos medidos a las formulas de errores geométricos explicadas anteriormente, y con esto se obtendrían los diferentes errores.

Los opuestos de estos errores obtenidos, se introducirían al modelo y se lo aplicaríamos a los puntos medidos, para así obtener los puntos corregidos y sacar el residuo final entre puntos nominales y puntos corregidos.

Por otro lado también, con los opuestos de los errores obtenidos, se podría aplicar a los puntos nominales para sacar los puntos que fabricasen la pieza ya sin errores.

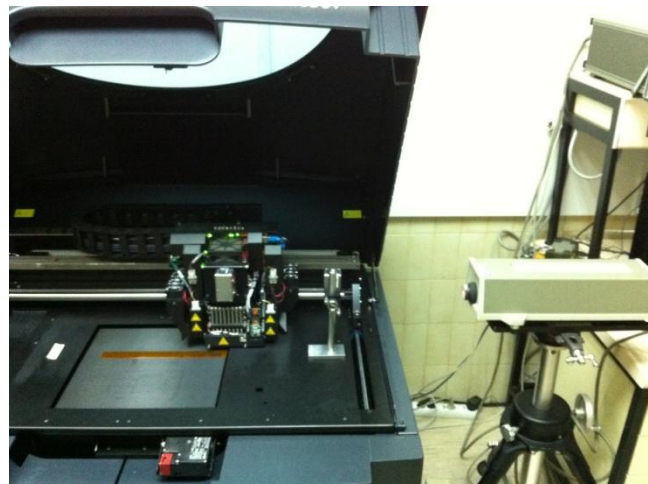
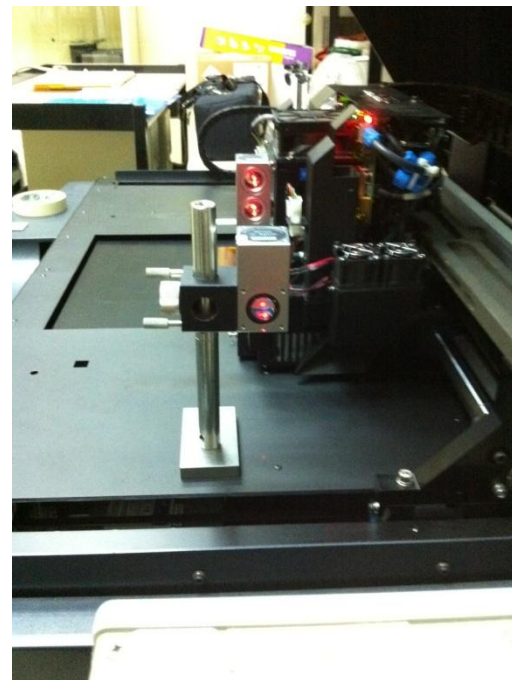
A continuación se muestran los polinomios de cada error.

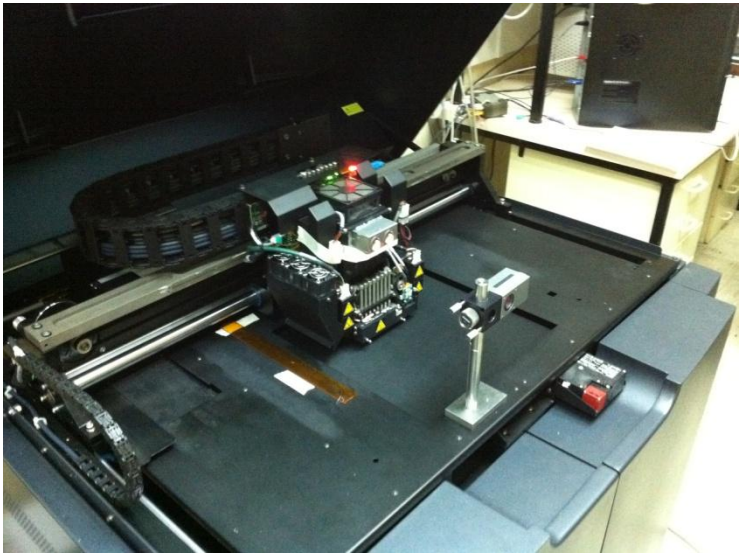
	a2	a1	a0
XRZ	6,61E-04	6,59E-03	0,00E+00
XRY	1,90E-04	-4,13E-02	3,36E-14
YRZ	1,87E-05	6,10E-03	-1,87E-14
YRX	3,92E-04	7,29E-02	3,62E-14
ZRY	6,91E-03	9,52E-01	1,01E-14
ZRX	2,32E-03	-2,37E-01	-6,07E-14
XTX	5,26E-08	5,08E-04	0,00E+00
YTY	-8,57E-08	4,19E-04	1,50E-17
ZTZ	-1,08E-06	4,22E-04	6,29E-18
ZRZ	5,10E-03	-1,48E+00	0,00E+00
XRX	3,65E-05	4,62E-01	-1,53E-14
YRY	1,66E-05	4,22E-03	1,49E-14
XTZ	-2,74E-07	2,18E-04	1,58E-17
XTY	-1,76E-07	2,45E-04	1,74E-17
YTX	2,11E-07	1,98E-04	3,70E-17
YTZ	-6,66E-07	1,78E-04	7,52E-18
ZTX	3,11E-09	5,83E-04	-7,87E-18
ZTY	-3,06E-07	1,58E-04	0,00E+00

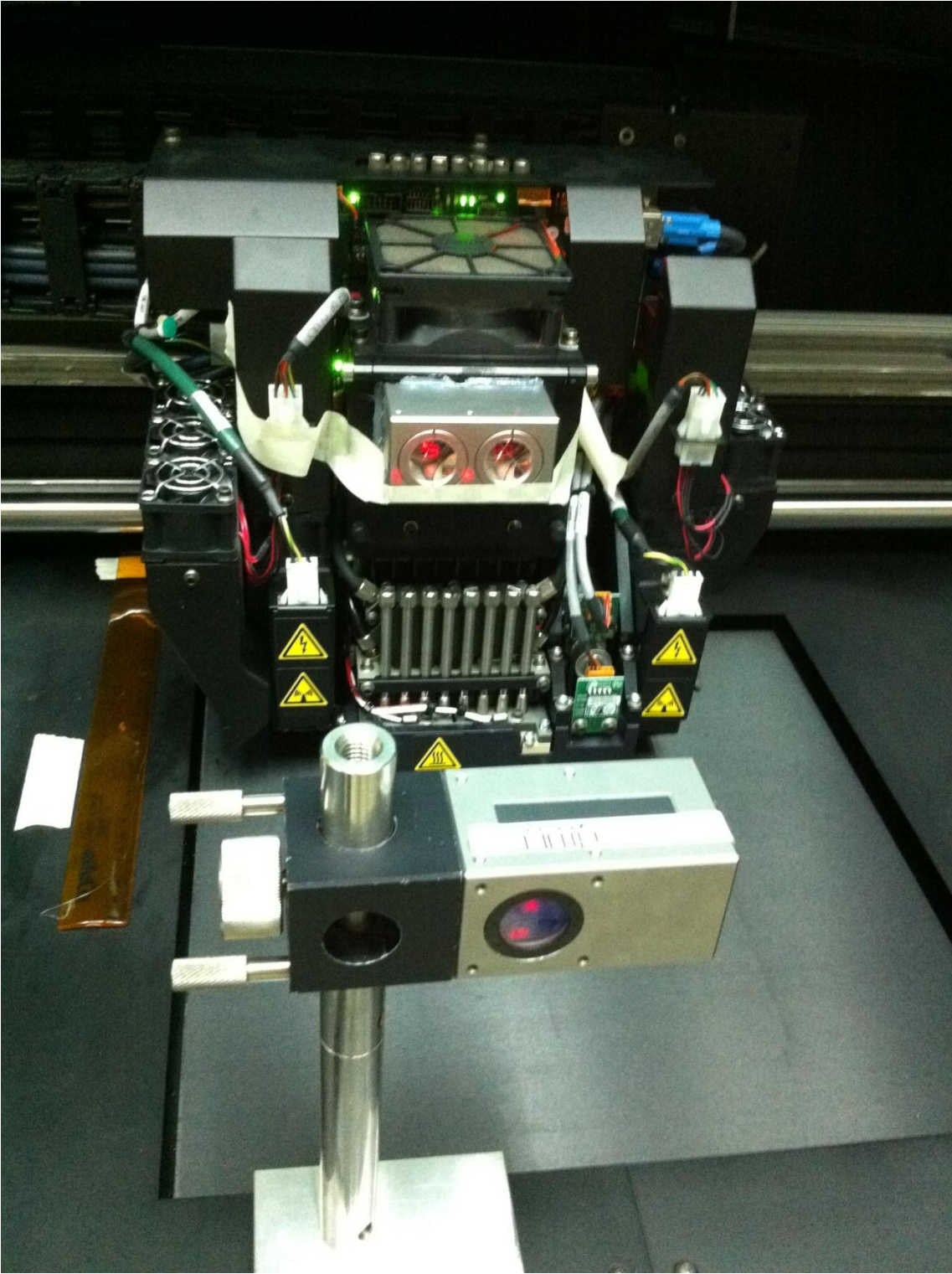
Debido a que se ha considerado offset cero, existen cuatro errores de giro que no se han podido calcular en el modelo geométrico, y por eso dan cero. Estos errores son: error de cabeceo en el eje X, error de rumbo en el eje Y, error de alabeo en el eje Y y error de cabeceo en el eje Y.

Estos cuatro errores, aunque no afecten, se miden porque es posible considerar offsets diferentes de cero en función de dónde coloquemos el sistema de referencia del cabezal.

Por lo tanto lo que se hizo es medir tres de estos errores con el interferómetro laser. A continuación se muestran imágenes de cómo se realizó el proceso:







Y los resultados de las mediciones realizadas con el interferómetro para los tres errores, expresadas en arco segundos, son las siguientes:

ERROR XRY				
mm	1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición	MEDIA
0	0	0,2	-0,1	0,033
20	-8,1	-11,9	-14,9	-11,633
40	-5,9	-28,6	-34,6	-23,033
60	-39,7	-42,6	-46,3	-42,867
80	-48,1	-61,4	-62,8	-57,433
100	-56,3	-72,8	-74,7	-67,933
120	-64,9	-84,1	-85,5	-78,167
140	-79,2	-97,2	-98,6	-91,667
160	-86,6	-105,8	-107,7	-100,033
180	-95,9	-116,6	-117,6	-110,033
200	-106,2	-125,9	-125,8	-119,300
220	-111,6	-132,3	-133	-125,633
240	-116,5	-136,5	-138,2	-130,400
260	-118,8	-139,6	-139,4	-132,600
280	-119,2	-139,4	-141,2	-133,267
300	-118,6	-138	-141,4	-132,667
320	-116,2	-136,5	-139,5	-130,733
340	-111,1	-132,4	-135,2	-126,233
360	-108,5	-131	-132,8	-124,100

ERROR YRX				
Cm	1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición	MEDIA
0	0,4	0,5	0,5	0,467
2	1,8	2,1	1,7	1,867
4	2,9	3,2	1,8	2,633
6	4,9	3,8	3,2	3,967
8	8,5	6,8	4,7	6,667
10	10,7	9,8	9,7	10,067
12	12	11,4	10,5	11,300
14	20,8	19,3	13,1	17,733
16	25,2	22,5	21,5	23,067
18	26,6	26,5	25,2	26,100

ERROR YRZ				
cm	1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición	MEDIA
0	-0,6	-0,7	-0,8	-0,700
2	-7,8	-11,6	-10,6	-10,000
4	-7,9	-9,8	-9,7	-9,133
6	-9,8	-11,4	-11,2	-10,800
8	-16,6	-17,7	-17,5	-17,267
10	-14,5	-17,9	-17,1	-16,500
12	-12,9	-15	-14,3	-14,067
14	-16,8	-18,6	-17,6	-17,667
16	-20,6	-22,1	-22,4	-21,700
18	-16,5	-19,4	-18,1	-18,000
20	-18,2	-19,8	-18,5	-18,833

Una vez aplicado el modelo, los puntos corregidos que se obtienen son los siguientes:

X	Y	Z
X1		
23,000069	0,003302	5,999890
32,999482	0,003391	6,000960
43,000062	0,002990	5,998828
53,001473	0,005243	6,000739
63,000161	0,006396	6,000496
72,998360	0,004969	6,002446
82,999046	0,005917	5,998924
93,000915	0,007924	5,999193
103,000370	0,009809	5,999510
112,999840	0,007688	6,002440
122,999140	0,008125	6,001042
132,998230	0,008945	6,002044
142,999990	0,007463	5,998151
153,000780	0,010083	5,997781
163,000130	0,012764	6,001792
173,001590	0,012841	5,998859
183,000810	0,012063	6,001173
192,998940	0,013983	6,001306
202,999850	0,012611	5,999727
212,998700	0,011419	5,999960
223,000320	0,012012	6,000731

X	Y	Z
X2		
23,011554	-219,996710	6,001066
33,013114	-219,998540	5,997778
43,015187	-219,995230	6,001330
53,014634	-219,994700	6,000319
63,014710	-219,997780	5,998475
73,011780	-219,993950	6,000402
83,014252	-219,992940	6,000897
93,012216	-219,993010	5,998509
103,014050	-219,993310	5,998493
113,012430	-219,990050	6,000129
123,012490	-219,991800	5,998375
133,013540	-219,991480	6,001753
143,012970	-219,989210	6,000939
153,013910	-219,991580	6,001824
163,014150	-219,987230	6,002215
173,011240	-219,987440	6,000096
183,014580	-219,986450	5,998660
193,012450	-219,987360	5,999309
203,013470	-219,988670	5,998967
213,014300	-219,985490	6,001604
223,012640	-219,984520	6,000379

X	Y	Z
X3		
22,999980	0,001220	118,520730
32,996965	0,002859	118,519430
42,997793	0,004245	118,521760
52,999909	0,004396	118,522020
62,999447	0,003096	118,519200
73,000166	0,001874	118,523230
83,001196	0,006460	118,521660
93,000303	0,007535	118,520960
102,998060	0,007116	118,522760
112,998730	0,007678	118,520160
123,001100	0,009081	118,519950
132,997720	0,009013	118,521540
143,001790	0,012603	118,518930
152,999300	0,012287	118,520680
162,997500	0,013007	118,520290
173,000170	0,011479	118,520320
182,996480	0,013961	118,521340
193,001710	0,014513	118,519600
202,998760	0,015025	118,518820
212,999060	0,015472	118,520670
222,998390	0,015118	118,520090

X	Y	Z
Y1		
8,002186	-9,999246	5,998525
8,001991	-19,999319	5,999115
8,002715	-29,999796	6,000005
8,001521	-39,999513	6,000178
8,001459	-50,002097	5,999026
8,001916	-60,000486	5,998372
8,003338	-69,999608	6,001080
8,002924	-80,002116	5,998844
8,006308	-90,002200	5,998798
8,005480	-100,002380	5,998856
8,005715	-109,998220	5,997839
8,009109	-119,999130	5,999946
8,004984	-129,998950	6,000637
8,006784	-139,999480	6,001549
8,011004	-150,001390	5,999714
8,007902	-160,001430	6,001609
8,009763	-170,000290	5,999069
8,010235	-180,000400	5,999713
8,010327	-189,997780	5,999187
8,011256	-200,000190	5,998815
8,011840	-210,000040	5,999910

X	Y	Z
Y2		
232,999340	-9,986317	5,998704
233,001100	-19,985080	5,999184
233,001090	-29,986418	5,998209
232,999160	-39,985654	5,996527
233,001910	-49,986866	5,998929
233,004030	-59,986729	5,999312
233,004590	-69,984901	6,000078
233,003040	-79,987641	5,998801
233,005010	-89,987222	5,999613
233,005980	-99,988499	5,998159
233,004810	-109,986430	5,998977
233,005910	-119,984950	6,000448
233,005330	-129,985350	5,999281
233,008060	-139,986860	5,999772
233,009400	-149,985140	5,999302
233,006740	-159,986680	5,999846

X	Y	Z
Y3		
120,505790	-69,992366	5,999309
120,502330	-79,991487	5,998125
120,505440	-89,991473	5,999276
120,505920	-99,992561	6,000014
120,505470	-109,993720	5,998270
120,509360	-119,991530	5,999441
120,506350	-129,993270	5,999456
120,509230	-139,991930	5,997733
120,509060	-149,991150	5,998306
120,508810	-159,994540	6,000464
120,511100	-169,993460	6,000633



*Modelado y Compensación de errores de Sistemas de Prototipado Rápido*

233,008960	-169,988040	5,998838
233,009620	-179,983650	5,998879
233,012380	-189,986270	5,997962
233,009210	-199,986120	6,000762
233,010270	-209,985390	5,998703

X	Y	Z
Y4		
120,503140	-69,993742	118,519320
120,505620	-79,993743	118,518140
120,504010	-89,994329	118,519980
120,504630	-99,993471	118,519290
120,508940	-109,994100	118,519670
120,508680	-119,991500	118,520750
120,507010	-129,990830	118,519380
120,510230	-139,991040	118,519170
120,510130	-149,990490	118,519650
120,513180	-159,990910	118,518100
120,513630	-169,991490	118,521140

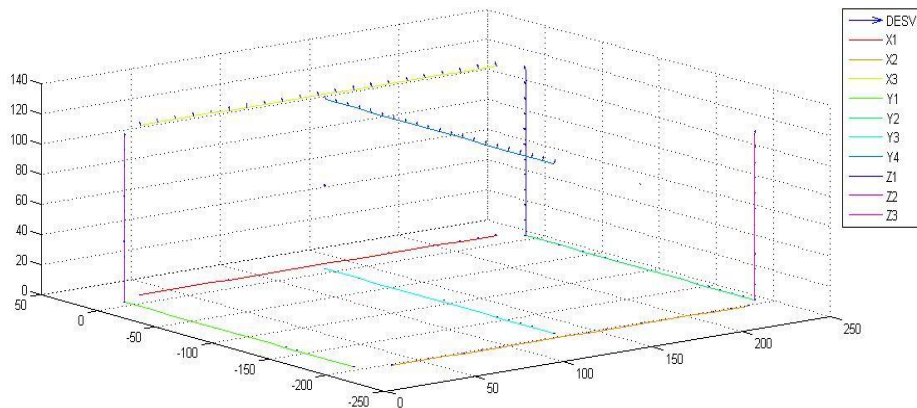
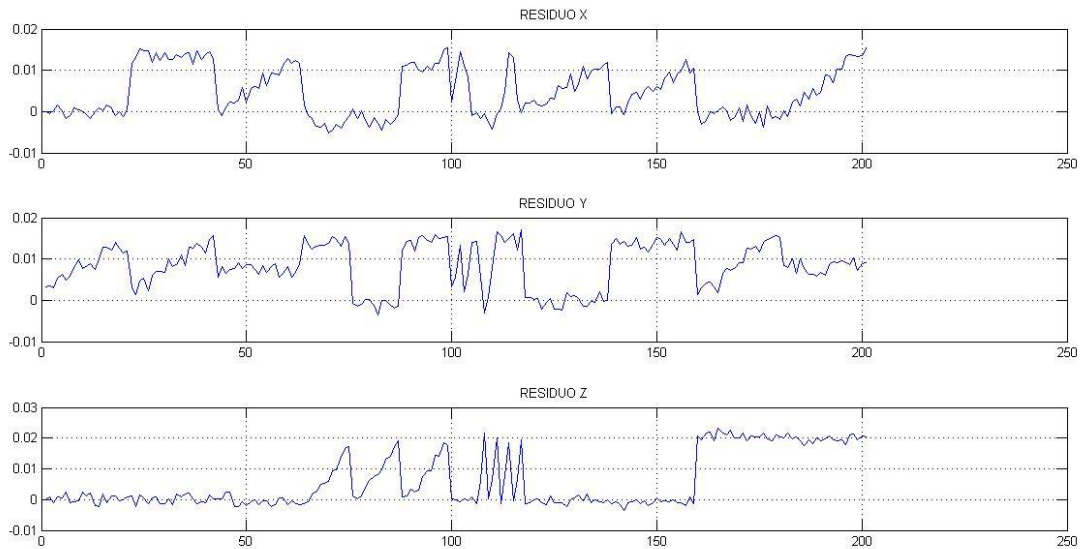
X	Y	Z
Z1		
233,001540	-9,984311	5,998537
232,998970	-9,986479	15,999292
232,998160	-9,987595	26,001958
232,996400	-9,986989	36,002501
232,996160	-9,986573	46,004903
232,997250	-9,986619	56,005249
232,994800	-9,986222	66,005789
232,995570	-9,984652	76,009325
232,996930	-9,985240	86,009539
232,996070	-9,987062	96,013940
232,997850	-9,984781	106,016180
232,999180	-9,986273	116,016960

X	Y	Z
Z2		
8,000557	-10,000633	6,001066
7,998305	-10,001542	16,000357
8,000161	-10,001047	26,001164
7,997907	-9,999850	36,003945
7,996288	-9,999767	46,006141
7,998456	-10,001239	56,007376
7,997033	-10,003645	66,008255
7,995383	-10,000123	76,009797
7,997981	-9,999977	86,013030
7,996981	-10,001307	96,014139
7,997853	-10,001989	106,017150
7,999257	-10,001444	116,019270

X	Y	Z
Z3		
233,010800	-209,988000	6,000727
233,010910	-209,986030	16,001197
233,011760	-209,985800	26,003333
233,011680	-209,988250	36,002432
233,009690	-209,985000	46,003151
233,009270	-209,984430	56,007680
233,010640	-209,985740	66,009641
233,009910	-209,986220	76,009680
233,011420	-209,984370	86,014549
233,011420	-209,985270	96,014250
233,014840	-209,985050	106,018540
233,015280	-209,984880	116,017510

	X	Y	Z
	DIAGONALES		
XY	123,007340	-109,994450	5,999908
XZ	120,498210	-9,994327	61,006335
YZ	233,004750	-109,985990	61,007954

Y de nuevo mostramos las dos gráficas, por un lado la de los residuos en cada eje al restar los puntos corregidos a los nominales; y por otro lado la deformación que sufriría la pieza una vez corregidos los puntos.



Para cuantificar los errores se muestra una tabla donde aparecen los errores máximos y medios en distancia euclídea, y posteriormente en cada eje, expresados en milímetros:

Error máximo	Error medio	Error máximo eje X	Error medio eje X
0,00039	0,00013	0,01536	0,00572
Error máximo eje Y	Error medio eje Y	Error máximo eje Z	Error medio eje Z
0,01685	0,00857	0,02323	0,00682

Y para mostrar la comparación entre los errores obtenidos entre los puntos medidos y los puntos corregidos, se muestra la tabla conjunta de comparación donde los valores están expresados en milímetros:

	Puntos Medidos	Puntos Corregidos
Error máximo	0,05084	0,00039
Error medio	0,01097	0,00013
Error máximo eje X	0,28352	0,01536
Error medio eje X	0,08590	0,00572
Error máximo eje Y	0,14537	0,01685
Error medio eje Y	0,01044	0,00857
Error máximo eje Z	-0,22702	0,02323
Error medio eje Z	0,00048	0,00682



## Capítulo 5. Verificación Volumétrica

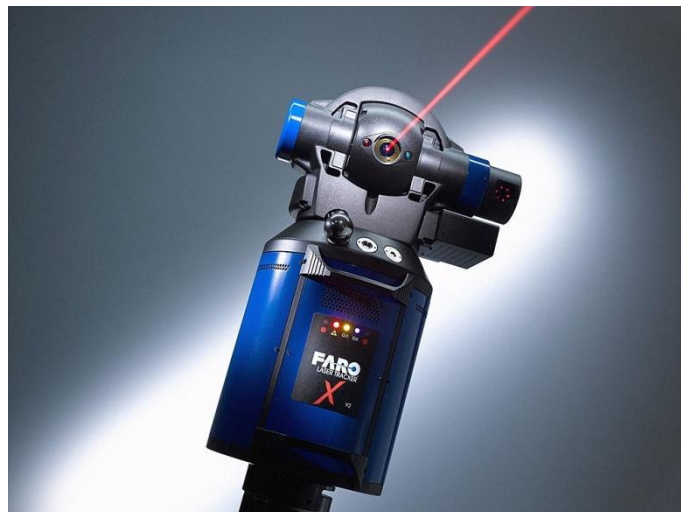
### 5.1 Introducción

La verificación volumétrica es un proceso de identificación intensiva de parámetros a partir de un modelo de optimización no lineal mediante la medición indirecta de los errores de la máquina en su volumen de trabajo. Esta consiste en la minimización de la diferencia entre pares de puntos teóricos introducidos mediante control numérico (CN) y reales capturados por el sistema de medida, en función de las posibilidades y necesidad de la técnica a emplear.

La verificación volumétrica trabaja a partir de la medición del efecto conjunto de los errores geométricos en cada punto a partir del modelo cinemático de la máquina y el movimiento multieje de la misma. Esto se traduce en una reducción significativa del tiempo necesario en la captura de información frente a la verificación geométrica.

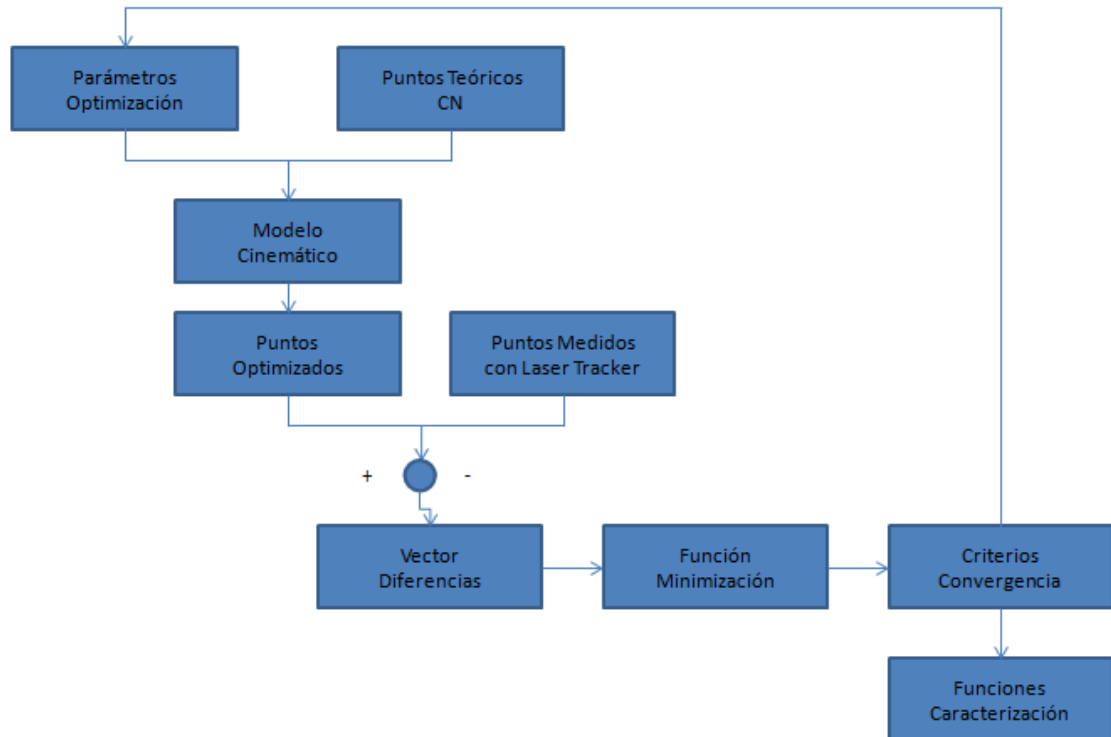
Los métodos de medida habituales se basan en medidas dedicadas en ciertas zonas o trayectorias en función del error que se quiere medir (interferómetro laser, nivel electrónico, palpadores autocentrantes, ball-bar...).

La aproximación volumétrica es la idónea para uso de laser tracker o laser tracer, debido a que se obtienen de manera rápida coordenadas XYZ de un punto y además se puede programar el ciclo de medida.



La diferencia entre coordenadas teóricas de la máquina y las coordenadas obtenidas por el LT muestra la influencia conjunto de los errores geométricos de la máquina en su volumen de trabajo, error volumétrico (ev). Mediante la minimización del error volumétrico de la máquina, a partir de su modelo cinemático, se obtienen la

función de caracterización de cada uno de sus errores. Cabe destacar que se trata de una compensación matemática no física de los errores, la cual compensa el efecto conjunto de los errores geométricos en todo el volumen de trabajo y no cada uno de ellos de manera independiente.

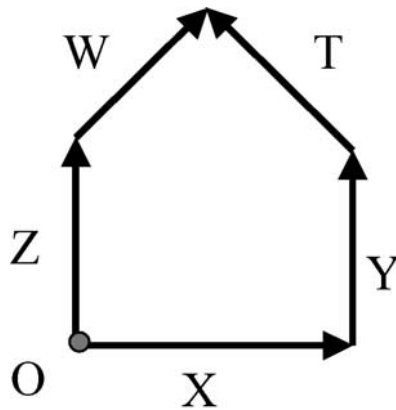


**Esquema del funcionamiento de la verificación volumétrica**

## 5.2 Modelo volumétrico de la impresora 3D

Ahora se procederá a la explicación de cómo se ha conseguido minimizar los errores mediante una función de optimización utilizada en el programa matlab.

Partimos de la idea de que la impresora 3D es del tipo ZFXY, es decir, que el cabezal de la impresora se mueve en los ejes X e Y, y que la mesa se mueve arriba y abajo en el eje Z. Por otro lado tendremos el vector T, que es el vector de offset del palpador, que en el caso de la impresora 3D es cero. Y por último el vector W, que es el vector que va desde el sistema de referencia pieza hasta a la herramienta, cerrando las dos ramas de la cadena. Son por tanto las coordenadas pieza, y por tanto las que se quieren corregir.



Esquema cinemático de movimiento

Como podemos ver en la imagen existen dos caminos diferentes para llegar desde el origen O, hasta el cabezal de la herramienta. En este camino se deberán tener en cuenta los errores de rotación de los ejes X, Y y Z.

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{bmatrix} x + \delta_x(x) \\ \delta_y(x) \\ \delta_z(x) \end{bmatrix}, & Y &= \begin{bmatrix} \delta_x(y) - \alpha_{xy}y \\ y + \delta_y(y) \\ \delta_z(y) \end{bmatrix}, \\
 Z &= \begin{bmatrix} \delta_x(z) - \alpha_{zx}z \\ \delta_y(z) - \alpha_{zy}z \\ z + \delta_z(z) \end{bmatrix}, & T &= \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix}, & W &= \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

La rotación de los ejes X, Y y Z, puede representarse por matrices de rotación infinitesimales R(X), R(Y) y R(Z). La letra u representa, a continuación, X, Y y Z.

$$R(u) = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z(u) & -\varepsilon_y(u) \\ -\varepsilon_z(u) & 1 & \varepsilon_x(u) \\ \varepsilon_y(u) & -\varepsilon_x(u) & 1 \end{bmatrix},$$

$$R^{-1}(u) = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(u) & \varepsilon_y(u) \\ \varepsilon_z(u) & 1 & -\varepsilon_x(u) \\ -\varepsilon_y(u) & \varepsilon_x(u) & 1 \end{bmatrix}$$

Igualando los dos caminos por los que se puede llegar del origen al cabezal obtenemos la siguiente ecuación:

$$\bar{Z} + \bar{R}^{-1}(Z)\bar{W} = \bar{X} + \bar{R}^{-1}(Z)\bar{Y} + \left(\bar{R}^{-1}(X)\bar{R}^{-1}(Y)\right)\bar{T}$$

Despejamos W, que es el vector de errores que queremos obtener, y nos queda la siguiente ecuación:

$$\bar{W} = \bar{R}(Z)\bar{X} + \bar{R}(Z)\bar{R}^{-1}(X)\bar{Y} - \bar{R}(Z)\bar{Z} + \left(\bar{R}(Z)\bar{R}^{-1}(X)\bar{R}^{-1}(Y)\right)\bar{T}$$

Sustituyendo X, Y, Z, T, W y las matrices de rotación en el modelo de la máquina, la expresión para las coordenadas del cabezal de la impresora en el sistema de coordenadas de la pieza de trabajo  $X_p$ ,  $Y_p$  y  $Z_p$  es:

$$X_p = x + [\delta_x(x) + \delta_x(y) - \delta_x(z)] - y[\alpha_{xy} + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + z[\alpha_{zx} + \varepsilon_y(z)] + x_t - y_t[\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)] + z_t[\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)] + \tau_x$$

$$Y_p = y + [\delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_y(z)] - x\varepsilon_z(z) + z[\alpha_{zy} - \varepsilon_x(z)] + y_t[\varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)] + \tau_y$$

$$Z_p = -z + [\delta_z(x) + \delta_z(y) - \delta_z(z)] + x\varepsilon_y(z) + y[\varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] - x_t[\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)] + y_t[\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x(z)] + z_t + \tau_z$$

Como hemos comentado antes, en esta máquina de prototipado rápido, el vector T ( $x_t$ ,  $y_t$  y  $z_t$ ) es cero, y por lo tanto las ecuaciones se quedan de la siguiente manera:

$$X_p = x + [\delta_x(x) + \delta_x(y) - \delta_x(z)] - y[\alpha_{xy} + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + z[\alpha_{zx} + \varepsilon_y(z)] + \tau_x$$

$$Y_p = y + [\delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_y(z)] - x\varepsilon_z(z) + z[\alpha_{zy} - \varepsilon_x(z)] + \tau_y$$

$$Z_p = -z + [\delta_z(x) + \delta_z(y) - \delta_z(z)] + x\varepsilon_y(z) + y[\varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] + \tau_z$$



Partimos de los puntos nominales y de los puntos medidos con la MMC. El error cometido se calcula al restar el valor del punto real medido ( $P_{ir}$ ) menos el valor del punto nominal ( $P_{in}$ ). La manera de obtener el valor del error, según la distancia Euclídea entre ambos puntos es la siguiente:

$$E_i = \sqrt{(X_{ir} - X_{in})^2 + (Y_{ir} - Y_{in})^2 + (Z_{ir} - Z_{in})^2}$$

A partir de los errores cometidos en cada punto, podemos obtener un sumatorio de todos los errores cometidos. Este sumatorio de errores constituye la función objetivo a minimizar.

$$\sum_{i=1}^n E_i \downarrow$$

Esta función optimiza los errores de la máquina de prototipado rápido en función de su modelo cinemático.

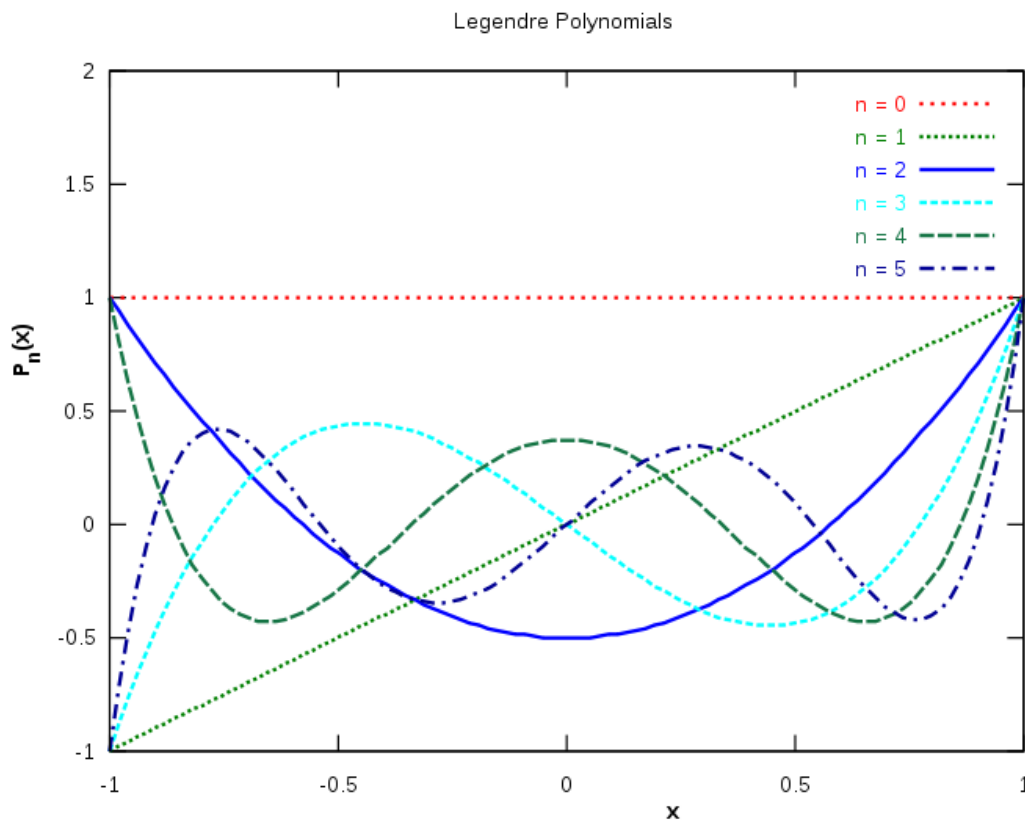
$$\begin{pmatrix} X_{ir} \\ Y_{ir} \\ Z_{ir} \end{pmatrix} = f(X) \rightarrow \text{Función Objetivo}$$

X es el vector de optimización, que va variando sus coeficientes en cada iteración. En este caso utilizaremos un vector de 1x60, que contiene los coeficientes de los polinomios de Legendre ordenados consecutivamente. Los 60 coeficientes se desglosan de la siguiente manera: 18 errores por 3 componentes de Legendre por error, mas, 3 componentes de offset del cabezal y 3 componentes aleatorios.

Los polinomios de Legendre sirven para hacer regresión a funciones, es decir aproximación, por lo que son una función que se aproxima a la función real en cada punto.

A continuación se muestran los polinomios de Legendre dependiendo del grado y una gráfica que muestra su evolución.

n	$P_n(x)$
0	1
1	$x$
2	$\frac{1}{2}(3x^2 - 1)$
3	$\frac{1}{2}(5x^3 - 3x)$
4	$\frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3)$
5	$\frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x)$
6	$\frac{1}{16}(231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5)$
7	$\frac{1}{16}(429x^7 - 693x^5 + 315x^3 - 35x)$
8	$\frac{1}{128}(6435x^8 - 12012x^6 + 6930x^4 - 1260x^2 + 35)$
9	$\frac{1}{128}(12155x^9 - 25740x^7 + 18018x^5 - 4620x^3 + 315x)$
10	$\frac{1}{256}(46189x^{10} - 109395x^8 + 90090x^6 - 30030x^4 + 3465x^2 - 63)$



Los polinomios de Legendre son usados para aproximar cada función paramétrica de error. Cada error de traslación y de rotación es aproximado por un polinomio de Legendre. El hecho de seleccionar grado 3 responde a que las variaciones de cualquier error en el rango de trabajo son suaves, y por lo tanto el grado del polinomio debe ser bajo, 2, ó 3. Cuanto mayor es el grado de los polinomios, menor es el residuo que se obtiene. De forma genérica el polinomio de Legendre de tercer grado se expresa de la siguiente forma:

$$\delta_x(x) = \sum_{i=0}^3 a_i P^i(x) = a_0 + a_1 x + \frac{1}{2} a_2 (3x^2 - 1) + \frac{1}{2} a_3 (5x^3 - 3)$$

Existen cuatro coeficientes desconocidos en esta función de error, que pueden ser reducidos a tres fijando el cero absoluto. De esta forma, asumiendo que el error es cero para valor cero de la coordenada correspondiente, la relación entre  $a_0$  y  $a_2$  es fácil de encontrar,  $a_0 = a_2/2$ . Sustituyendo  $a_0$ , la función se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\delta_x(x) = a_1 x + a_2 \left( \frac{3}{2} x^2 \right) + a_3 \left( \frac{1}{2} (5x^3 - 3) \right)$$

Para que los polinomios se entiendan mejor, los reescribiremos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \delta_x(x) &= xtx_1 \cdot x + xtx_2 \cdot \left( \frac{3}{2} x^2 \right) + xtx_3 \cdot \left( \frac{1}{2} (5x^3 - 3x) \right) \\ \varepsilon_z(x) &= xrz_1 \cdot x + xrz_2 \cdot \left( \frac{3}{2} x^2 \right) + xrz_3 \cdot \left( \frac{1}{2} (5x^3 - 3x) \right) \end{aligned}$$

Al igual que en la verificación geométrica, partimos de los puntos nominales. Con esos puntos nominales y los parámetros de optimización definidos, aplicamos el modelo para obtener unos puntos optimizados.

Una vez obtenidos esos puntos se realiza la resta entre los puntos optimizados y los puntos medidos con la máquina de medir por coordenadas, de esta manera obtenemos una nueva diferencia entre corregidos y medidos y dependiendo del criterio de convergencia que hayamos elegido, es decir, si hemos minimizado el error todo lo que se quería, volveremos a comenzar el bucle o nos quedaremos con los datos obtenidos.

Por lo tanto ya habremos obtenido la función objetivo y los parámetros de Legendre que minimizan el error.

### 5.3 Resultados

Se parte de los mismos puntos nominales que en la aproximación geométrica explicada en el capítulo 3. Por lo tanto los puntos nominales y los puntos medidos con la máquina de medir por coordenadas se pueden observar allí.

Una vez aplicado el modelo, podemos obtener los coeficientes de los polinomios de Legendre que caracterizan cada error. Los coeficientes para cada error son los siguientes:

	a3	a2	a1
XTX	-1E-10	7,08E-08	0,000509708
XTY	9E-10	-6,473E-07	0,000361594
XTZ	-7E-10	5,017E-07	-0,00025819
XRX	4,1398E-06	-0,002846	-0,00033096
XRY	0,00063106	-2,4418E-06	1,618E-07
XRZ	-1,56E-08	0,0004865	3,99752E-05
YTY	9E-10	4,402E-07	0,00048241
YTX	5E-10	4,182E-07	0,000186045
YTZ	-4E-10	3,028E-07	-0,00022957
YRX	0,00020856	-1,0558E-06	-5,8E-09
YRY	1,596E-05	-1,5659E-06	-4E-09
YRZ	0,000221	-1,1193E-06	3,11E-08
ZTZ	-2,7E-08	-7,9079E-06	-0,00019285
ZTX	3,53E-08	1,1516E-05	0,00028925
ZTY	4,07E-08	1,3116E-05	0,000813181
ZRX	8,6461E-06	0,0015306	-1,6512E-05
ZRY	-4,0203E-05	-0,01764558	0,000301324
ZRZ	-6,2634E-05	-0,0169421	0,000416638

Y conociendo los errores, podemos aplicar el modelo y obtener los puntos minimizados que han minimizado nuestra función objetivo, y por lo tanto minimizan el error:

X	Y	Z
X1		
23,00818	0,00574	5,99553
33,01333	0,00890	5,99328
43,01850	0,01191	5,99114
53,02368	0,01479	5,98911
63,02887	0,01754	5,98717
73,03408	0,02017	5,98532
83,03929	0,02270	5,98353
93,04452	0,02515	5,98180
103,04975	0,02752	5,98012
113,05498	0,02983	5,97847
123,06022	0,03208	5,97686
133,06546	0,03430	5,97526
143,07071	0,03650	5,97366
153,07595	0,03868	5,97205
163,08119	0,04087	5,97043
173,08642	0,04307	5,96878
183,09165	0,04529	5,96709
193,09687	0,04756	5,96535
203,10209	0,04987	5,96355
213,10729	0,05226	5,96167
223,11248	0,05472	5,95971

X	Y	Z
X2		
22,98528	-220,09149	6,08112
32,99087	-220,08833	6,08116
42,99662	-220,08531	6,08201
53,00255	-220,08244	6,08358
63,00864	-220,07969	6,08581
73,01490	-220,07706	6,08862
83,02132	-220,07453	6,09192
93,02791	-220,07208	6,09564
103,03465	-220,06971	6,09970
113,04155	-220,06740	6,10403
123,04861	-220,06515	6,10855
133,05583	-220,06293	6,11318
143,06320	-220,06073	6,11784
153,07071	-220,05855	6,12246
163,07838	-220,05636	6,12696
173,08620	-220,05416	6,13127
183,09416	-220,05194	6,13529
193,10226	-220,04967	6,13897
203,11051	-220,04736	6,14222
213,11890	-220,04497	6,14495
223,12742	-220,04251	6,14711

X	Y	Z
X3		
23,06324	-0,00046	118,50510
33,06839	0,00734	118,49298
43,07356	0,01498	118,48098
53,07874	0,02248	118,46908
63,08393	0,02986	118,45727
73,08914	0,03712	118,44554
83,09435	0,04428	118,43389
93,09958	0,05136	118,42229
103,10481	0,05835	118,41074
113,11004	0,06529	118,39923
123,11528	0,07218	118,38775
133,12052	0,07902	118,37628
143,12577	0,08585	118,36481
153,13101	0,09266	118,35334
163,13625	0,09948	118,34185
173,14148	0,10630	118,33033
183,14671	0,11316	118,31877
193,15193	0,12005	118,30717
203,15715	0,12700	118,29549
213,16235	0,13401	118,28375
223,16754	0,14110	118,27192

X	Y	Z
Y1		
7,99873	-10,00409	6,00150
7,99710	-20,00873	6,00396
7,99557	-30,01326	6,00651
7,99415	-40,01770	6,00918
7,99282	-50,02207	6,01197
7,99158	-60,02636	6,01487
7,99041	-70,03060	6,01790
7,98932	-80,03480	6,02106
7,98829	-90,03897	6,02437
7,98732	-100,04313	6,02782
7,98640	-110,04728	6,03142
7,98552	-120,05145	6,03517
7,98467	-130,05564	6,03909
7,98384	-140,05986	6,04319
7,98303	-150,06414	6,04745
7,98224	-160,06848	6,05190
7,98144	-170,07289	6,05653
7,98064	-180,07739	6,06136
7,97983	-190,08200	6,06639
7,97899	-200,08672	6,07162
7,97813	-210,09157	6,07707

X	Y	Z
Y2		
233,11780	-9,94749	5,96490
233,11806	-19,95214	5,97223
233,11843	-29,95667	5,97967
233,11890	-39,96111	5,98722
233,11947	-49,96547	5,99488
233,12012	-59,96977	6,00266
233,12085	-69,97401	6,01057
233,12165	-79,97821	6,01862
233,12252	-89,98238	6,02680
233,12344	-99,98654	6,03513
233,12441	-109,99069	6,04361
233,12543	-119,99486	6,05225
233,12647	-129,99905	6,06105
233,12754	-140,00327	6,07002
233,12863	-150,00755	6,07916
233,12973	-160,01189	6,08849
233,13083	-170,01630	6,09801
233,13192	-180,02080	6,10771
233,13300	-190,02541	6,11762
233,13406	-200,03013	6,12774
233,13509	-210,03498	6,13806

X	Y	Z
Y3		
120,55240	-69,99975	6,01083
120,55181	-80,00395	6,01611
120,55129	-90,00813	6,02153
120,55083	-100,01228	6,02710
120,55042	-110,01644	6,03281
120,55004	-120,02060	6,03869
120,54970	-130,02479	6,04472
120,54938	-140,02902	6,05093
120,54908	-150,03329	6,05731
120,54880	-160,03763	6,06388
120,54851	-170,04204	6,07063

X	Y	Z
Y4		
120,63986	-69,96082	118,42290
120,64390	-79,96502	118,42799
120,64801	-89,96919	118,43323
120,65218	-99,97335	118,43861
120,65639	-109,97750	118,44414
120,66065	-119,98166	118,44983
120,66494	-129,98585	118,45568
120,66925	-139,99008	118,46171
120,67358	-149,99435	118,46790
120,67792	-159,99869	118,47428
120,68226	-170,00311	118,48085

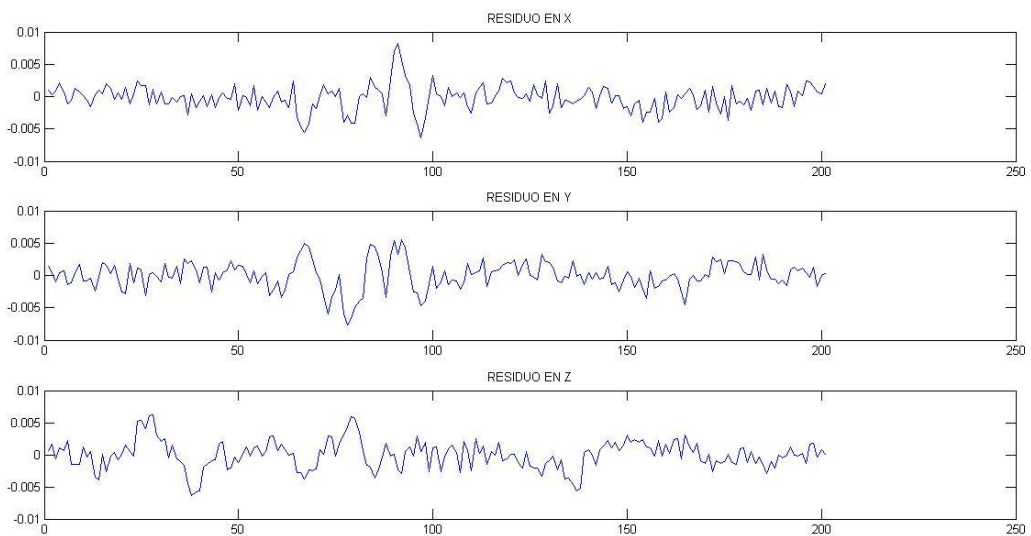
X	Y	Z
Z1		
233,11780	-9,94749	5,96490
233,11794	-9,93762	15,95920
233,11673	-9,92660	25,95034
233,11516	-9,91485	35,93861
233,11413	-9,90284	45,92426
233,11442	-9,89105	55,90757
233,11669	-9,88001	65,88881
233,12146	-9,87024	75,86825
233,12918	-9,86230	85,84616
233,14015	-9,85680	95,82281
233,15455	-9,85433	105,79846
233,17247	-9,85553	115,77340



X	Y	Z
Z2		
7,99873	-10,00409	6,00150
7,99888	-9,99966	16,00173
7,99766	-9,99798	26,00353
7,99609	-9,99845	36,00651
7,99507	-10,00052	46,01029
7,99536	-10,00365	56,01447
7,99762	-10,00732	66,01867
8,00240	-10,01105	76,02250
8,01012	-10,01436	86,02558
8,02108	-10,01684	96,02752
8,03548	-10,01806	106,02792
8,05340	-10,01763	116,02641

X	Y	Z
Z3		
233,13509	-210,03498	6,13806
233,14007	-210,02511	16,13277
233,14716	-210,01408	26,12457
233,15646	-210,00233	36,11360
233,16795	-209,99032	46,10002
233,18149	-209,97853	56,08396
233,19684	-209,96749	66,06557
233,21361	-209,95772	76,04500
233,23133	-209,94979	86,02238
233,24940	-209,94428	95,99787
233,26708	-209,94181	105,97161
233,28354	-209,94301	115,94374

La gráfica que aparece a continuación muestra los residuos que se obtienen en cada eje al restar los puntos corregidos a los puntos nominales en las diferentes barras de nuestra pieza fabricada. Vemos que el mayor error es de casi 0,01 mm en la coordenada X. El eje Y está medido en milímetros y el eje X hace referencia a las distintas barras que componen el patrón.



Para cuantificar los errores se muestra una tabla donde aparecen los errores máximos y medios en distancia euclídea, y posteriormente en cada eje, expresados en milímetros:

Error máximo	Error medio	Error máximo eje X	Error medio eje X
0,0097828	0,0031278	0,0081679	0,0014391
Error máximo eje Y	Error medio eje Y	Error máximo eje Z	Error medio eje Z
0,0081679	0,0016025	0,0077225	0,0016025

Y para mostrar la comparación entre los errores obtenidos entre los puntos medidos y los puntos corregidos, se muestra la tabla conjunta de comparación donde los valores están expresados en milímetros:

	Puntos Medidos	Puntos Corregidos
Error máximo	0,05084	0,00978
Error medio	0,01097	0,00313
Error máximo eje X	0,28352	0,00817
Error medio eje X	0,08590	0,00144
Error máximo eje Y	0,14537	0,00817
Error medio eje Y	0,01044	0,00160
Error máximo eje Z	-0,22702	0,00772
Error medio eje Z	0,00048	0,00160



## Capítulo 6. Gráficas comparativas. Conclusiones.

### 6.1 Gráficas comparativas errores

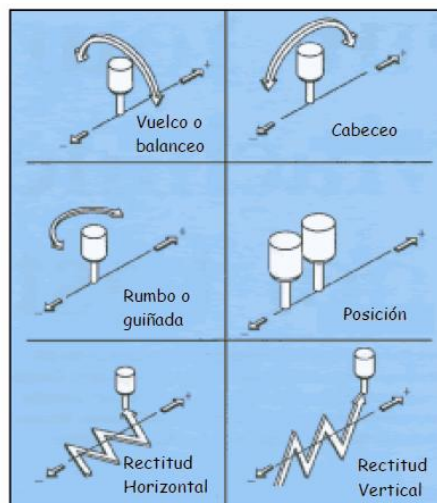
A continuación se muestran 18 gráficas comparativas entre la aproximación geométrica y la volumétrica, que se han obtenido al evaluar los polinomios obtenidos a lo largo de una distancia.

En las 18 gráficas podemos observar la evolución de los seis errores geométricos calculados para cada eje, y ver la diferencia existente entre la aproximación geométrica y la volumétrica.

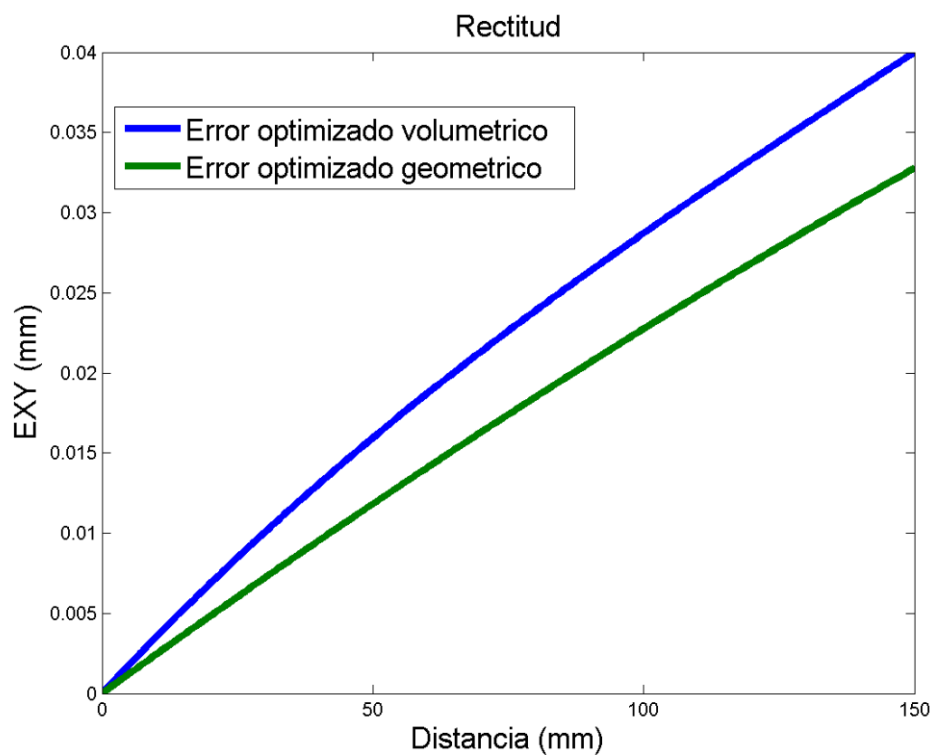
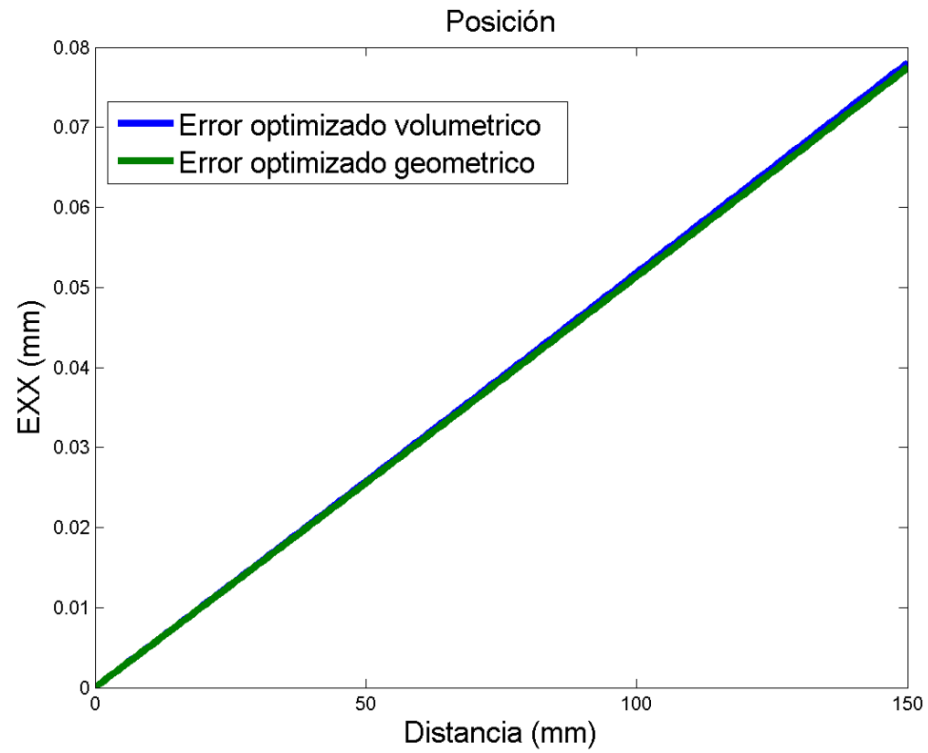
En las gráficas se utiliza la nomenclatura de la norma UNE 15300, cuya equivalencia con la nomenclatura VDI 2617, que se ha estado utilizando a lo largo de todo el proyecto se muestra a continuación

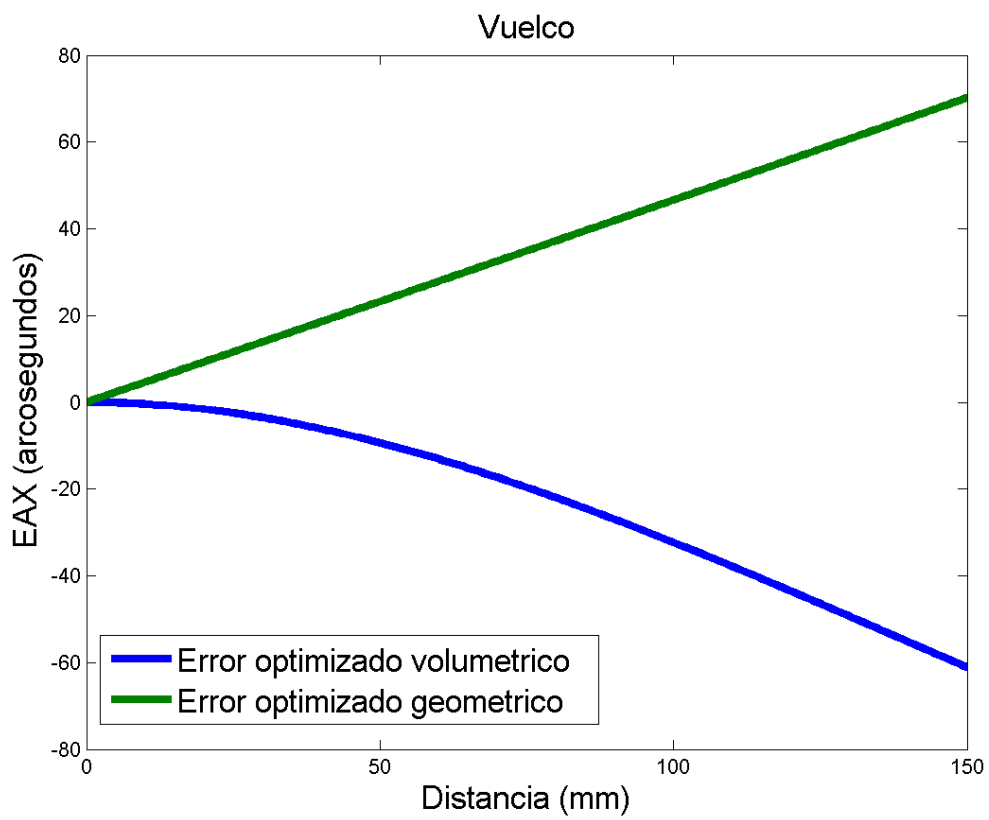
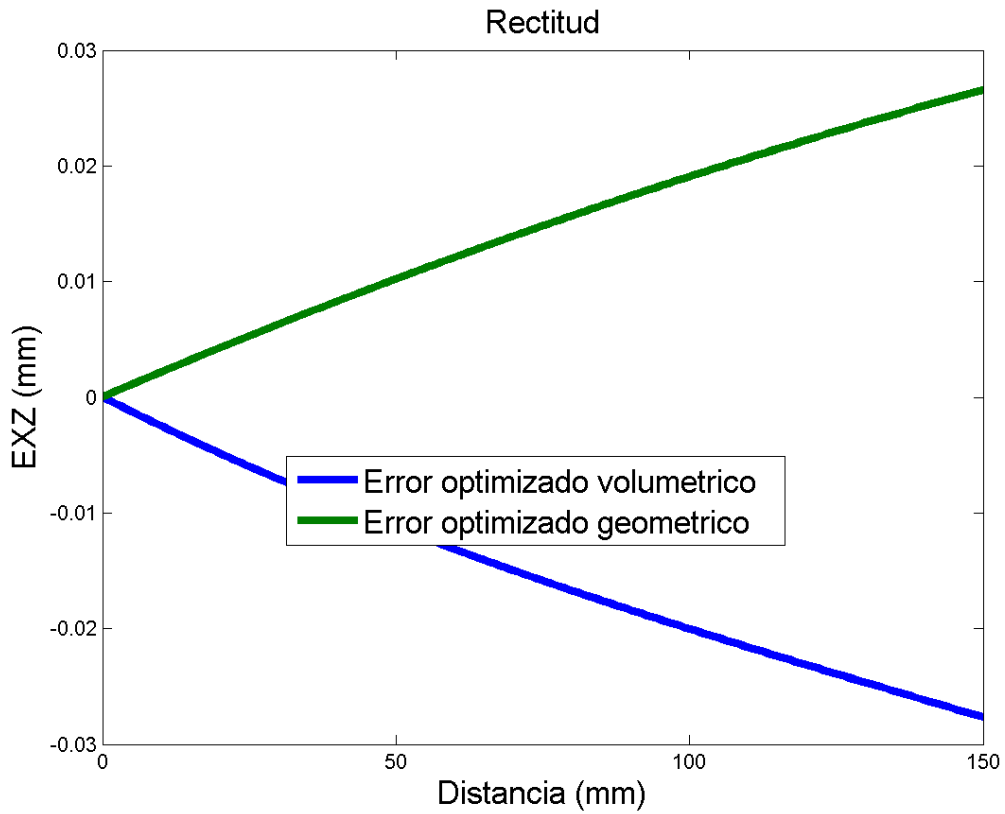
Error	UNE 15300	VDI 2617
Posición	EXX	xPx
Rectitud horizontal	EYX	xTy
Rectitud vertical	EZX	xTz
Vuelco	EAX	xRx
Cabeceo	EBX	xRy
Rumbo	ECX	xRz

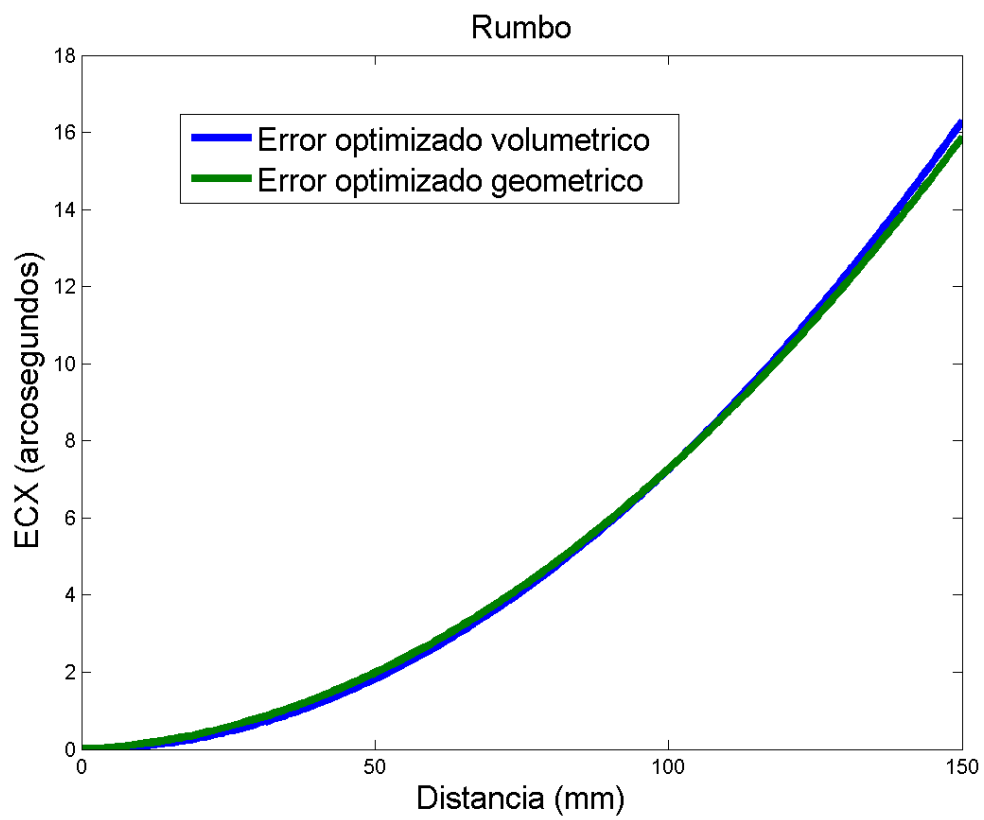
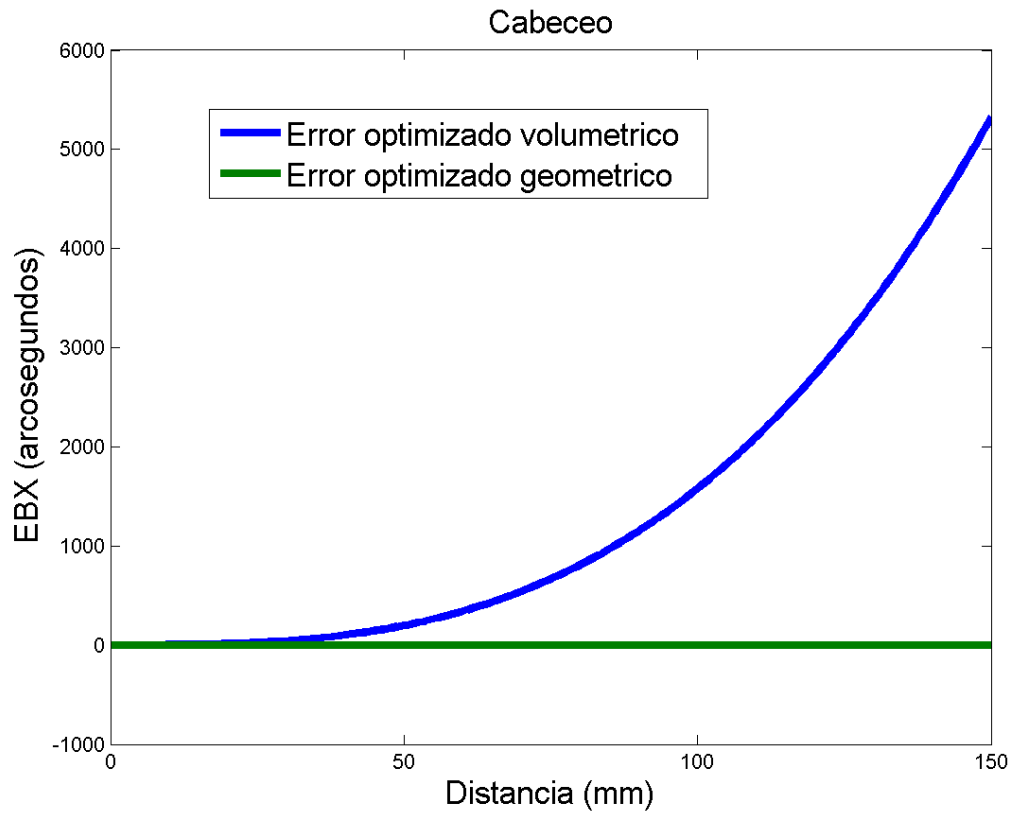
Los seis errores por cada eje que se obtienen son los siguientes:



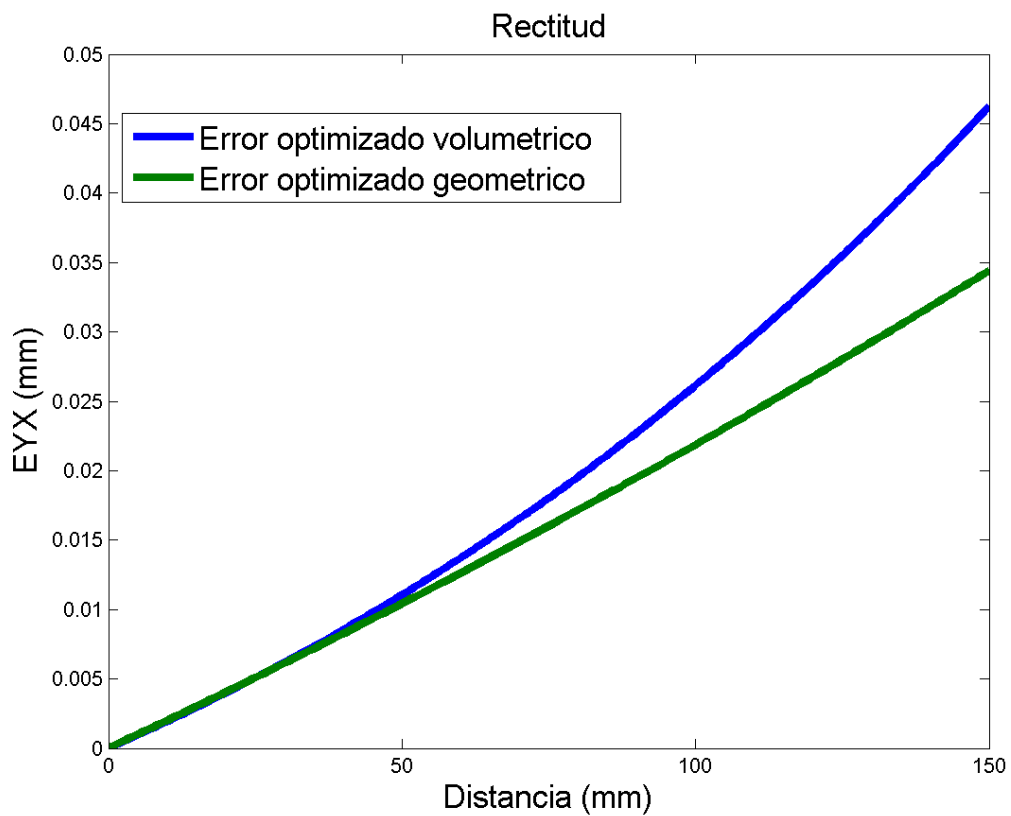
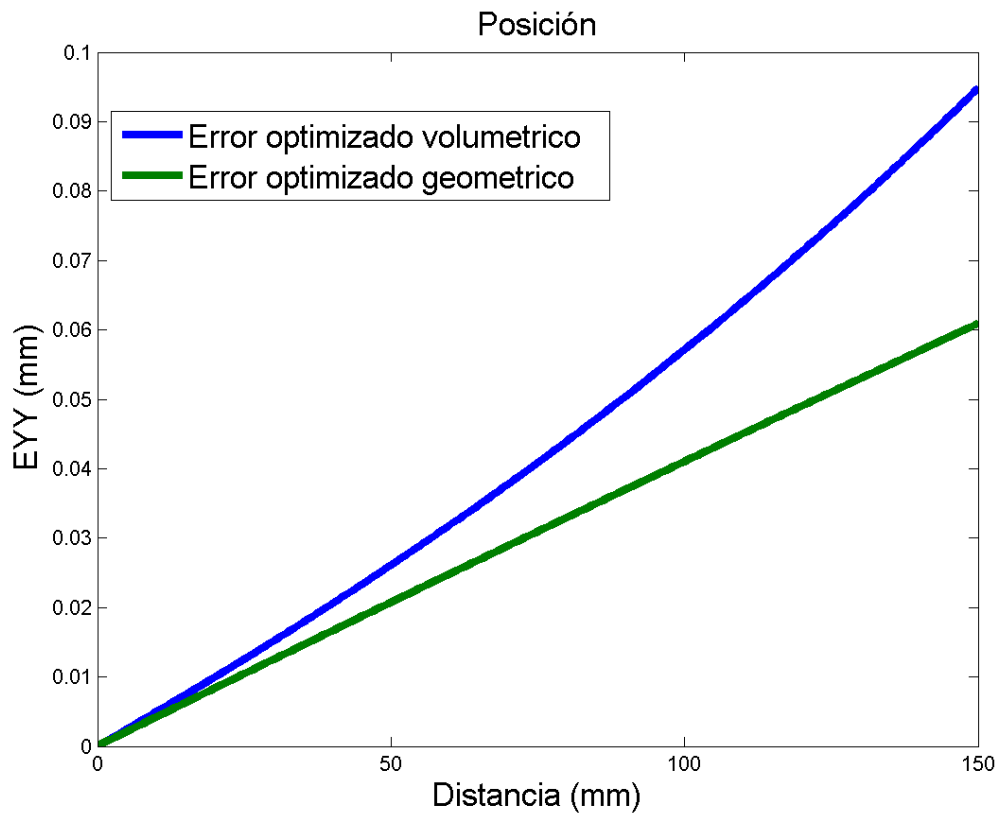
### 6.1.1 Gráficas comparativas de errores geométricos en el eje X



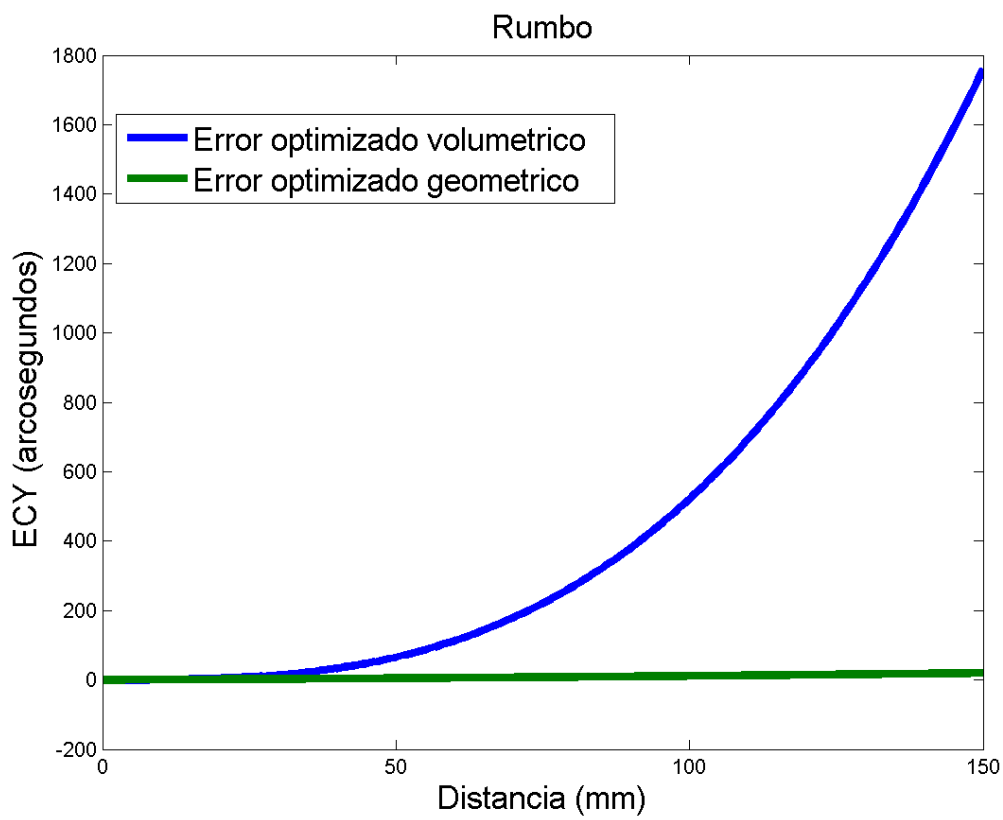
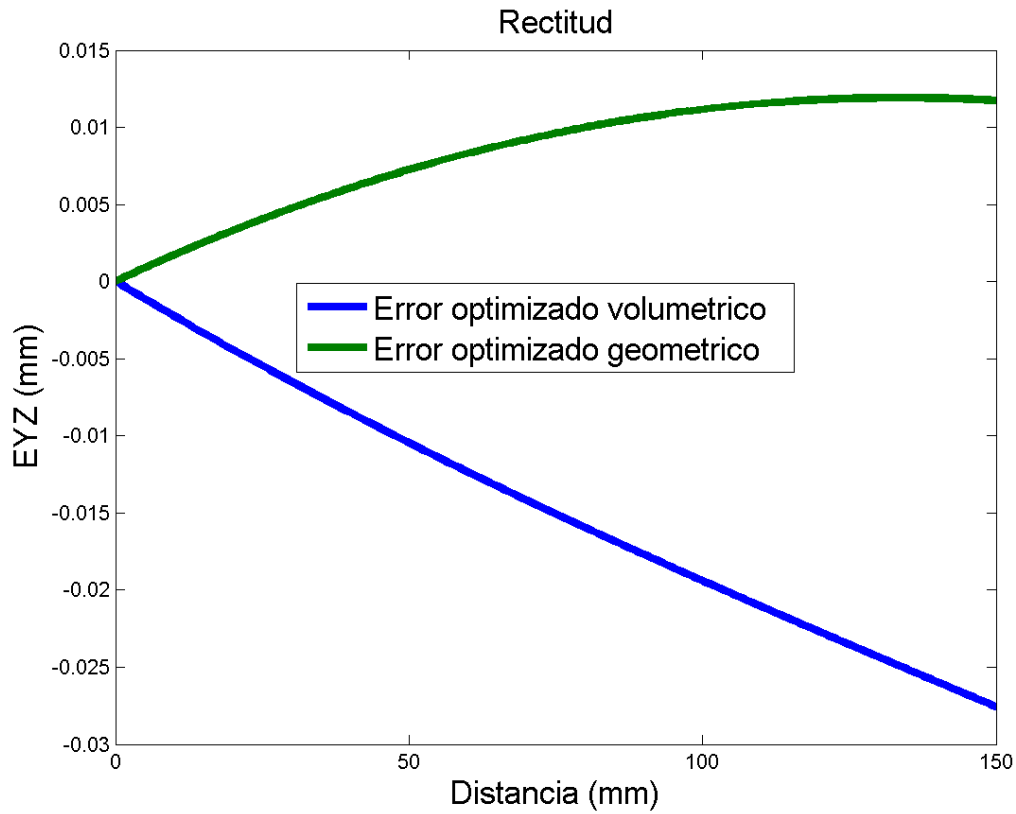


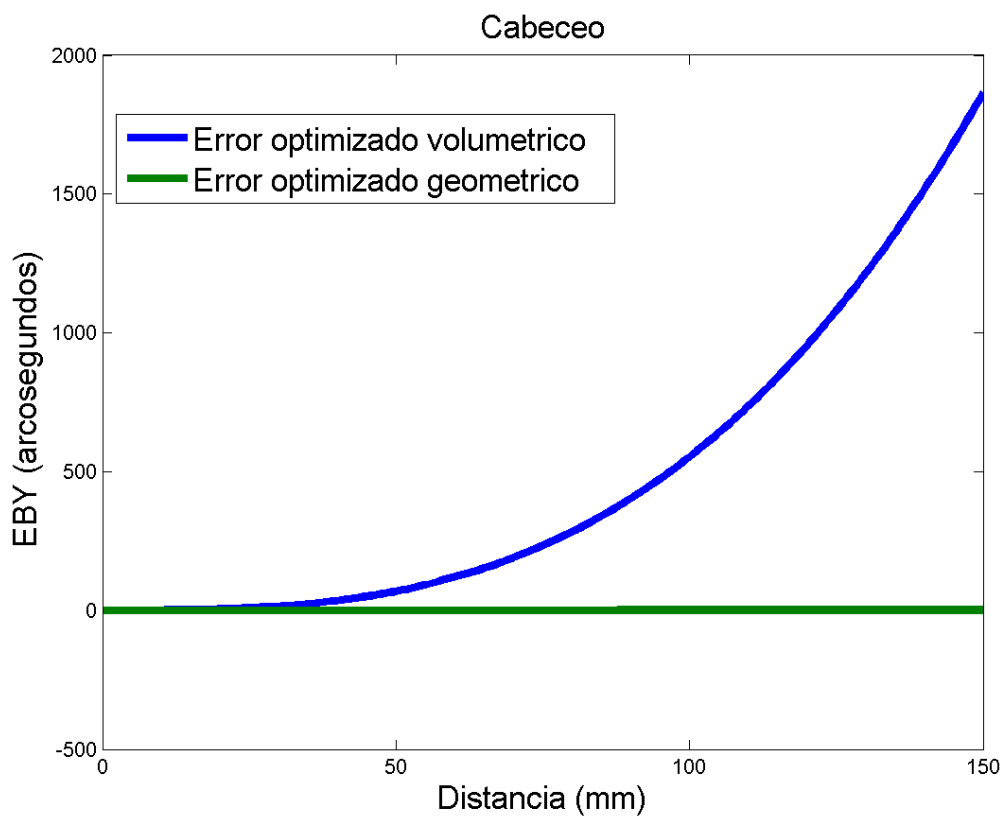
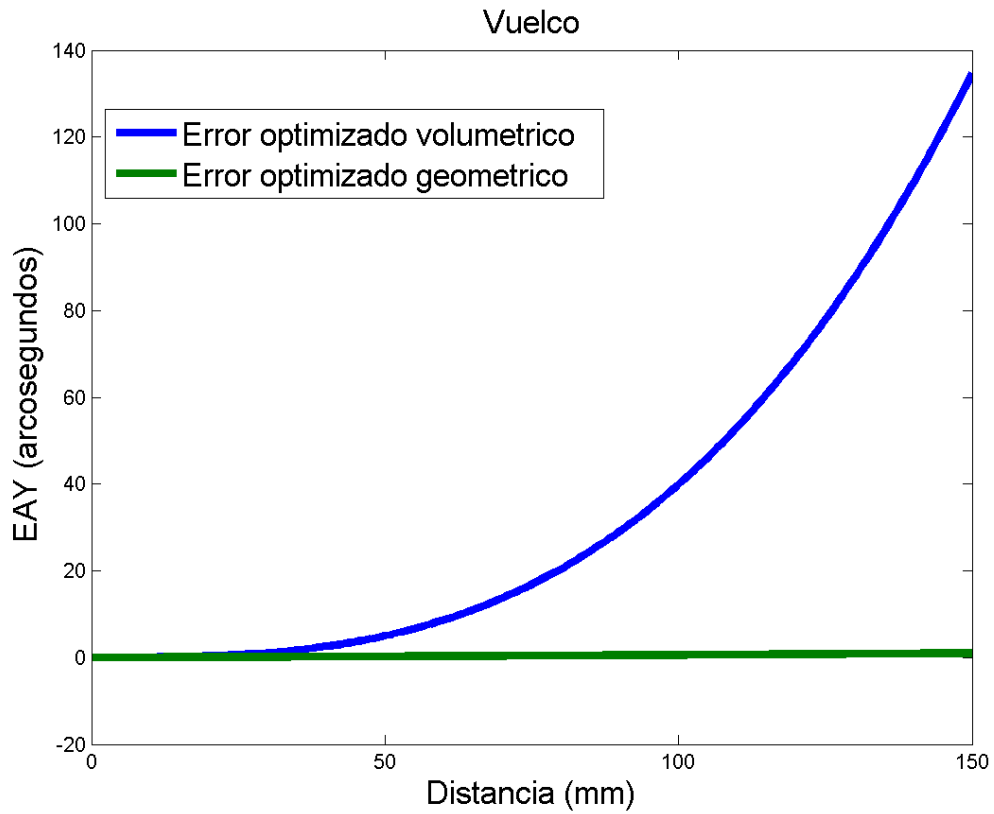


### 6.1.2 Gráficas comparativas de errores geométricos en el eje Y

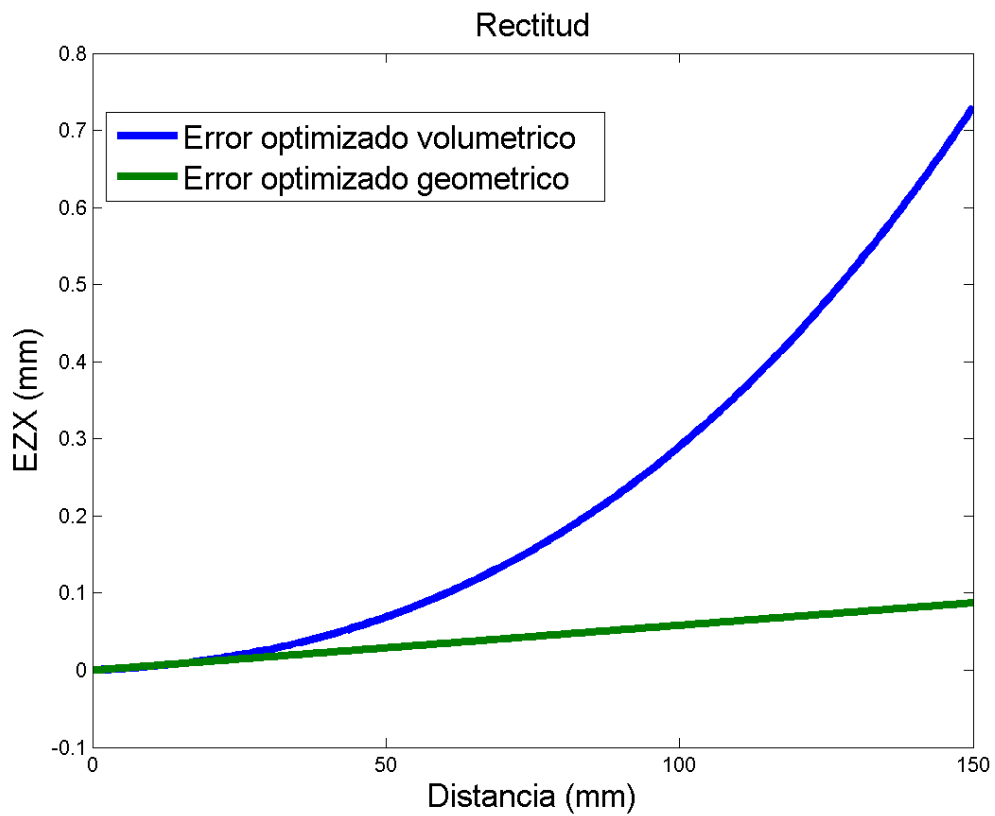
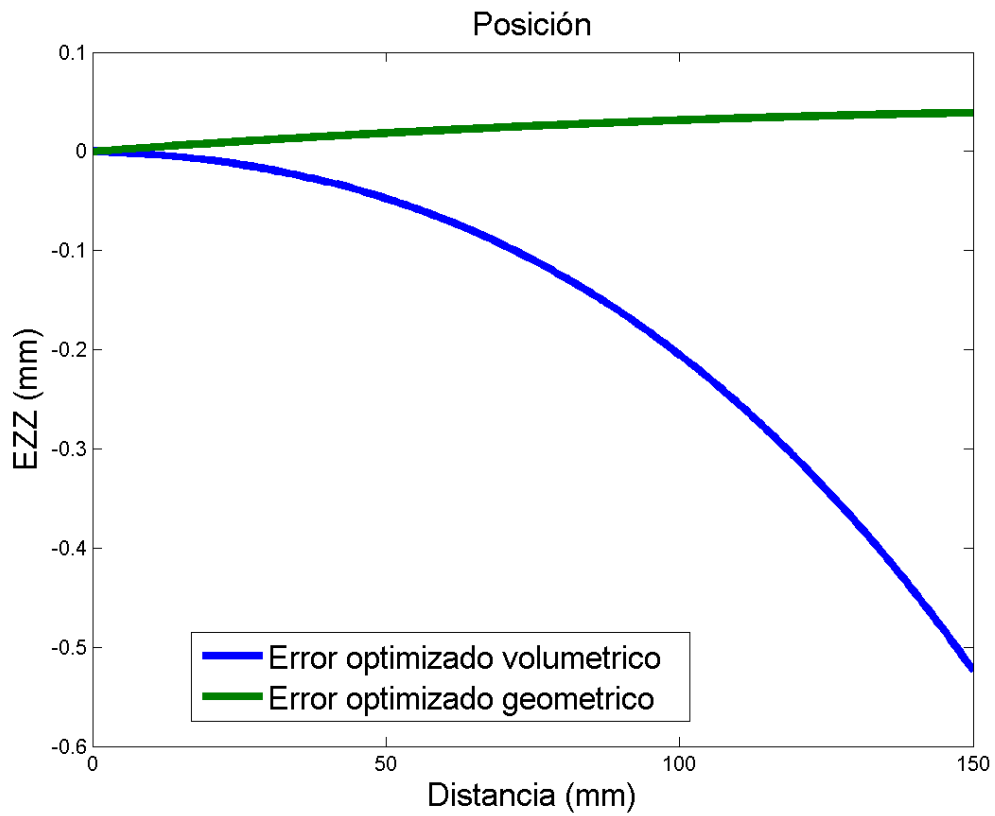


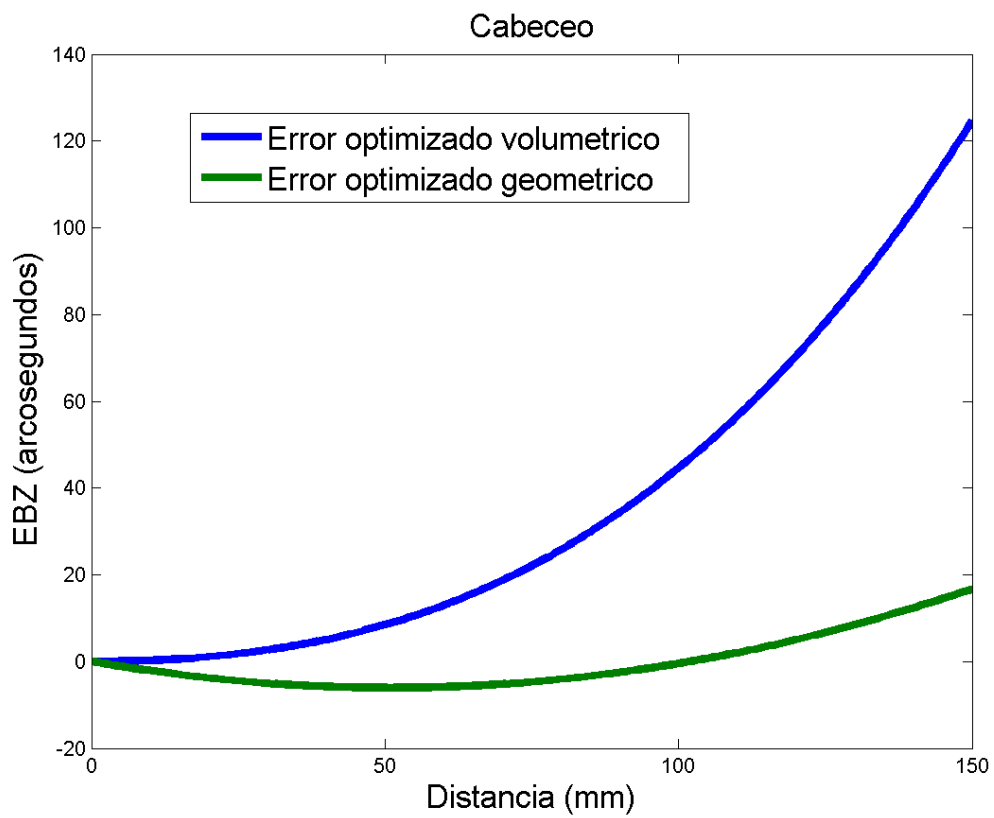
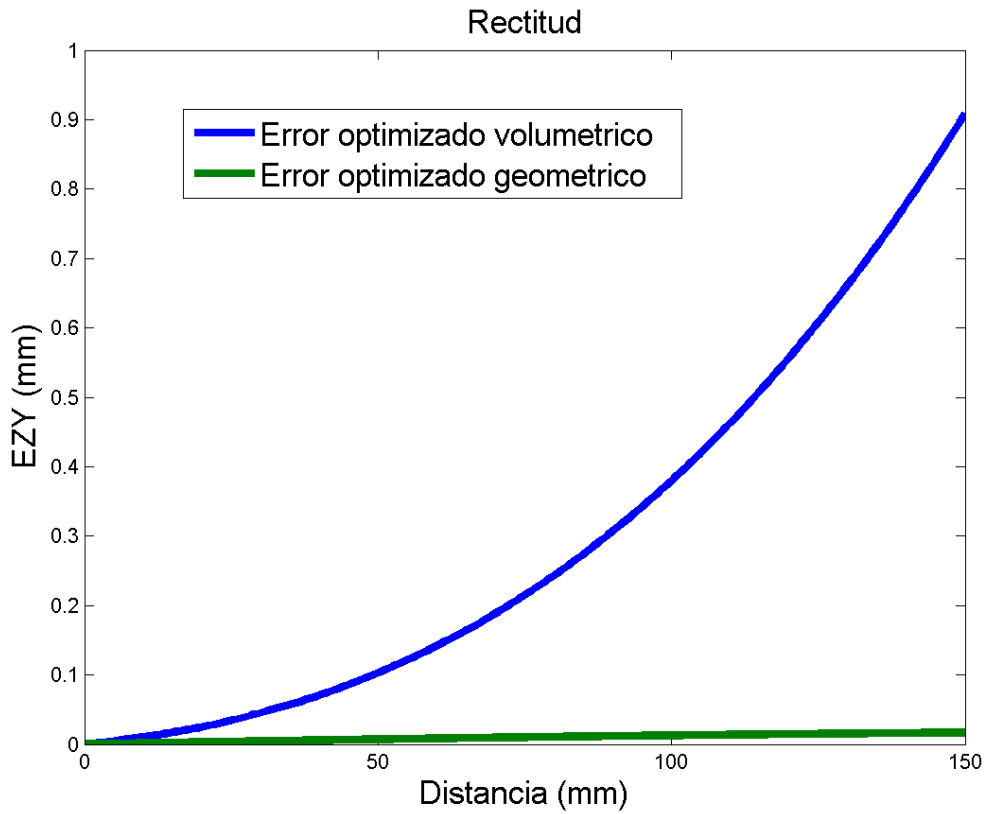


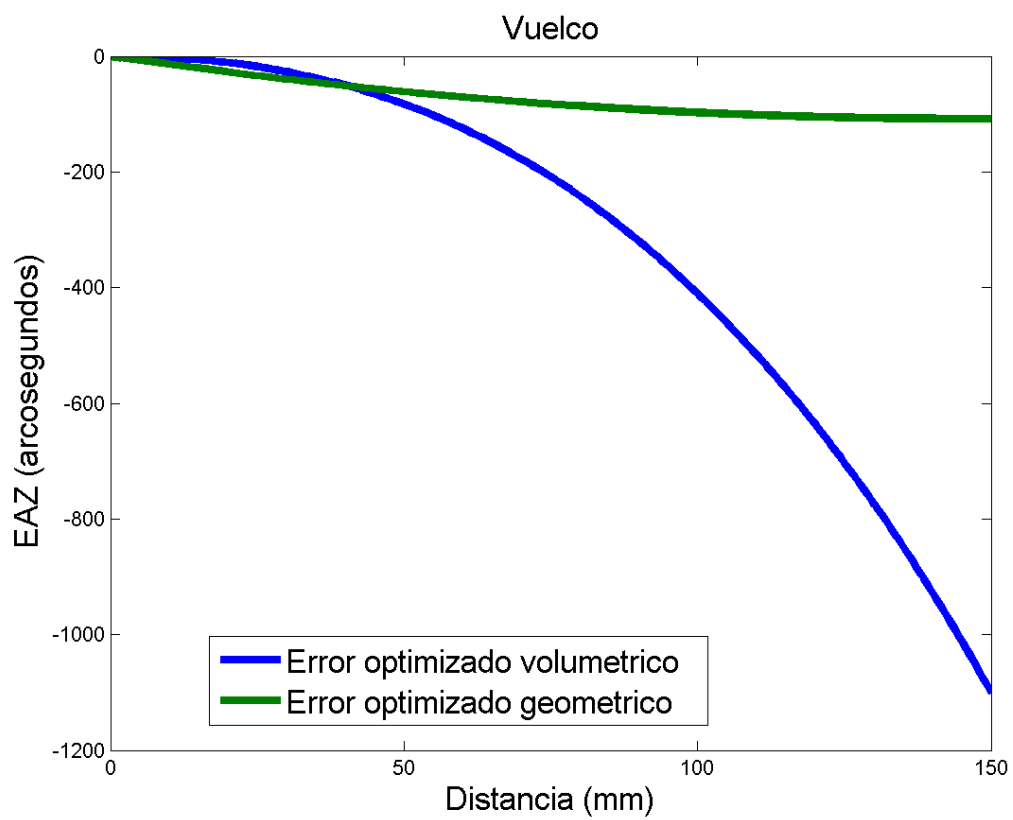
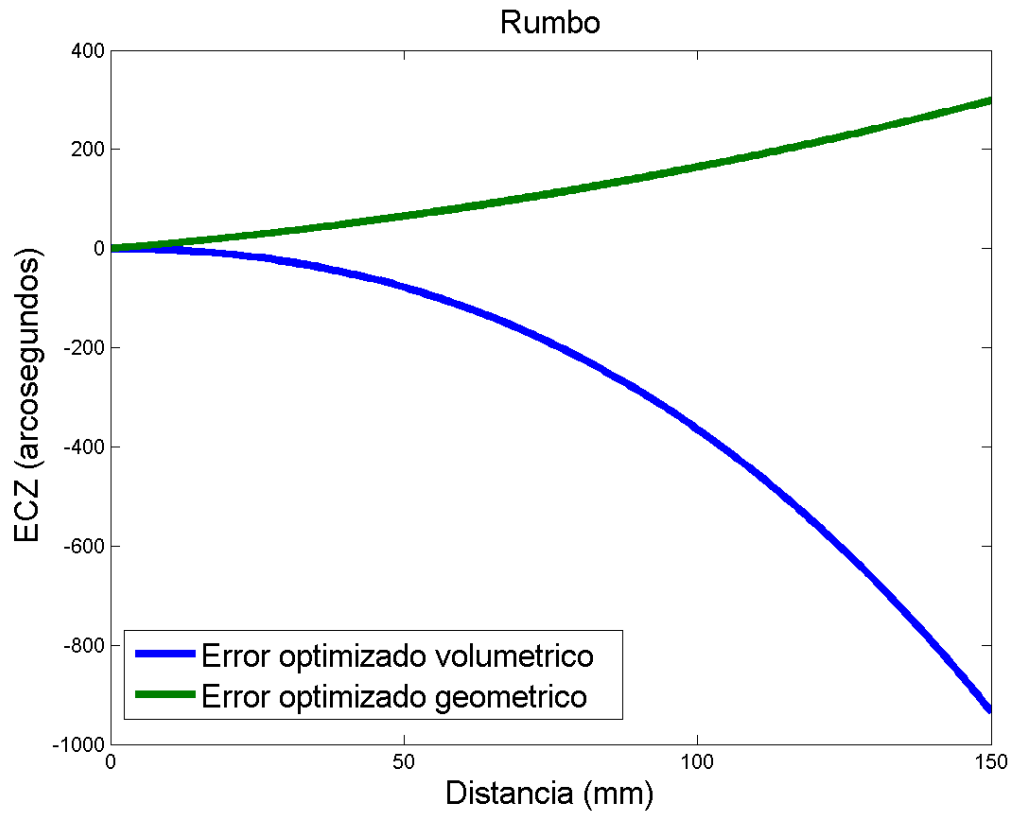




### 6.1.3 Gráficas comparativas de errores geométricos en el eje Z







## **6.2 Conclusiones**

Para finalizar la memoria de este proyecto fin de carrera, se van a exponer las diferentes conclusiones a las que se ha llegado:

- Para el cálculo de las ecuaciones en el modelo geométrico se ha considerado que el offset es cero, ya que es imposible colocar extensores en cabezal de la impresora (en una máquina herramienta sí que es posible), la tinta tiene una posición de salida y no es posible manipular el cabezal para que salga de otra forma.
- Debido a que se ha considerado offset cero, existen cuatro errores de giro que no se han podido calcular en el modelo geométrico, y por eso dan cero. Al sustituir en las formulas el offset por cero, las ecuaciones de los errores dan como resultado cero. Estos errores son: error de cabeceo en el eje X, error de rumbo en el eje Y, error de alabeo en el eje Y y error de cabeceo en el eje Y. Este resultado se puede comprobar en las gráficas que aparecen en el primer apartado de este capítulo.
- Como se ha comentado en la introducción de la aproximación volumétrica (capítulo 5), esta aproximación no tiene sentido físico. Por esta razón, los resultados que se obtienen con la aproximación volumétrica, no se parecen en nada a los obtenidos con la aproximación geométrica, que si que tiene sentido físico. En las gráficas del primer apartado de este capítulo se pueden comprobar las grandes diferencias que existen entre una aproximación y otra.
- Debido a las características que tienen las ecuaciones del modelo geométrico, para realizar las pruebas y para obtener los errores, se ha tenido que realizar un patrón con características concretas, en nuestro caso, hemos tenido que fabricar varias barras paralelas en los tres ejes, a distintas alturas, y con puntos en las diagonales.
- Sin embargo, para la aproximación volumétrica no hace falta un patrón con características concretas, ya que se utilizan puntos de todo el volumen de trabajo. Debido a esta característica, se consigue un gran ahorro en el coste de material al fabricar los patrones.
- Por lo tanto se comprueba que en nuestro caso, como se ha podido comprobar con las gráficas de los residuos, hemos conseguido que la aproximación volumétrica funcione mejor que la geométrica, ya que se ha conseguido minimizar el error y por lo tanto la diferencia entre puntos nominales y puntos corregidos es más pequeña.



## **Capítulo 7. Sistema de compensación de errores sobre piezas STL**

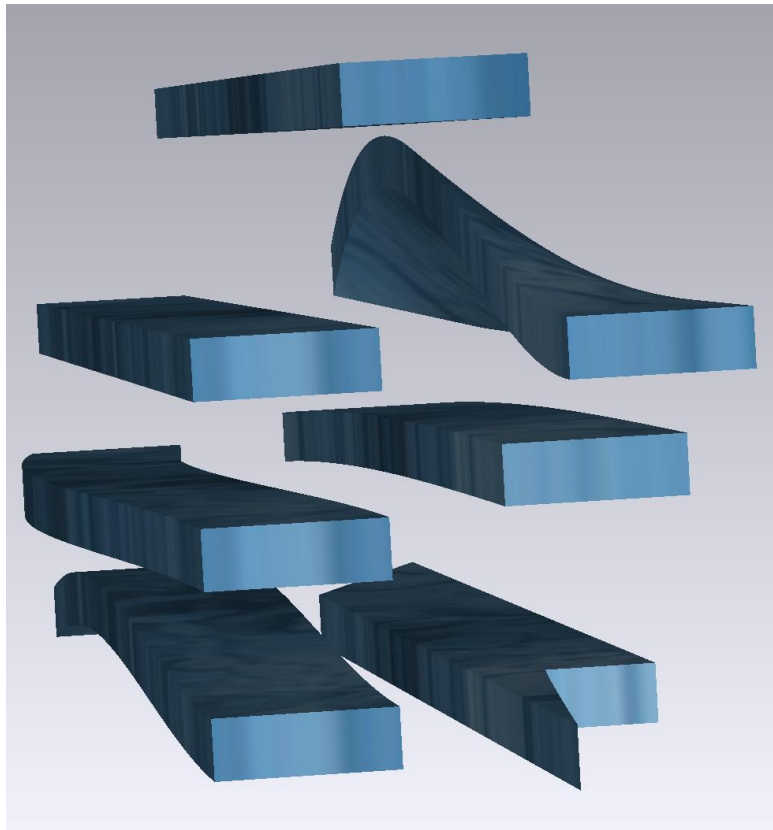
### **7.1 Introducción**

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

Una vez hemos obtenido los resultados del proceso de optimización, los parámetros de compensación han de verse reflejados en el CAD de la pieza. No existe hoy en día un software que sea capaz de realizar los ajustes pertinentes en el CAD de una pieza para esta se ajuste a la compensación requerida. Sí que es posible con diversos programas realizar un escalado y un giro de la pieza, lo cual queda muy lejos de cumplir las expectativas puestas en este método de compensación.

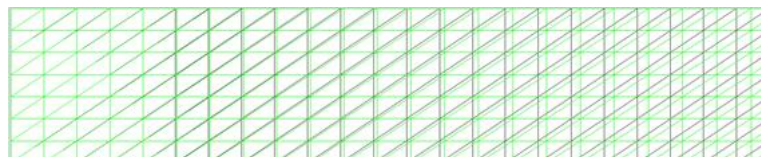
Es por esto que se ha visto la necesidad de desarrollar bajo el potente entorno de Matlab, un programa que permiten modificar los ficheros CAD. A continuación hemos aplicado diferentes errores sobre una pieza para observar el efecto que se produce sobre el STL.





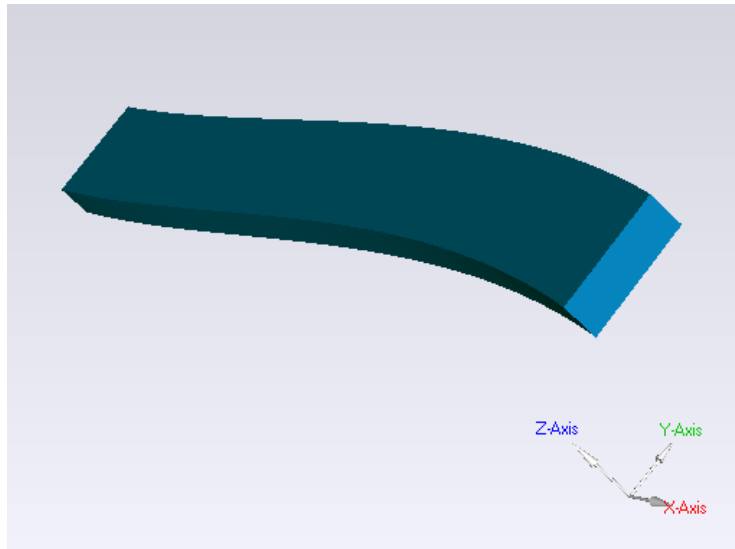
**Patrón longitudinal afectado por los 6 errores de un eje.**

En la figura superior, se ilustra cómo afecta cada uno de los 6 errores que es susceptible de sufrir cada uno de los 3 ejes que definen el sistema de coordenadas de una máquina herramienta junto con el patrón en la parte superior central.



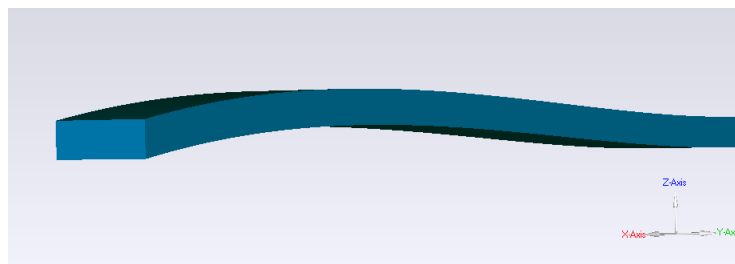
**Error de Posición XTX**

El error de posición es difícil de apreciar visualmente por lo que se muestran los triángulos que forman el STL de la pieza. En verde los de la pieza con error van alejándose de los originales en negro. Este sería el típico error de escala que haría que la pieza sufriera un escalado según el eje X.



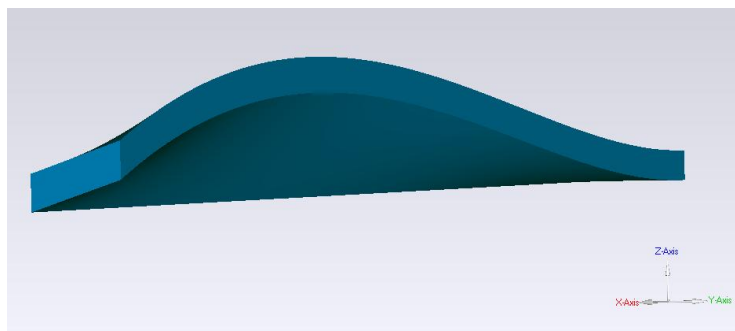
**Error de rectitud horizontal XTY**

Como se puede apreciar en la figura se produce una deformación que mantiene la pieza con sus superficies principales paralelas entre sí y al plano X-Y pero que deforma la pieza manteniéndola en las coordenadas Z.



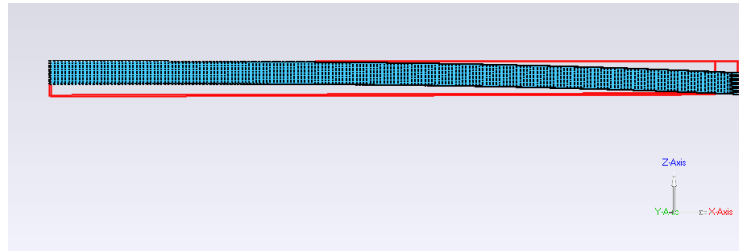
**Error de rectitud vertical XTZ**

En este caso las coordenadas de Y permanecen invariantes produciéndose la deformación en los otros ejes. Permaneciendo las superficies paralelas al plano X-Z en su mismo plano.



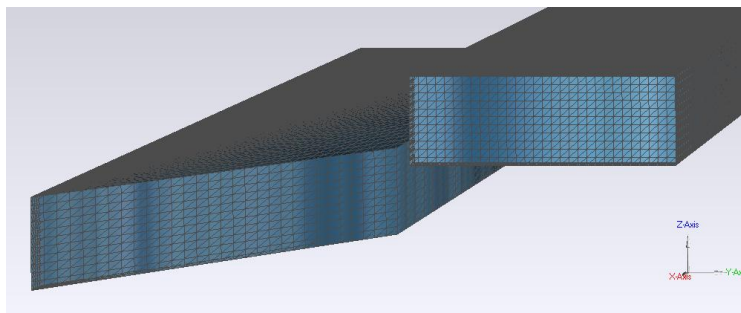
**Error de vuelco vertical XRX**

Como caracteriza a un error de vuelco conforme avanzamos en el eje X va variando el giro de la pieza sobre ese mismo eje.



**Error de cabeceo XRY**

Según nuestro modelo, el error de cabeceo XRY no se produce a no ser que la herramienta presente un determinado offset, cosa que no esperamos pero como el objetivo de este apartado es ilustrar el efecto de los errores en piezas definidas en formato STL se ha añadido un cierto valor. En rojo se muestra la caja envolvente para que se pueda apreciar mejor el efecto.



**Error de Rumbo XRZ**

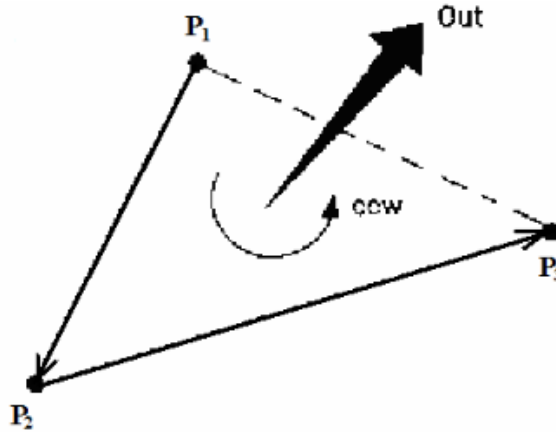
El error de rumbo se muestra en la figura, a la izquierda de la pieza original, para que se vea de un modo más unívoco este efecto que tiende a girar respecto al eje Z los puntos.

## **7.2 Compensación global.**

Aquí se explica cómo se hace la compensación con cada vértice y se vuelven a calcular las normales. Esto tiene la ventaja de que la corrección se aplica a los puntos tal y como están definidos en el fichero STL.

Dado el modelo de error de la máquina, la posición real de cada vértice en el archivo STL, se puede predecir. Para compensar el error entre la posición real y la

posición nominal, el valor negativo de esta diferencia se añade a las coordenadas nominales del vértice en el archivo de STL con antelación. El vector unitario normal puede ser re-calculado para cada faceta usando los vértices compensados.



## A Facet of the STL Model

Dadas las coordenadas de los tres vértices  $P_1 (x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2 (x_2, y_2, z_2)$ , y  $P_3 (x_3, y_3, z_3)$ , el vector normal se puede obtener tomando el producto vectorial de los vectores  $\overline{P_1P_2}$  y  $\overline{P_2P_3}$ .

Las coordenadas del punto final del vector normal se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$x_v = (y_2 - y_1) \times (z_3 - z_2) - (z_2 - z_1) \times (y_3 - y_2)$$

$$y_v = -(x_2 - x_1) \times (z_3 - z_2) + (z_2 - z_1) \times (x_3 - x_2)$$

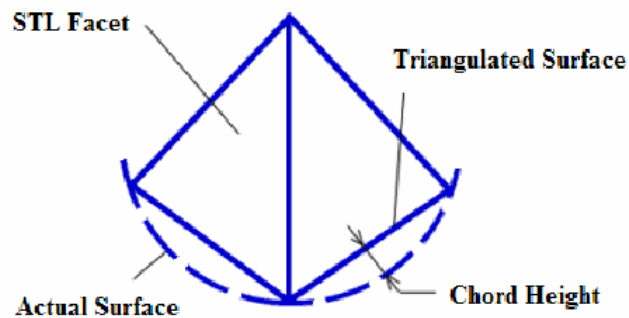
$$z_v = (x_2 - x_1) \times (y_3 - y_2) - (y_2 - y_1) \times (x_3 - x_2)$$

La magnitud del vector normal es  $L_v = \sqrt{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2}$ . Dividendo  $(x_v, y_v, z_v)$  por  $L_v$ , obtenemos el vector unitario que debe ser guardado en el archivo de salida STL.

Cuando generas un archivo STL desde un modelo CAD, el número de facetas en el modelo STL depende del parámetro de precisión escogido por el usuario.

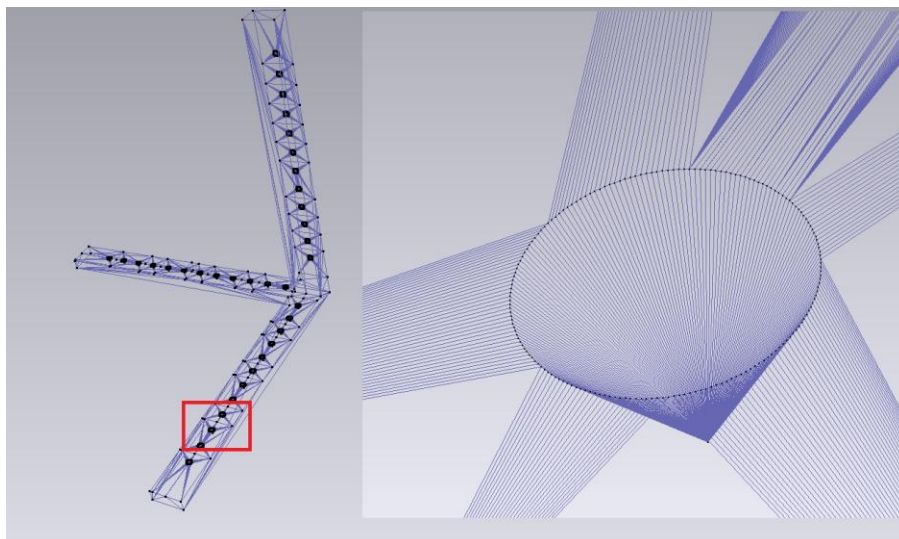
Por ejemplo, en el programa Pro/Engineer, los usuarios pueden elegir su propio valor de "altura de cuerda", que numéricamente se describe como la máxima distancia

entre la superficie de la parte real y la superficie triangulada del archivo STL que describe la pieza.



### Definition of Chord Height

Cuanto menor sea la altura de cuerda, más triángulos son necesarios para describir una sección particular de la geometría de la pieza, y por lo tanto se obtiene una mejor resolución de la faceta. El tamaño de un archivo suele ser a menudo extremadamente grande con valores bajos de altura de cuerda. Las piezas que contienen geometrías complejas y alturas de cuerda pequeñas, pueden contener más de 100.000 triángulos. La compensación para un gran archivo STL, tiene que hacerse de forma automática.



**Pieza patrón 3 ejes y detalle alojamiento**

Como se puede observar en la Pieza patrón 3 ejes y detalle alojamiento, algunos de los triángulos son pequeños mientras que otros son de grandes

dimensiones. Aplicar la corrección de manera global implica que el espacio entre vértices no se ve compensado directamente, sino como resultado de la modificación de los vértices.

Se puede explicar dónde reside el problema con un ejemplo. Un plano de gran área que presente un error de forma tras su fabricación verá corregidos sus 4 vértices puesto que está formado por dos triángulos que comparten dos de sus vértices pero sin embargo a lo largo del plano seguirán apareciendo estos errores de forma.

Ante este problema se plantean dos alternativas.

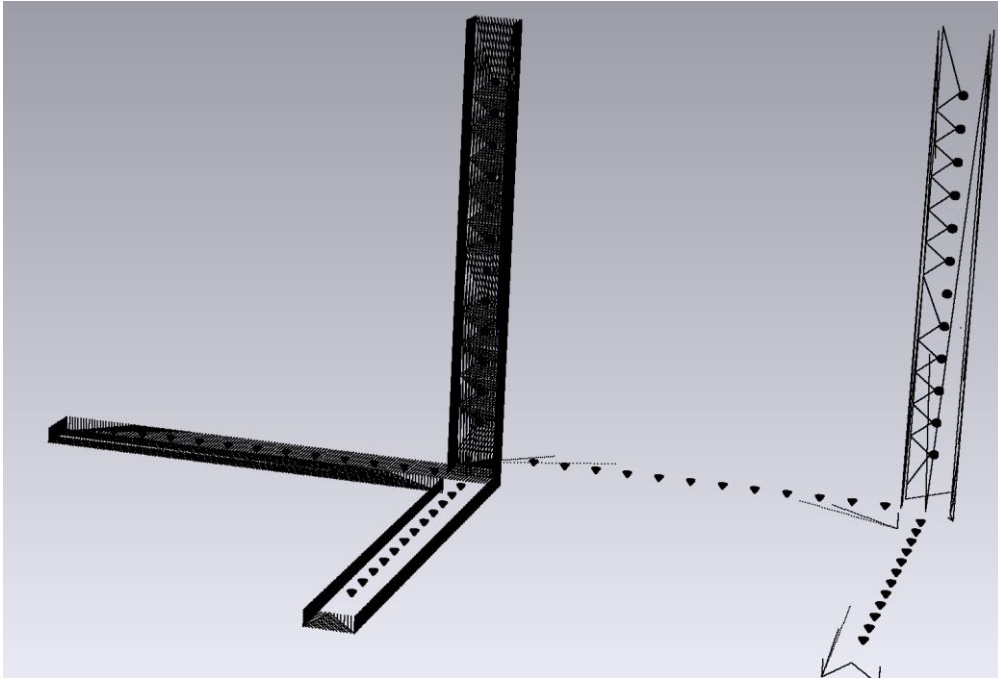
1.- Aumentar artificialmente el número de triángulos que componen el STL. Esto puede hacerse ajustando las opciones de conversión en el software de CAD pasando de los formatos típicos de CAD como IGS, STEP o PAR al fichero STL que puede interpretar la impresora. Al final lo que vamos a conseguir es una redundancia que resulta innecesaria en el CAD original pero que va a permitir aplicar con mayor exactitud la corrección. Se ha podido observar que esto influye notablemente en el tiempo de cálculo requerido y ha conllevado un cambio en los algoritmos ante la necesidad de aprovechar las arquitecturas multinúcleo de los ordenadores actuales.

2.- No corrigiendo los vértices sino las SLICES que es definitivamente lo que utiliza la impresora para fabricar. En el siguiente apartado se trata esta opción más detenidamente.

### **7.3 Compensación de SLICES**

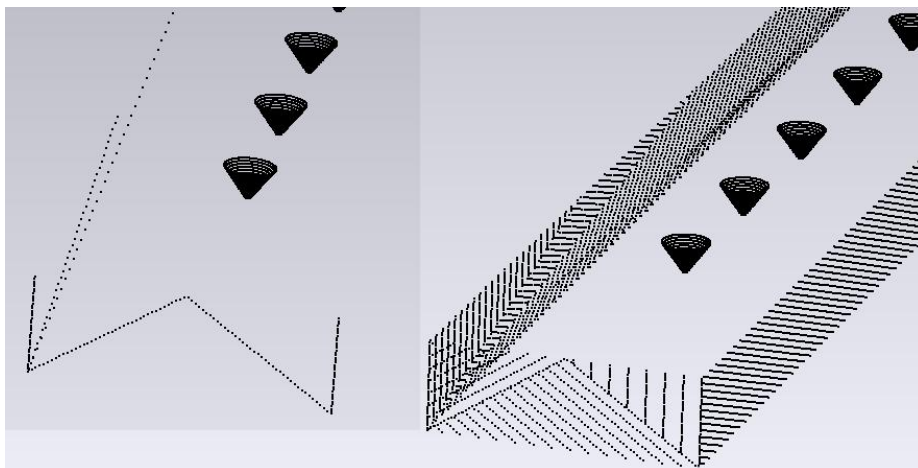
Al tratarse de una impresora que realiza un proceso aditivo por capas parece interesante aplicar el modelo de compensación individualmente a cada capa. Para lo cual en lugar de utilizar la definición en formato STL se utiliza su alternativa por capas SLC. Este formato define los contornos que componen cada capa. Define tantos contornos exteriores e interiores como sea necesario.

Al mostrar los valores de los puntos del SLC nos encontramos con un problema similar al que se planteaba con los ficheros STL. Cuando entre dos puntos del contorno existe una línea recta esta no se define quedando al igual que en los triángulos anteriores indefinida y por lo tanto no susceptible de compensación mas que en su punto inicial como final. Como se ve en la figura el problema de la indefinición explícita de alguno puntos es similar al que nos encontrábamos.



**Datos en fichero SLC (derecha) y reconstrucción (izquierda)**

Sin embargo no existe ningún software comercial que nos ofrezca la posibilidad de aumentar la densidad de estos puntos. Es por ello que se ha decidido incluir en el algoritmo de compensación un sistema de interpolación de puntos en las rectas con lo que se consigue aumentar la densidad de puntos al nivel en que sea necesario. En concreto se ha establecido la distancia máxima entre puntos de un mismo contorno como el valor parametrizable del algoritmo para poder en todo momento llegar a un compromiso entre la calidad y el tiempo que nos cuesta llegar al resultado final de la compensación. En las figuras podemos apreciar el funcionamiento con 1mm de distancia máxima entre puntos.



**Detalle reconstrucción SLC**

Pero en el caso de las SLICES el problema no queda aquí. Observando las figuras superiores, se llega a la conclusión de que las superficies paralelas al plano X-Y, plano

de depósito de capa, quedan indefinidas. Es más, son susceptibles de albergar un error de igual magnitud que el espesor de capa, en el caso concreto de la impresora OBJET EDEN 350 V 16 o 30 micrómetros dependiendo de la calidad seleccionada. Por otra parte este error está siempre presente puesto que la impresora utiliza este plano para ir depositando sus capas.

Para poder reconstruir desde nuestro fichero de capas compensado el STL hemos de recurrir a software comercial especializado como Geomagic Qualify que nos permite pese a ser una tarea manual hacerlo de una manera sencilla y rápida.





## **BIBLIOGRAFÍA**

- H. Schwenke. "Geometric error measurement and compensation of machines". *Manufacturing Technology* (2008).
- Abdul Wahid Khan & Wuyi Chen. "A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools". *Int J Adv Manuf Technol* (2011).
- E.L.J. Bohez. "Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002).
- Mohamed Slamani & Rene Mayer & Marek Balazinski. "Dynamic and geometric error assessment of an XYZ axis subset on five-axis high-speed machine tools using programmed end point constraint measurements". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2010).
- Kun Tong; E Amine Lehtihet; Sanjay Joshi. "Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping". *Rapid Prototyping Journal* (2003).
- Kun Tong, Sanjay Joshi and E. Amine Lehtihet. "Error compensation for fused deposition modeling (FDM) machine by correcting slice files". *University of Pennsylvania* (2010).
- Kun Tong, E. Amine Lehtihet, Sanjay Joshi. "Software compensation of rapid prototyping machines". *Precision Engineering* 28 (2004).
- Sergio Aguado, David Samper, Jorge Santolaria, Juan José Aguilar. "Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 53 (2012).



# **ANEXOS**



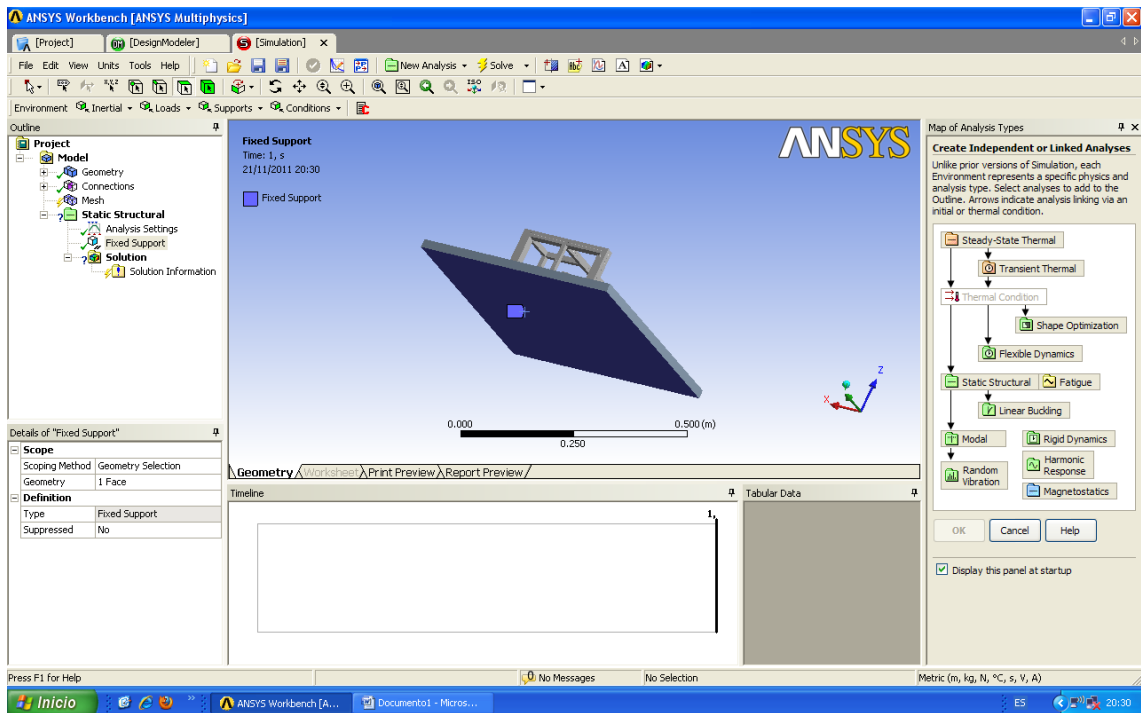
## **Anexo 1. Ensayos de deformación con Ansys**

Se va a realizar con el programa ANSYS, un estudio de posibles deformaciones que pueda experimentar la pieza al ser palpada en la máquina de medir por coordenadas.

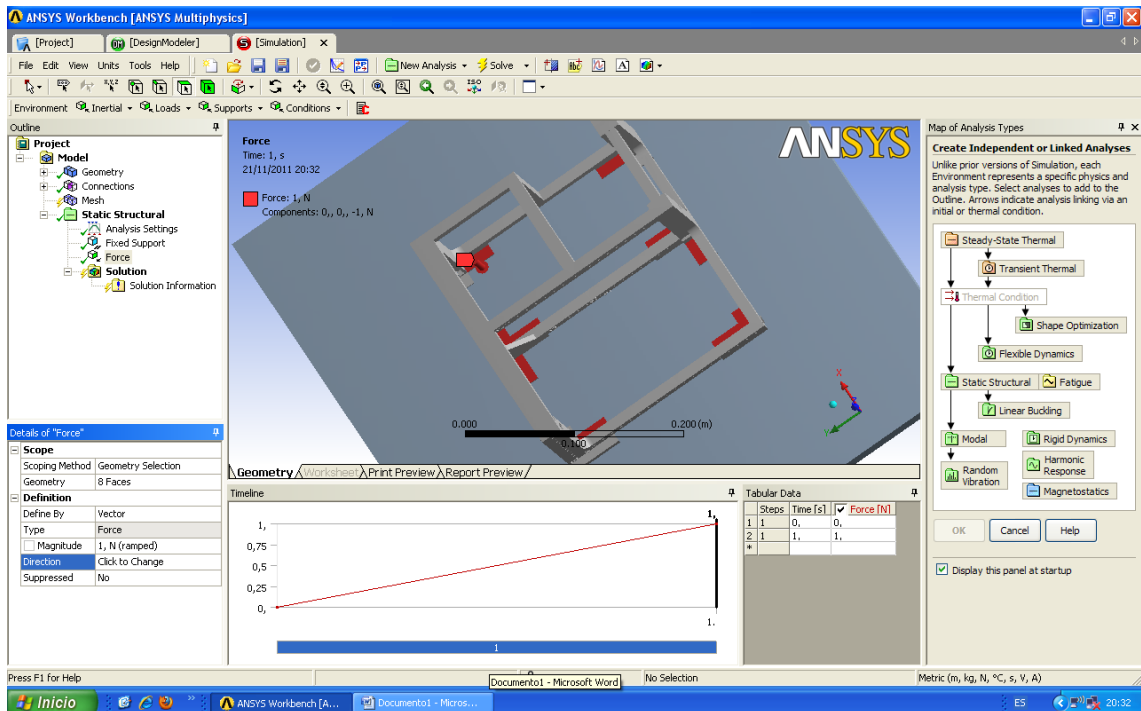


### A.1.1 Original

Lo que primero se realiza es anclar la mesa.

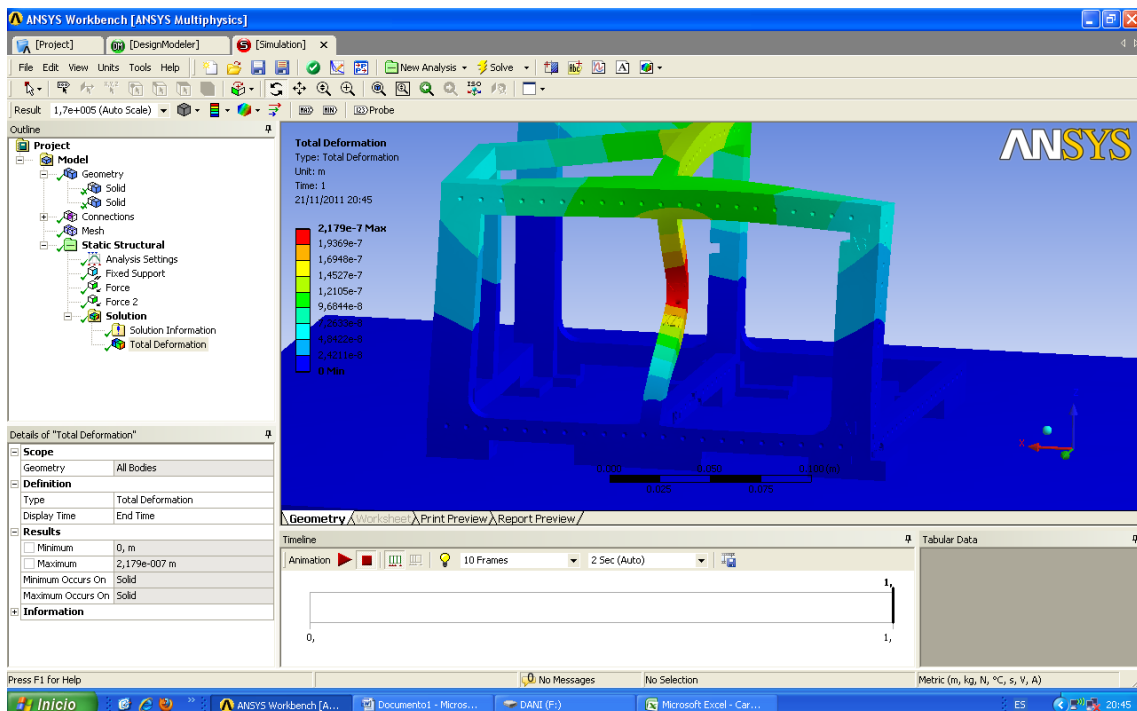
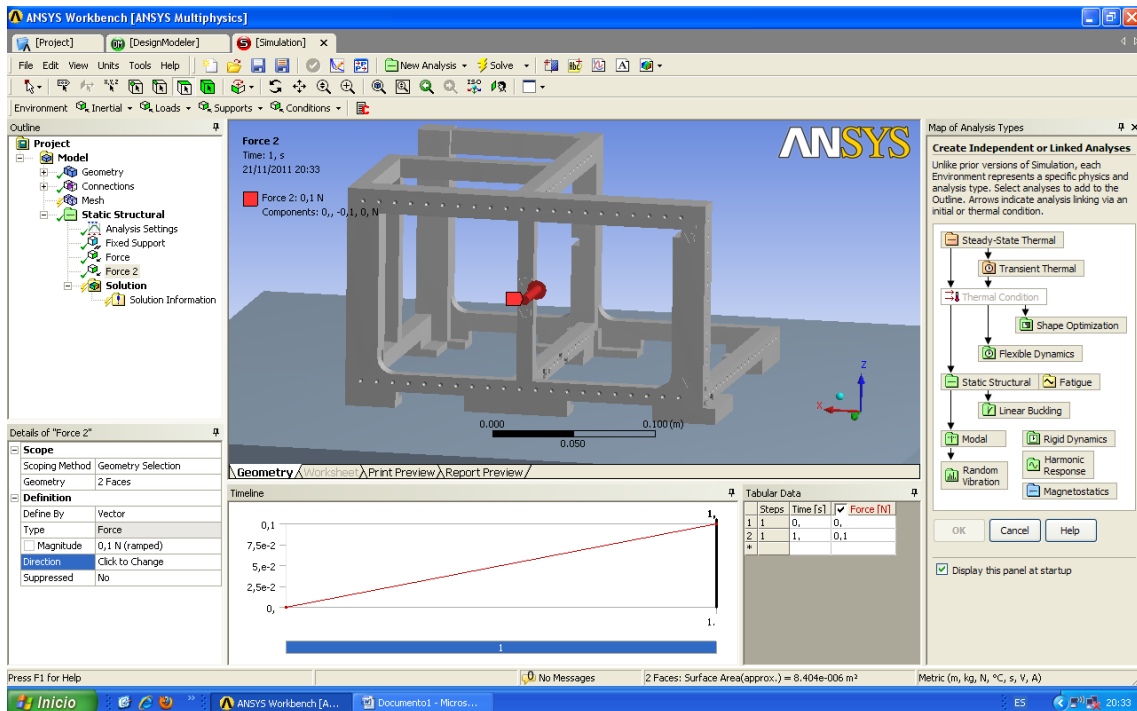


La premisa de la que se parte, es que la pieza no se puede deformar más de una micra al ser palpada. Para ello anclamos la pieza con ocho sujeciones de 1 Newton cada una:



A continuación se realizan ensayos en distintos puntos de la pieza, aplicando fuerzas puntuales de un Newton y observando que la deformación que se experimenta es menos de 1 micrómetro.

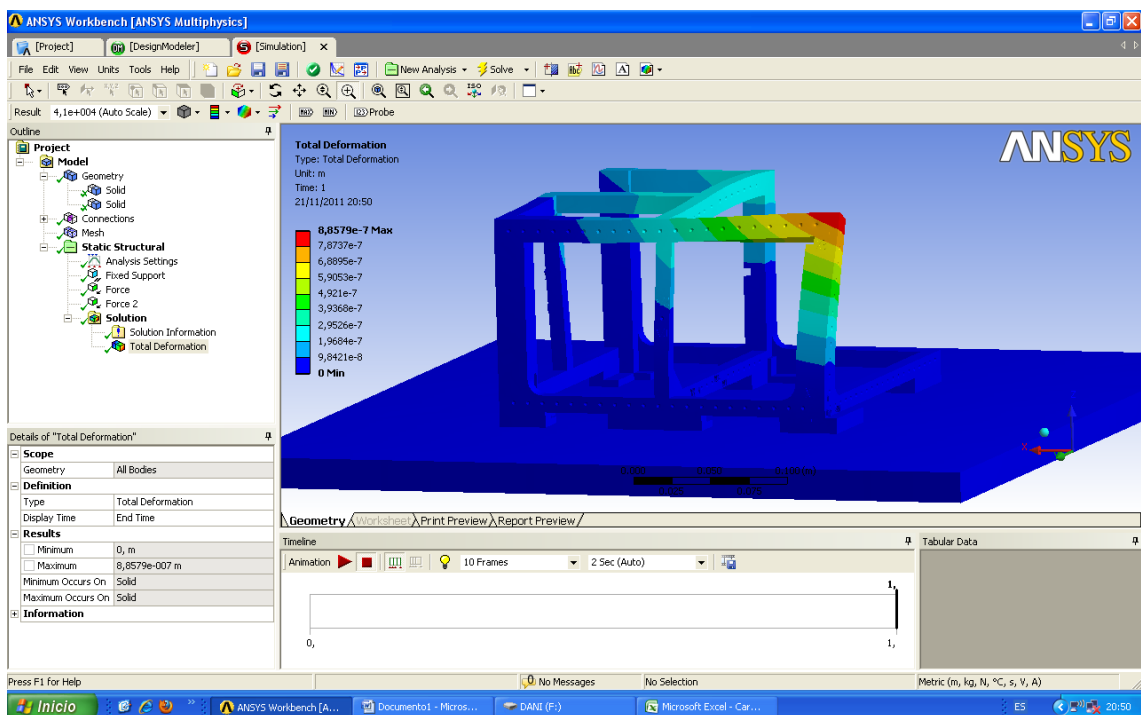
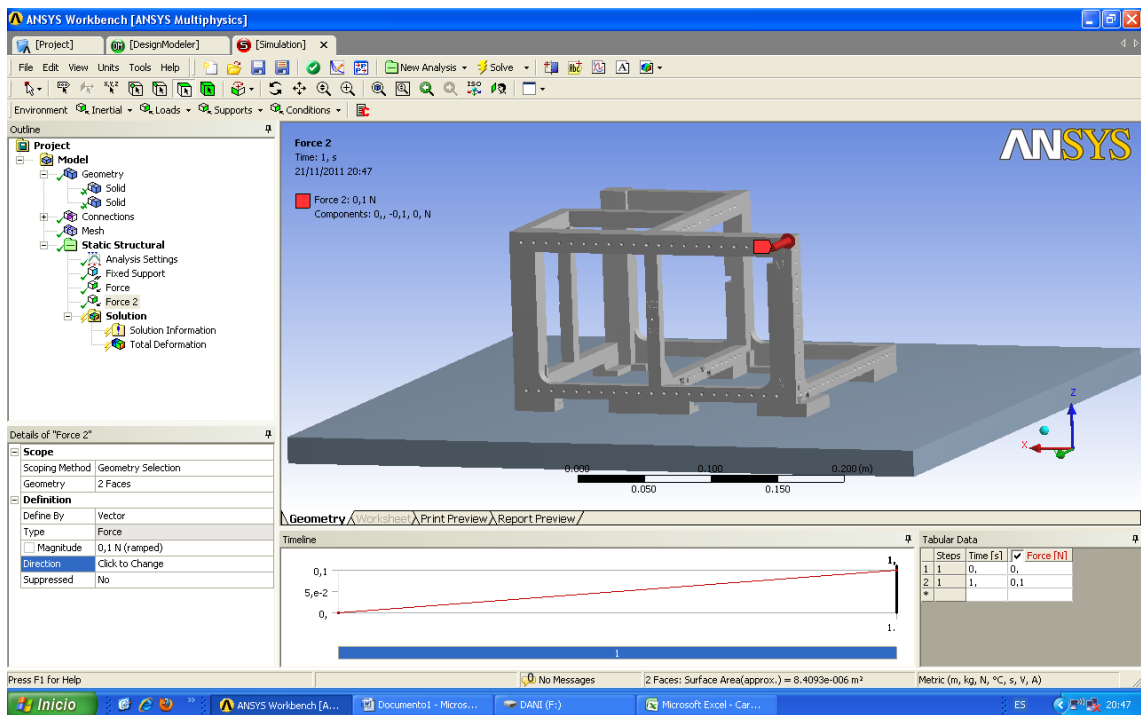
### 1ª Simulación



Deformación Máxima: 0,21 micras → OK!!!

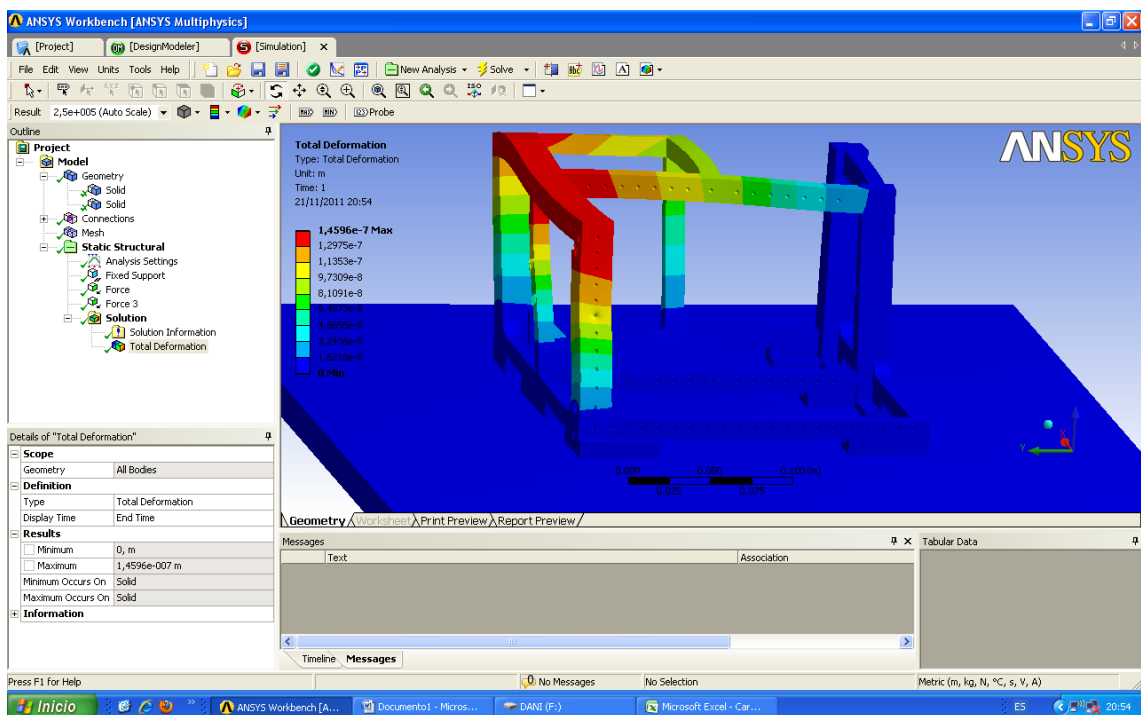
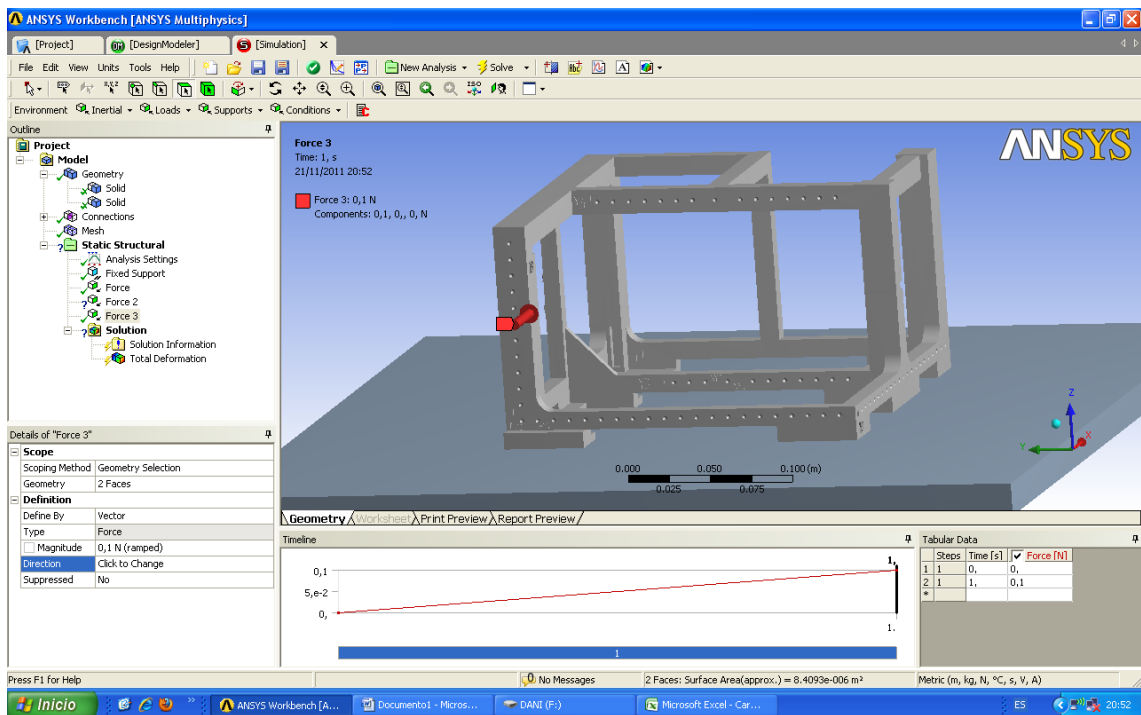


2ª Simulación



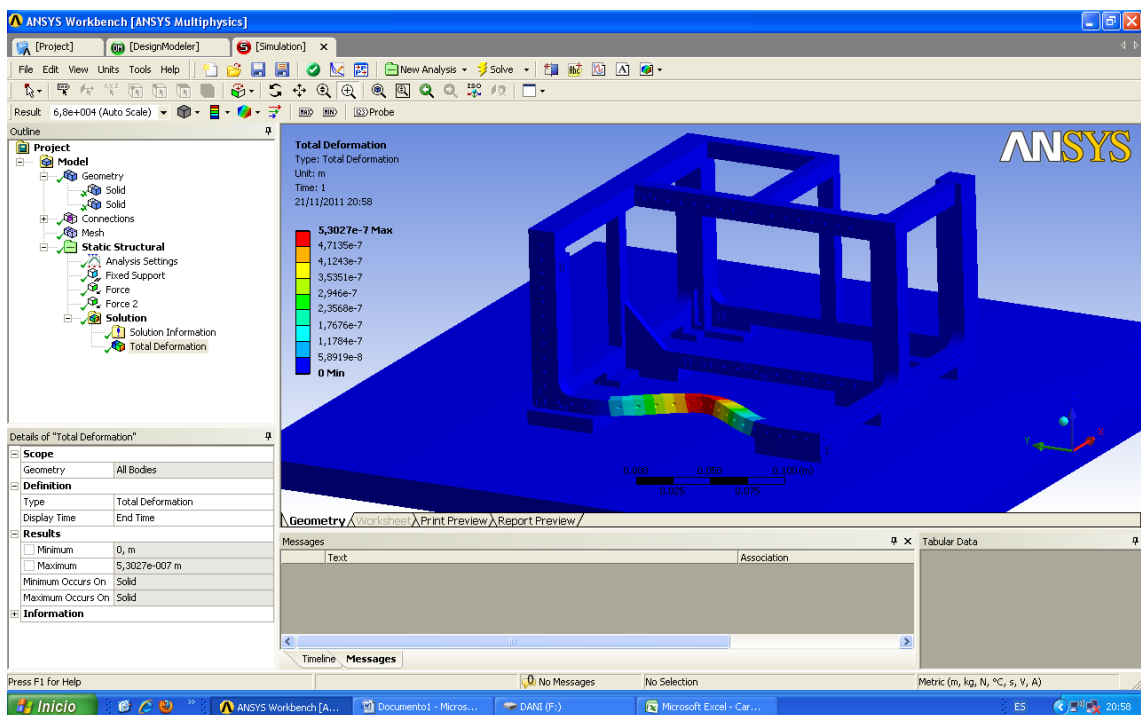
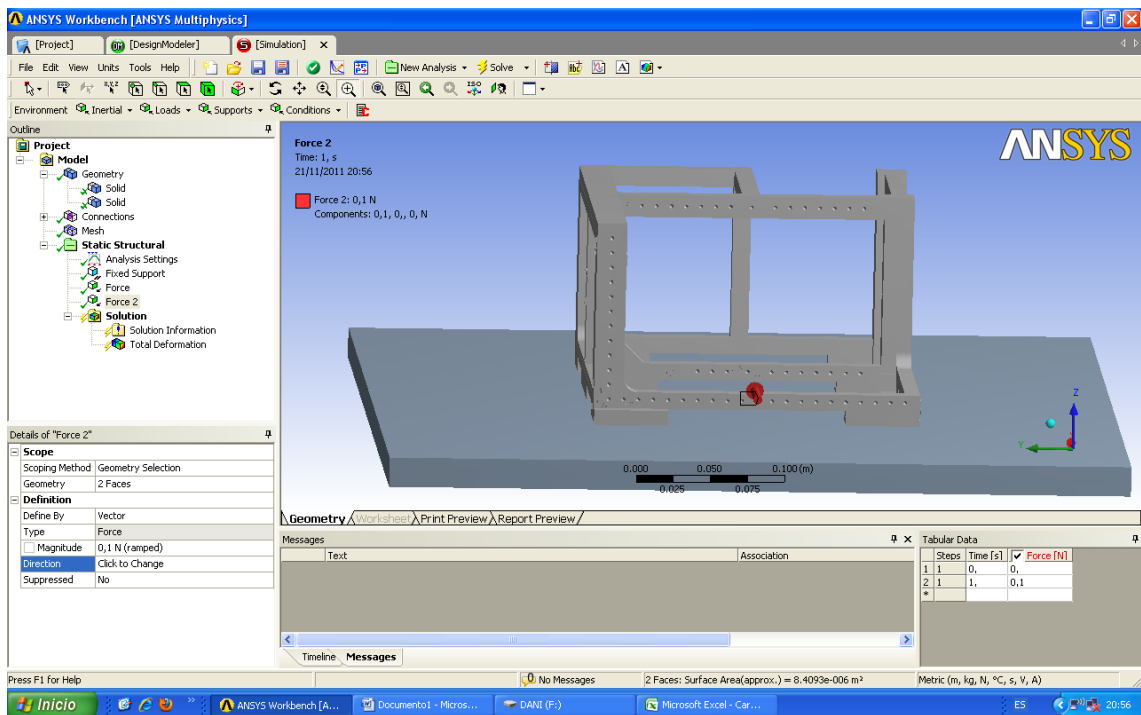
Deformación Máxima: 0,88 micras → OK!!!

3ª Simulación



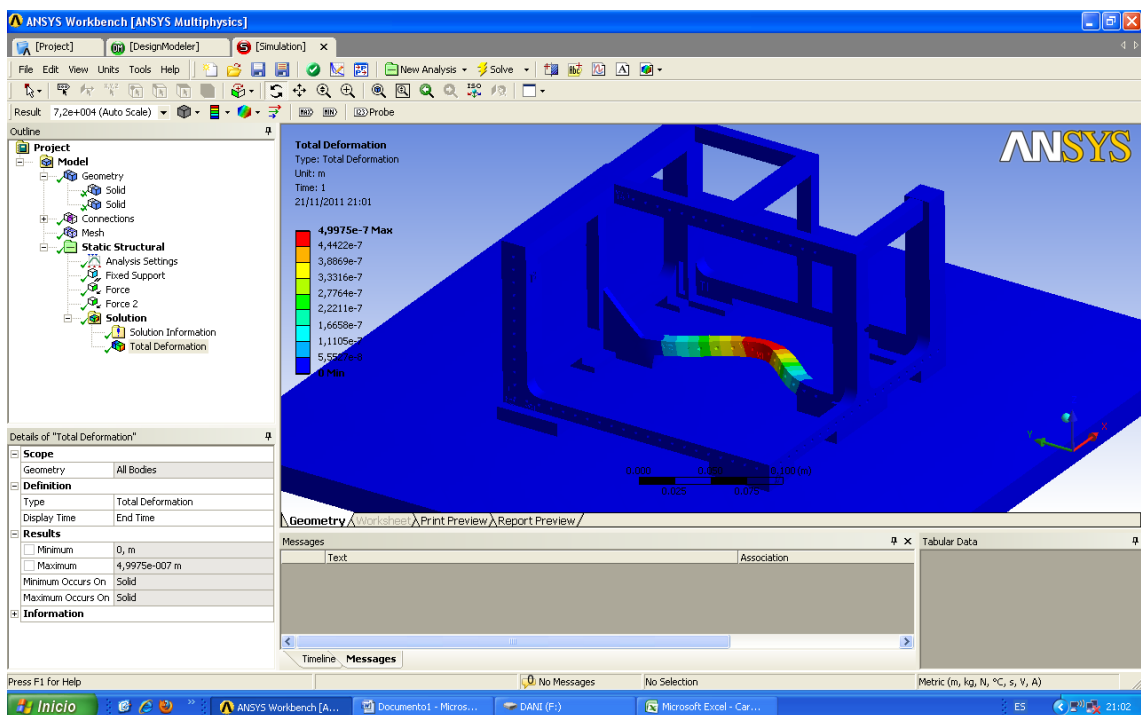
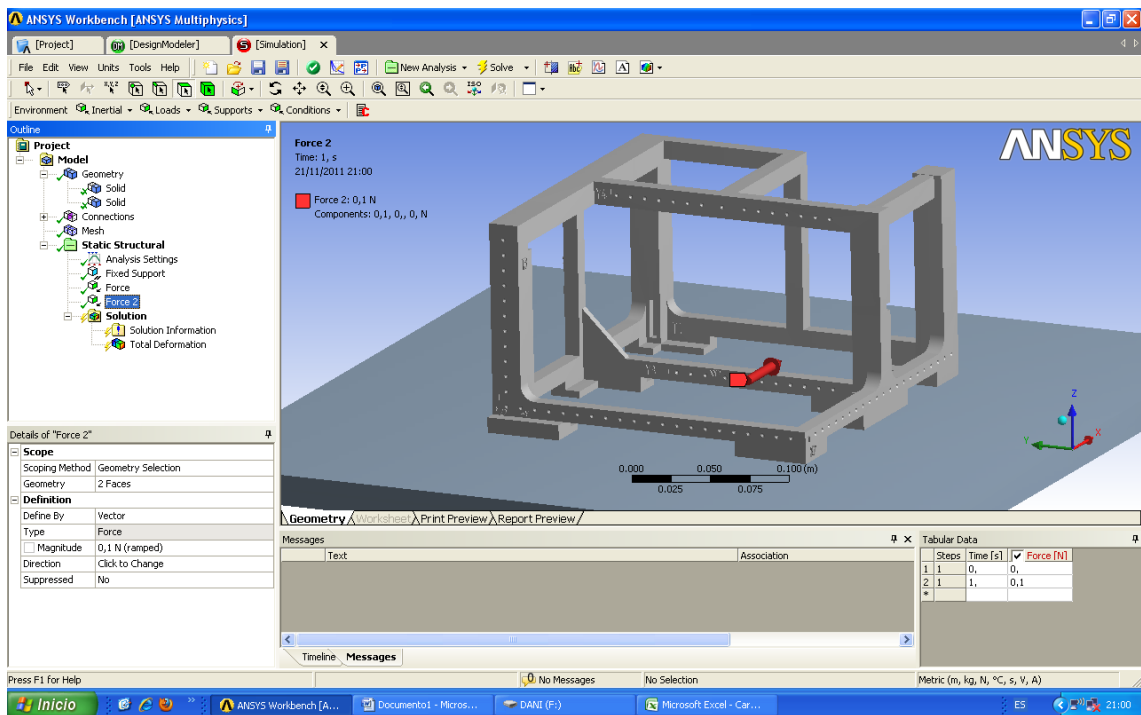
Deformación Máxima: 0,14 micras → OK!!!

### 4ª Simulación



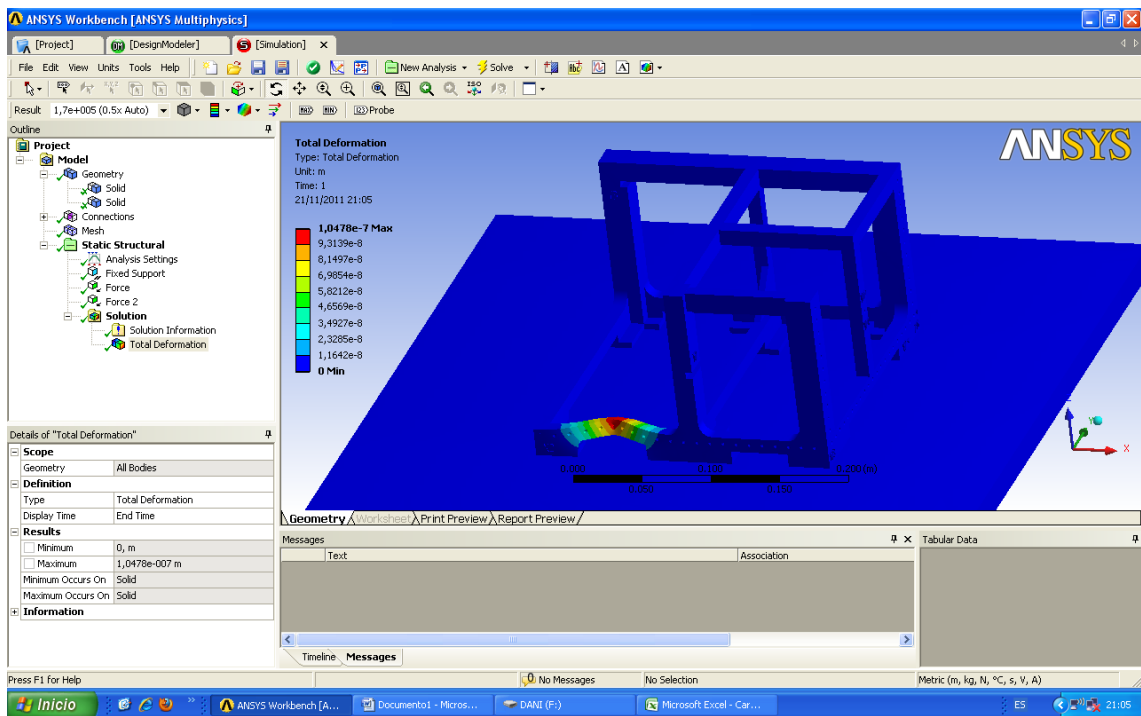
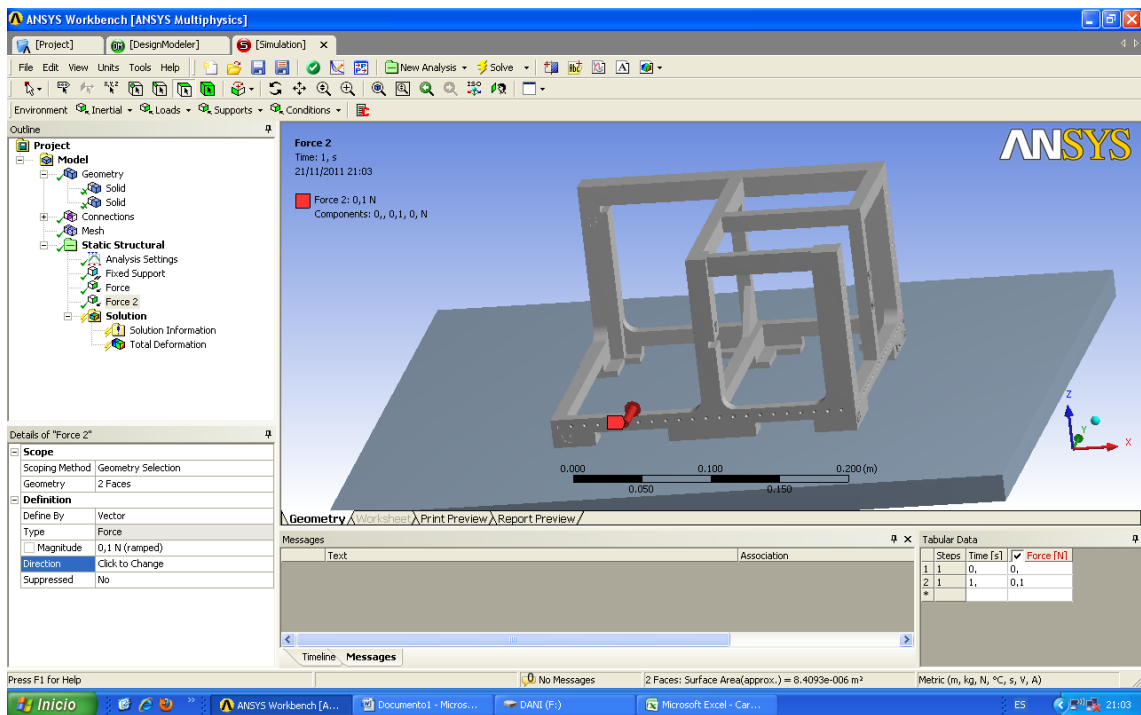
Deformación Máxima: 0,53 micras → OK!!!

5ª Simulación



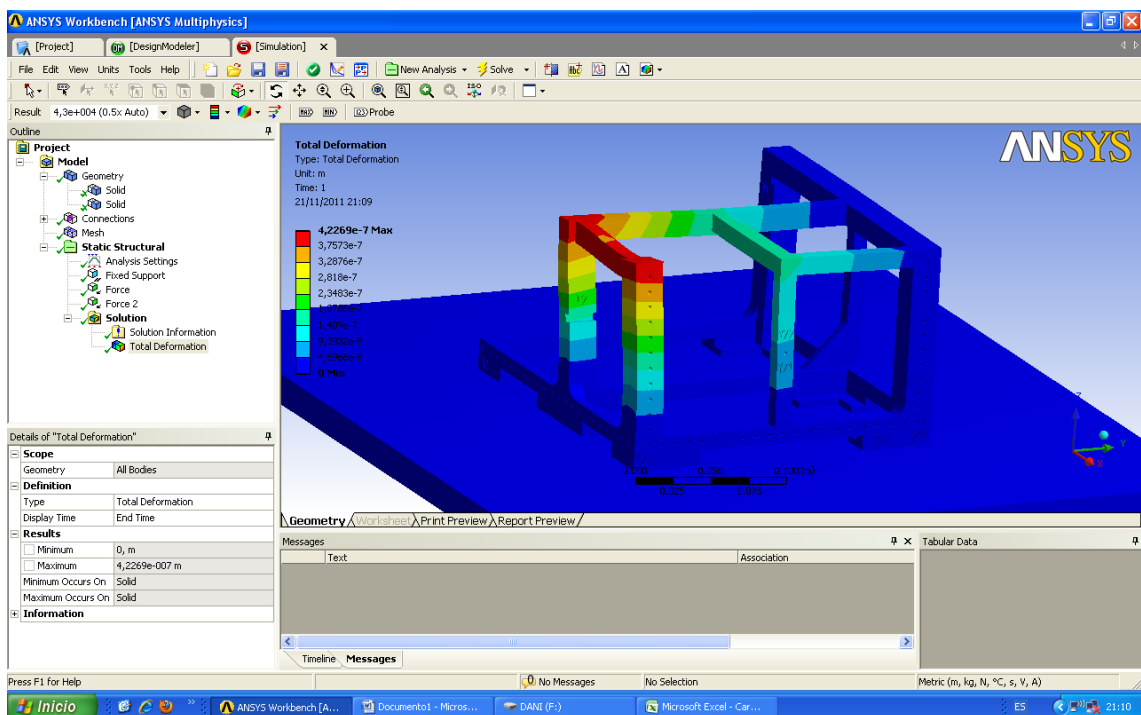
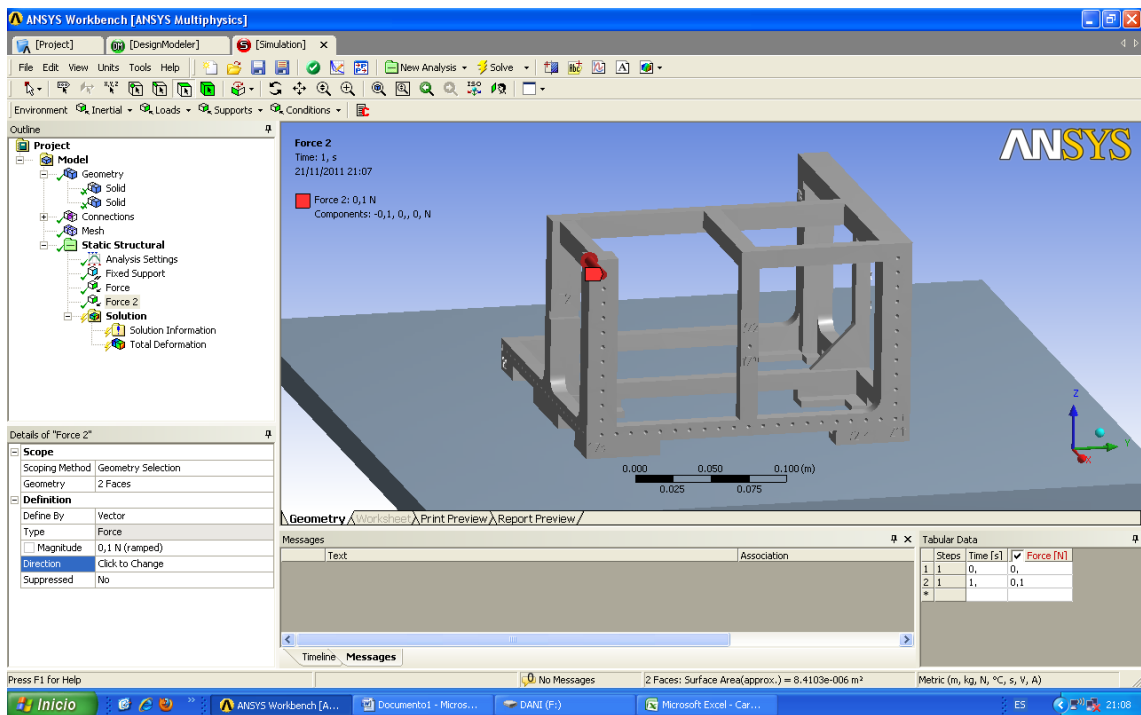
Deformación Máxima: 0,5 micras → OK!!!

6ª Simulación



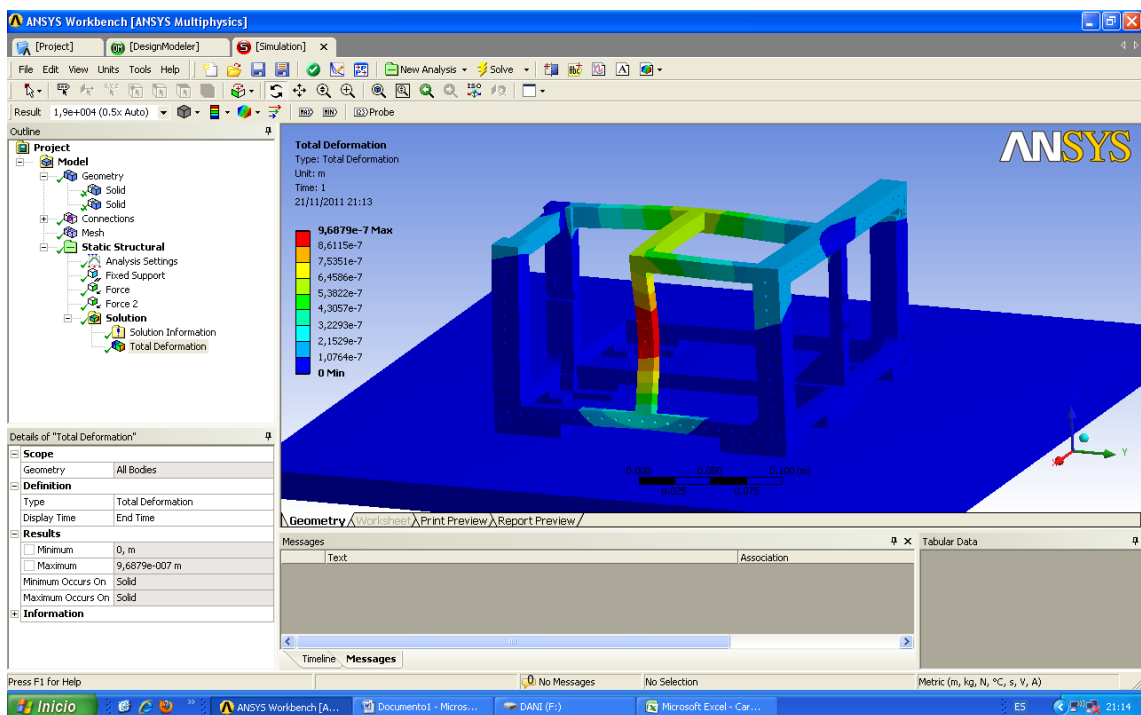
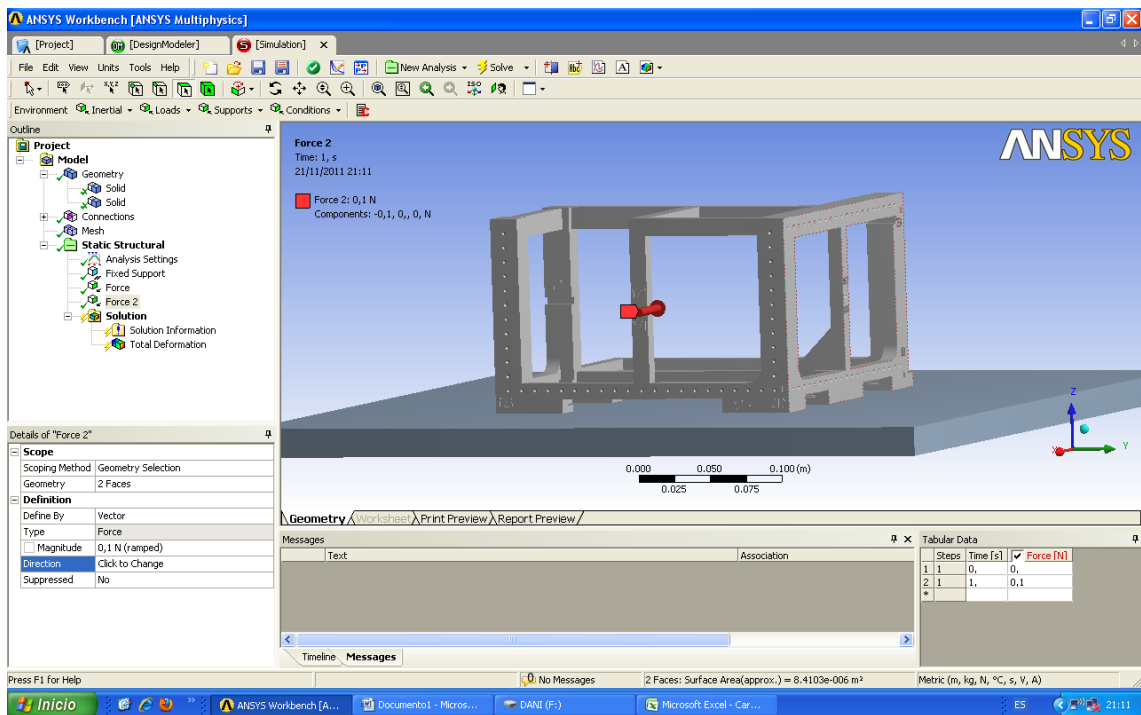
Deformación Máxima: 0,1 micras → OK!!!

7ª Simulación



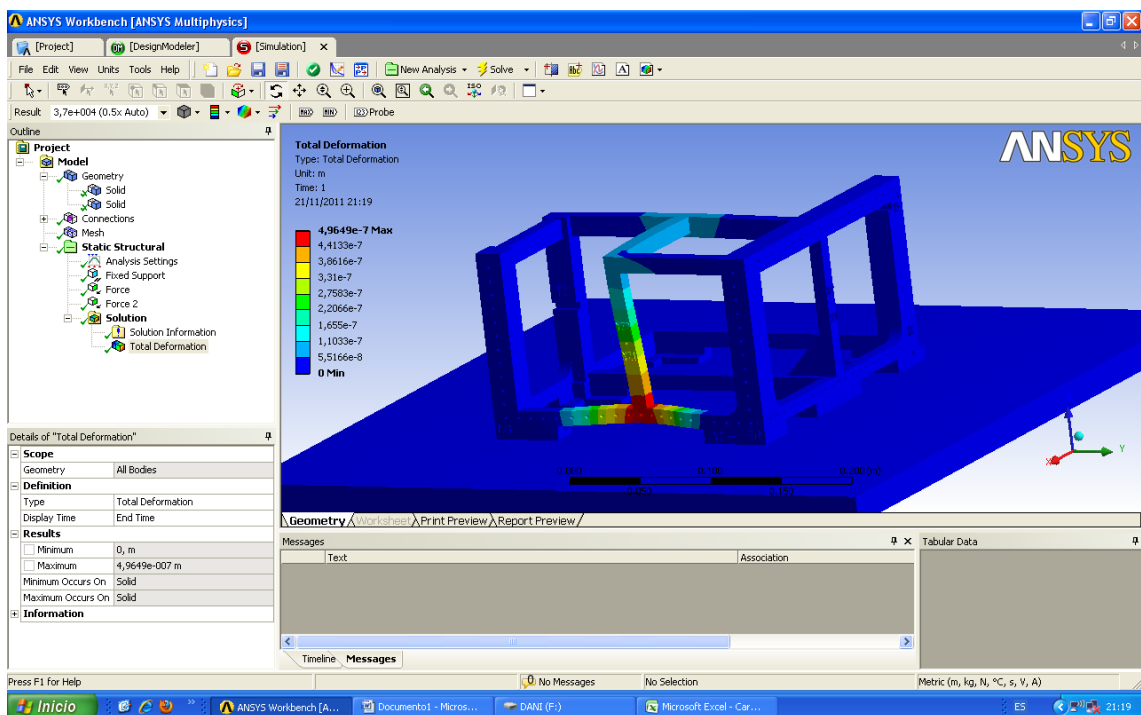
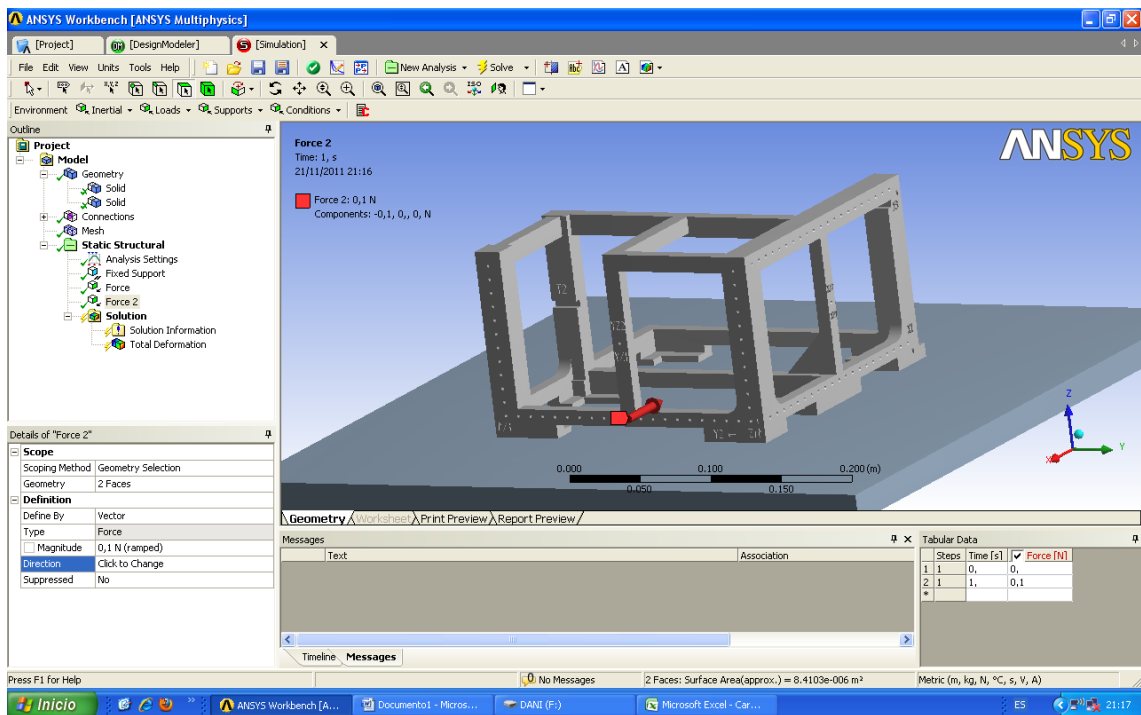
Deformación Máxima: 0,422 micras → OK!!!

8ª Simulación



Deformación Máxima: 0,96 micras → OK!!!

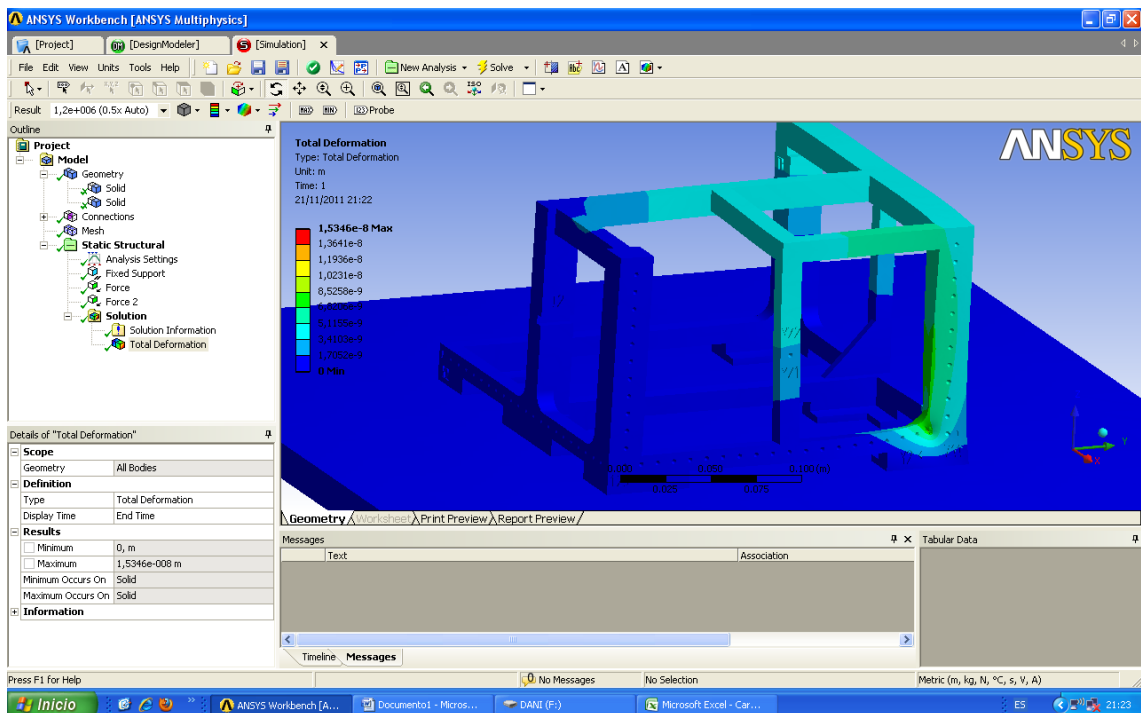
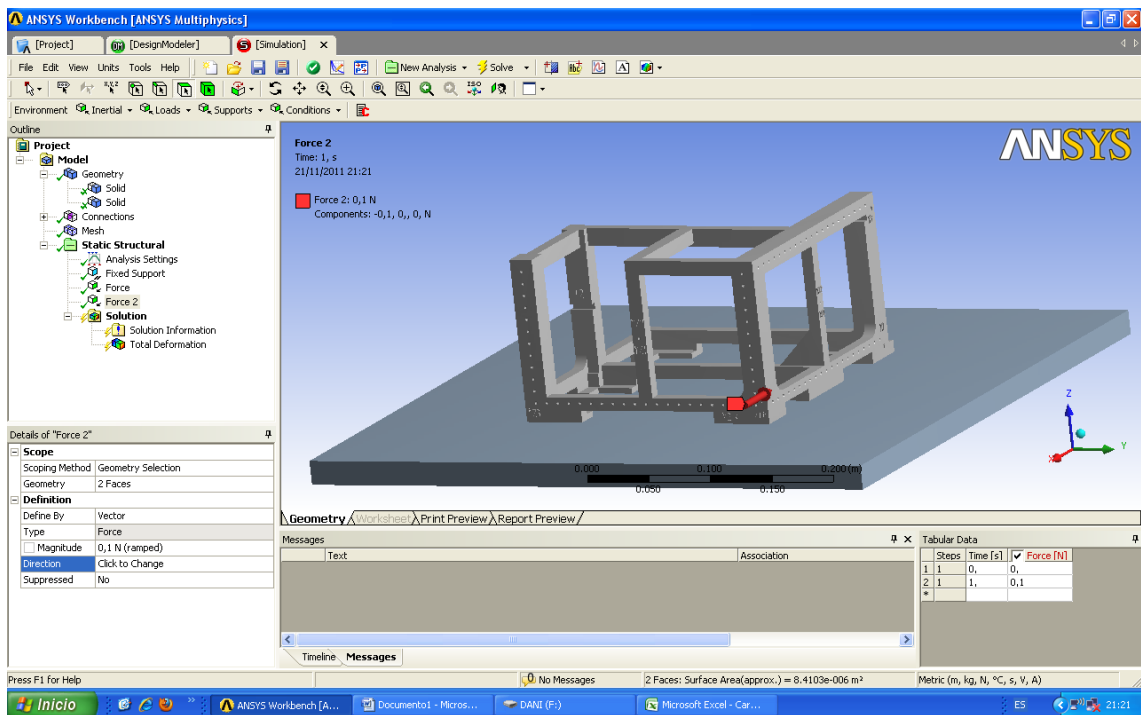
9ª Simulación



Deformación Máxima: 0,49 micras → OK!!!

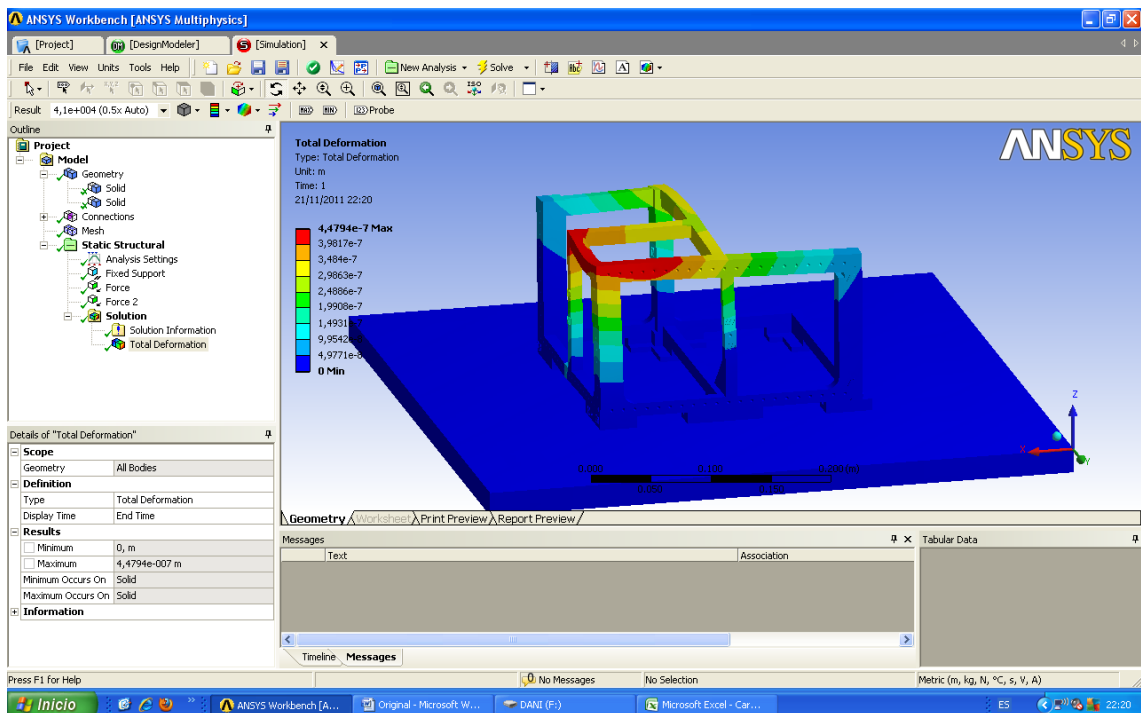
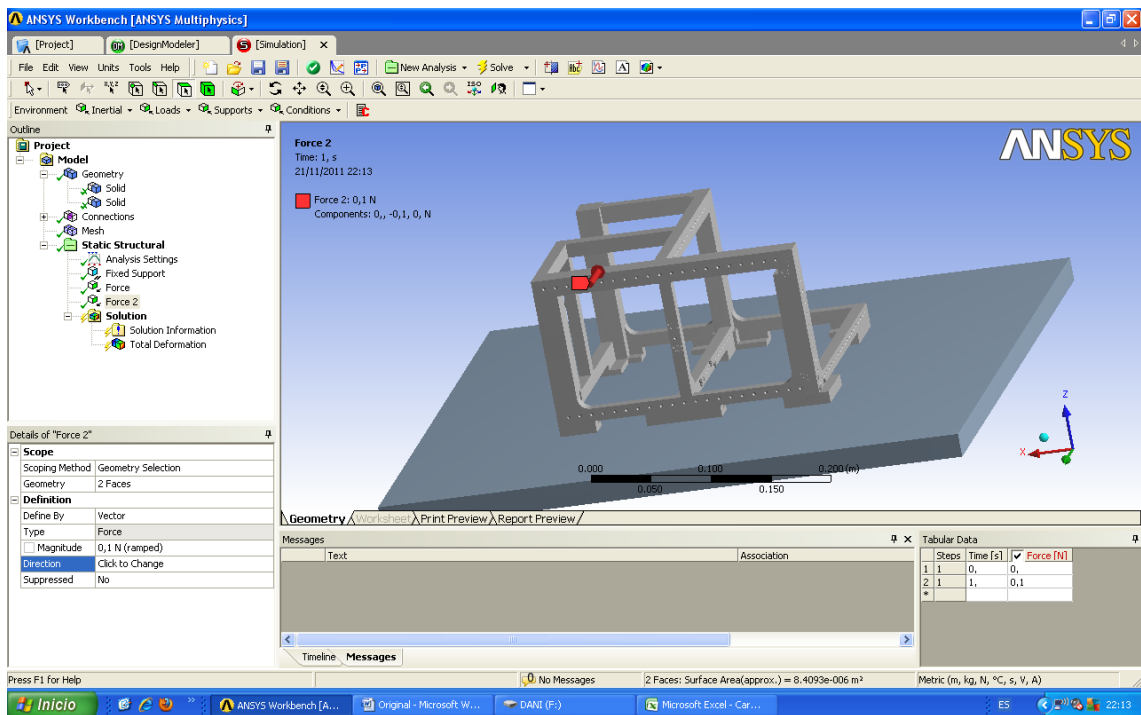


10ª Simulación



Deformación Máxima: 0,015 micras → OK!!!

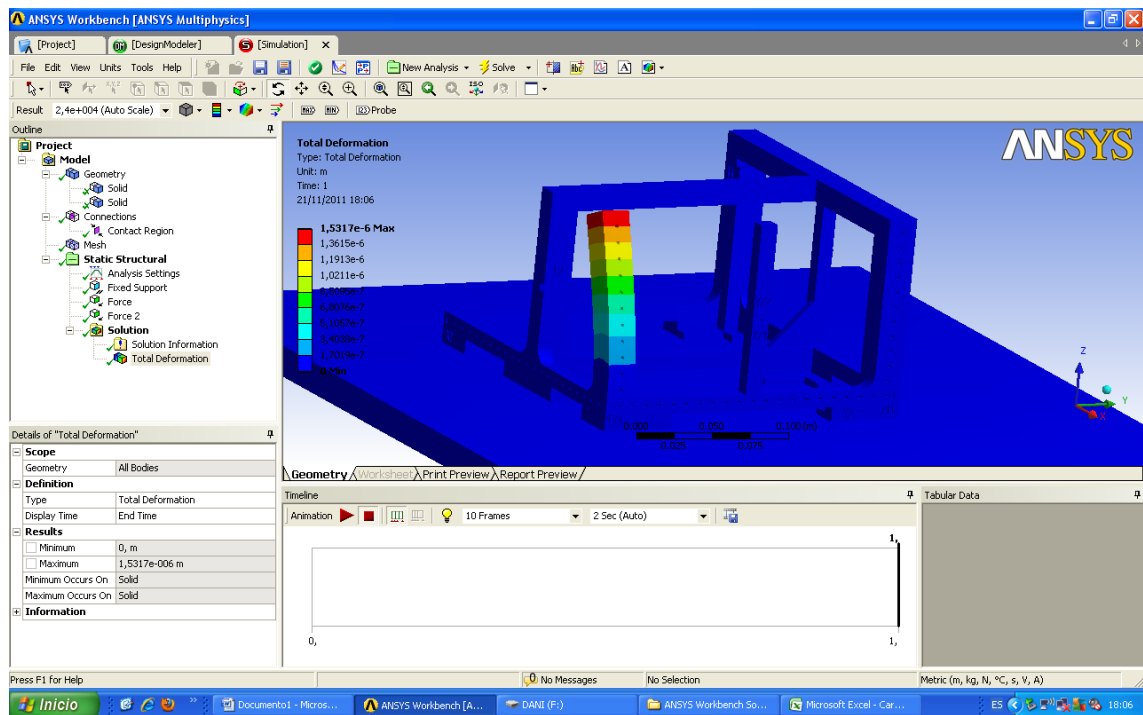
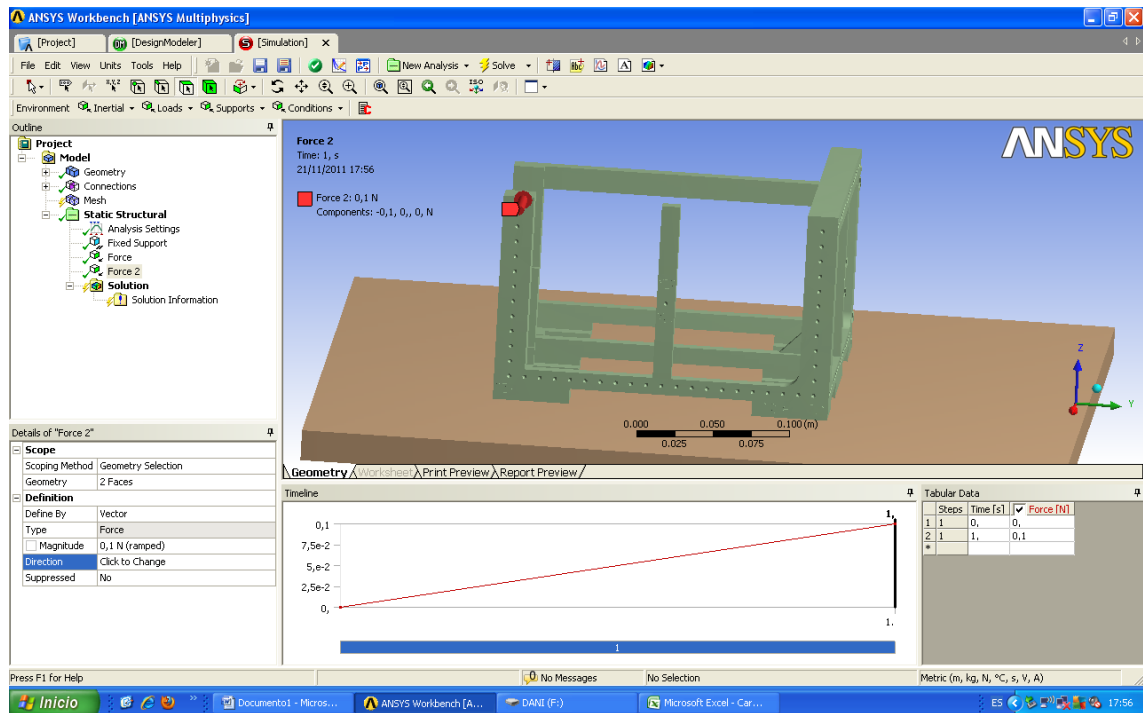
11ª Simulación



Deformación Máxima: 0,447 micras → OK!!!

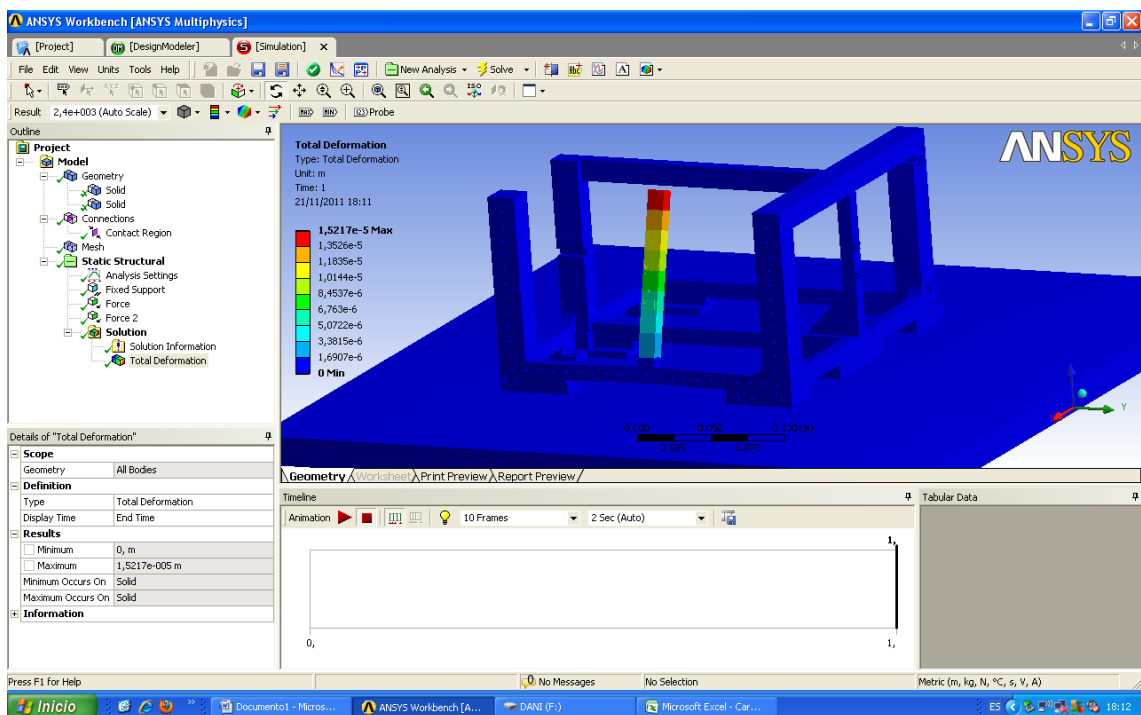
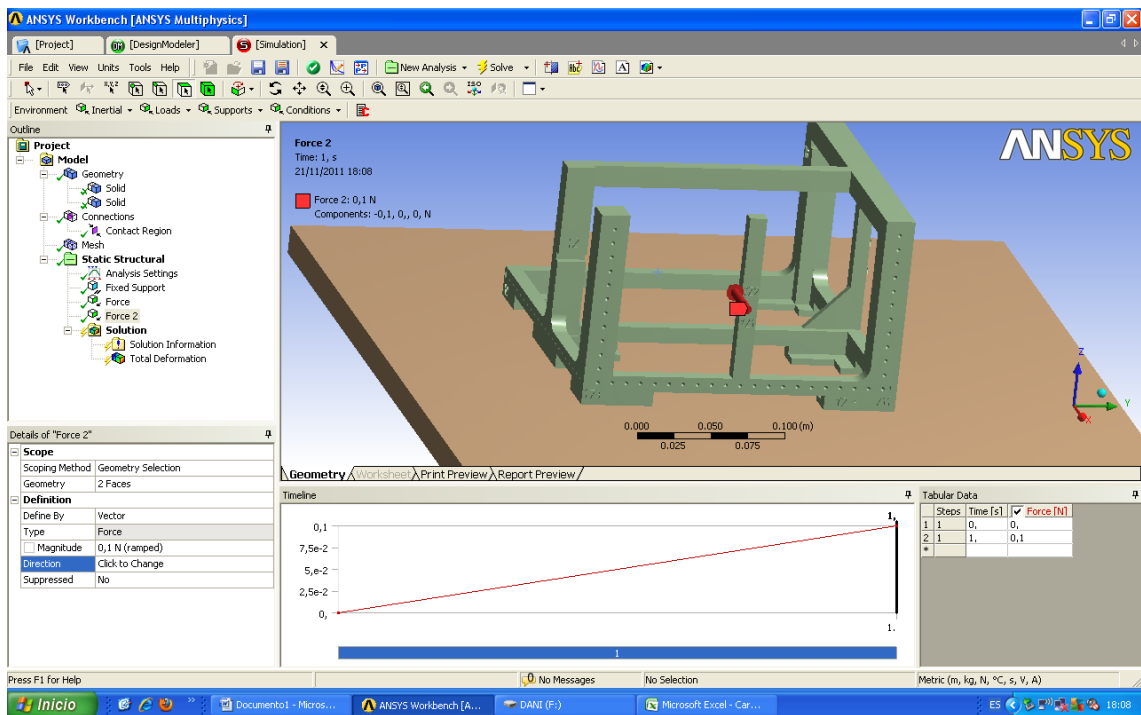
## A.1.2 Sin Refuerzos

### 1ª Simulación



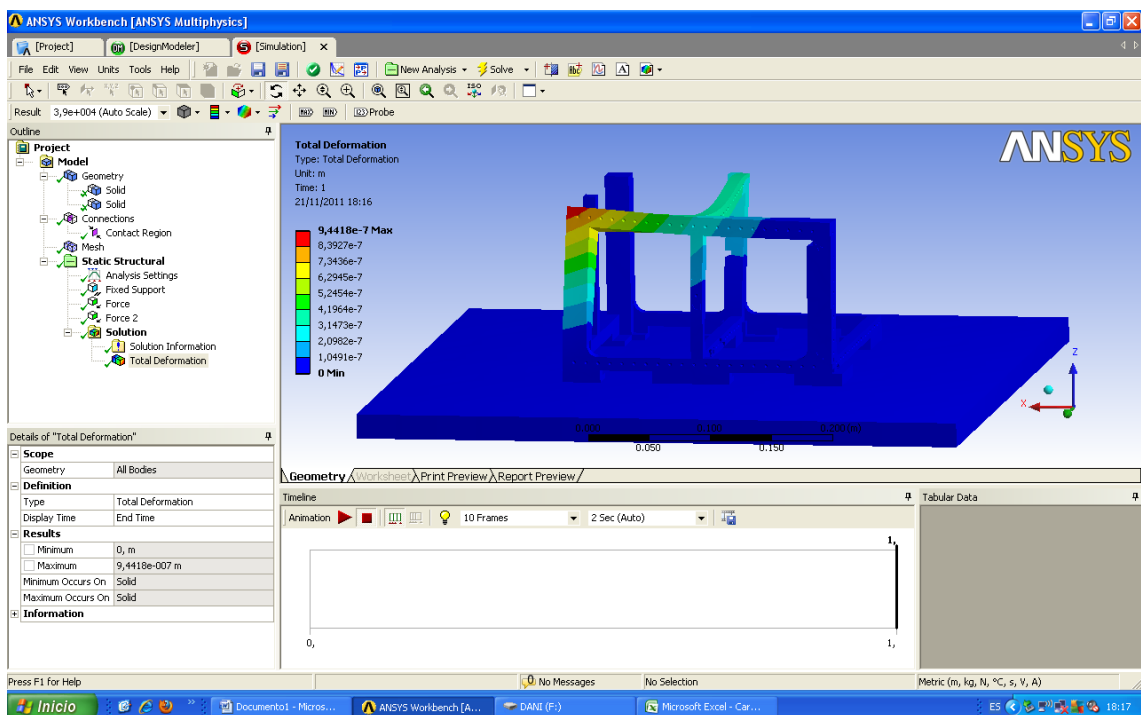
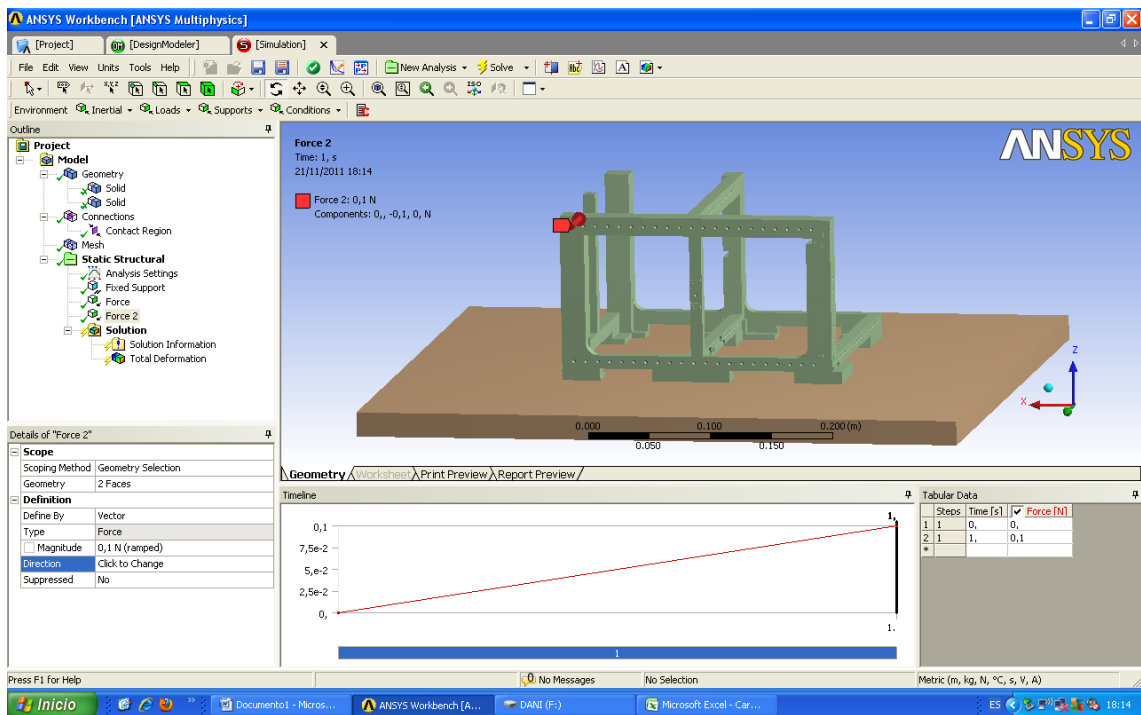
Deformación Máxima: 1,53 micras

2ª Simulación



Deformacion Máxima: 15,2 micras

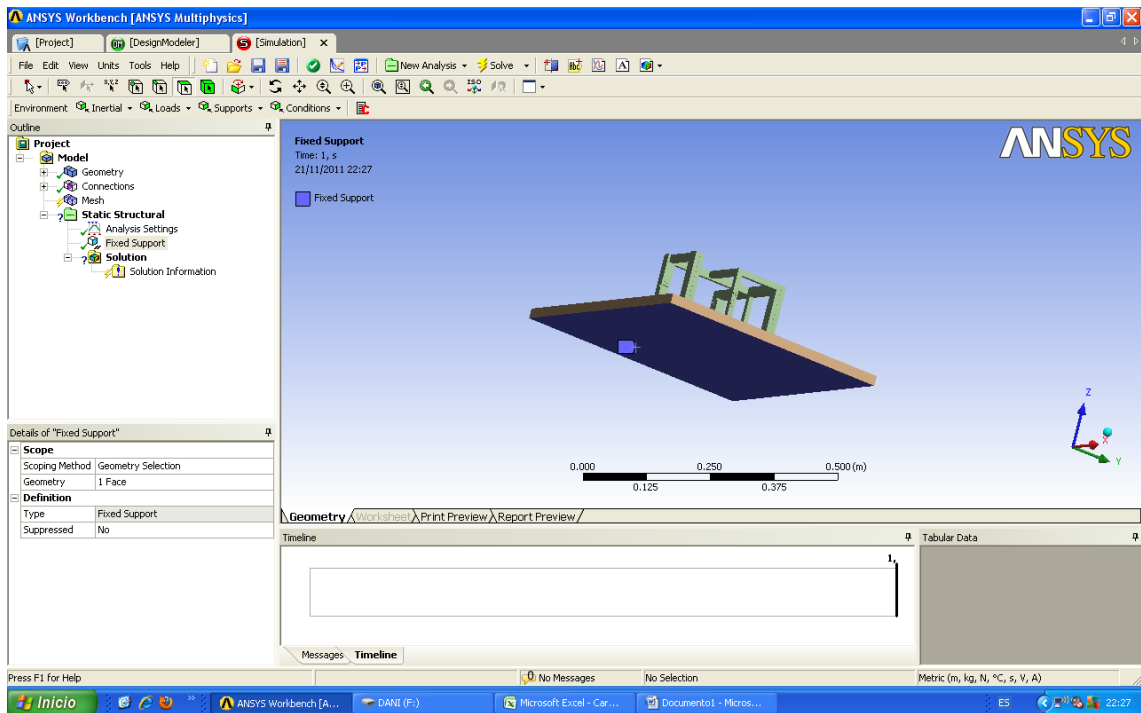
3ª Simulación



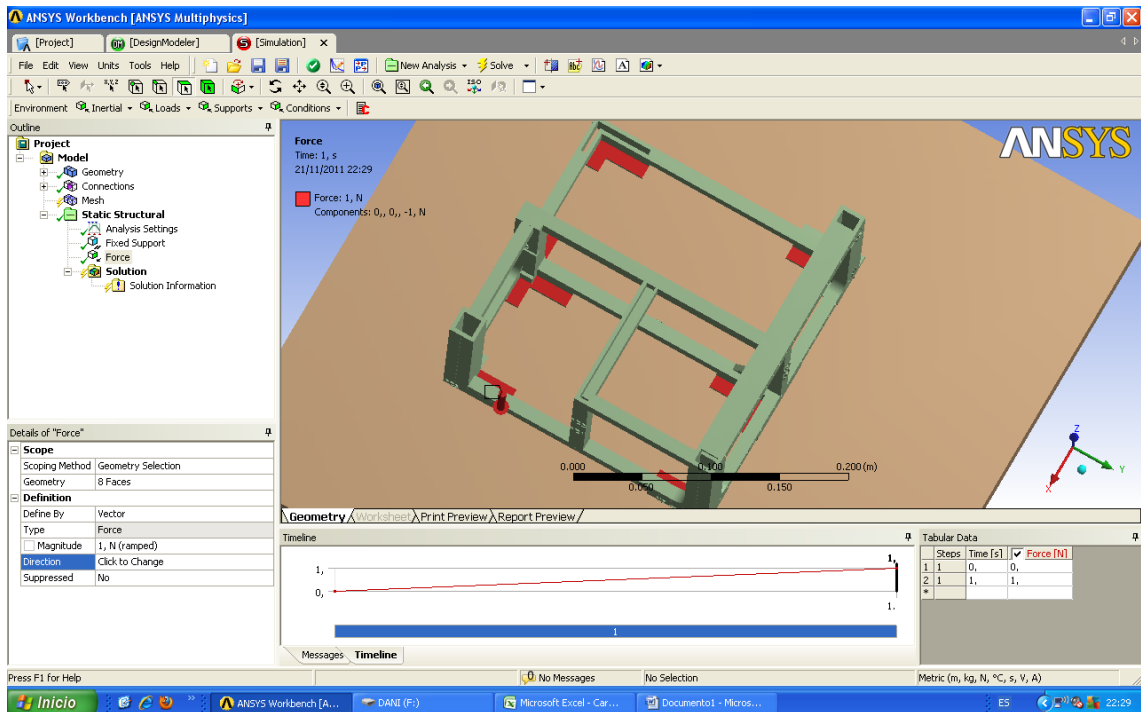
Deformación Máxima: 0,94 micras

### A.1.3 Vaciados

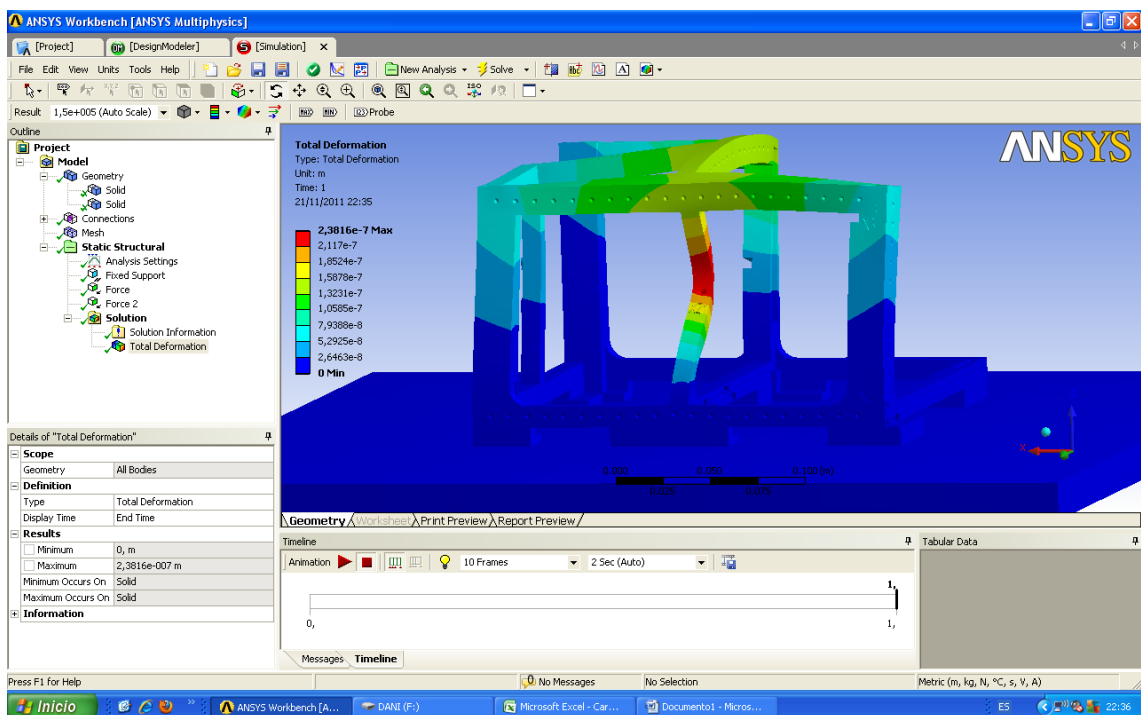
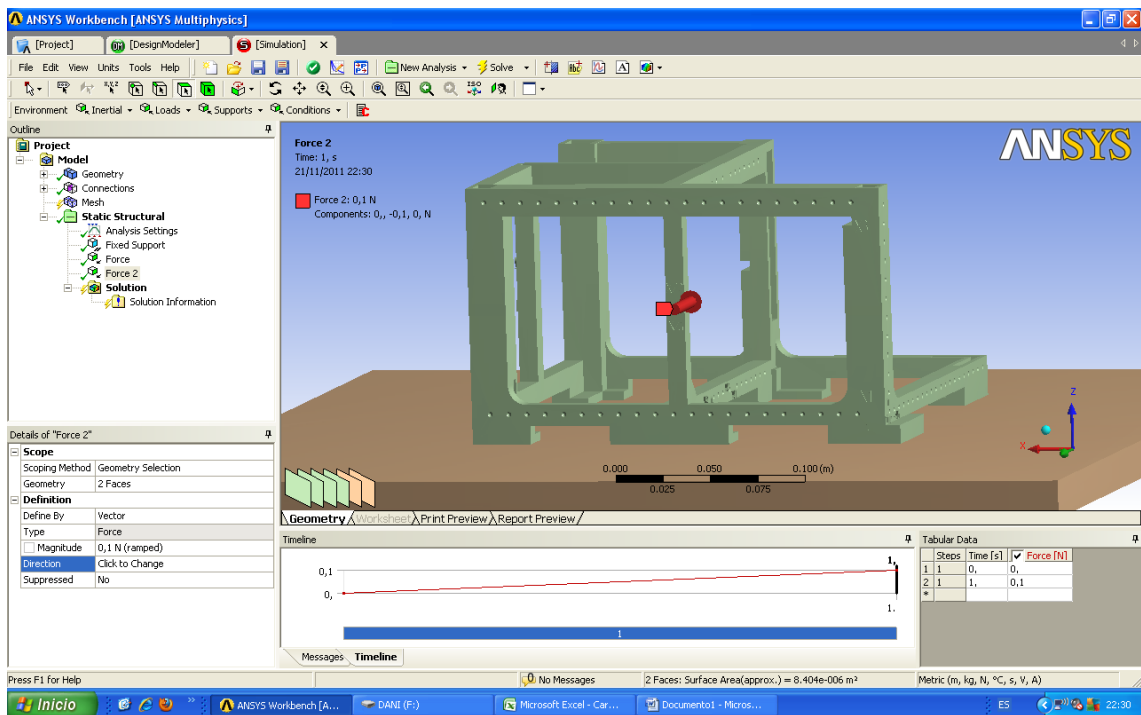
Hacemos la mesa fija



Colocamos las ocho sujeciones con una fuerza de 1 newton cada una

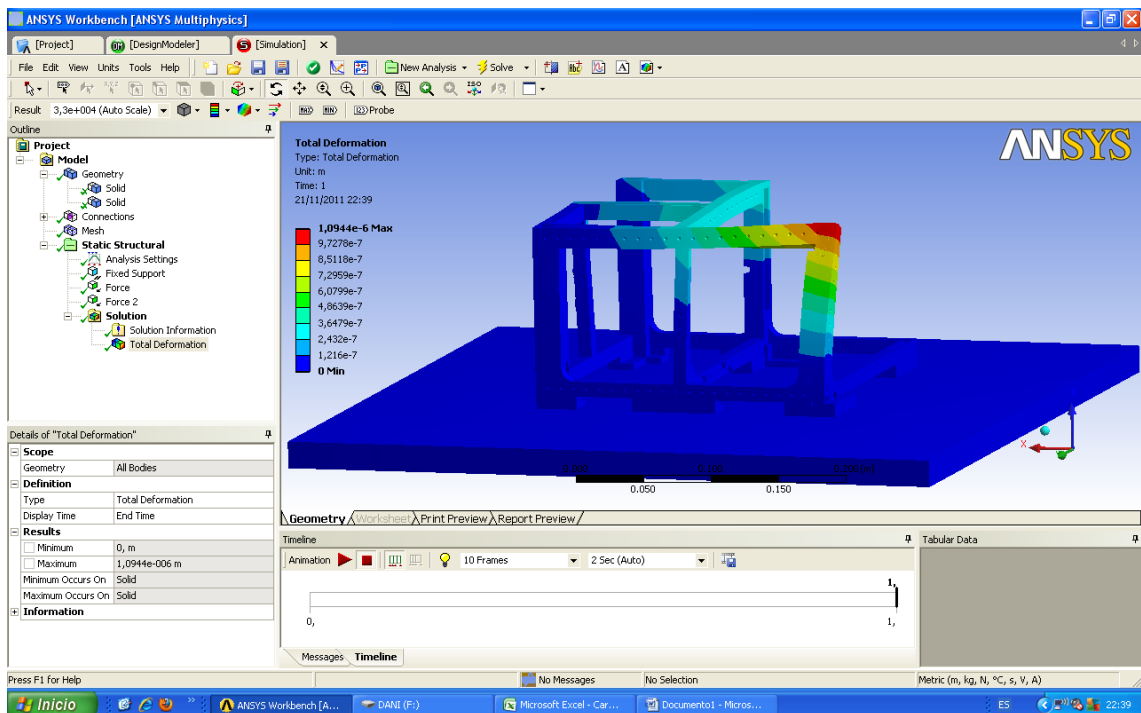
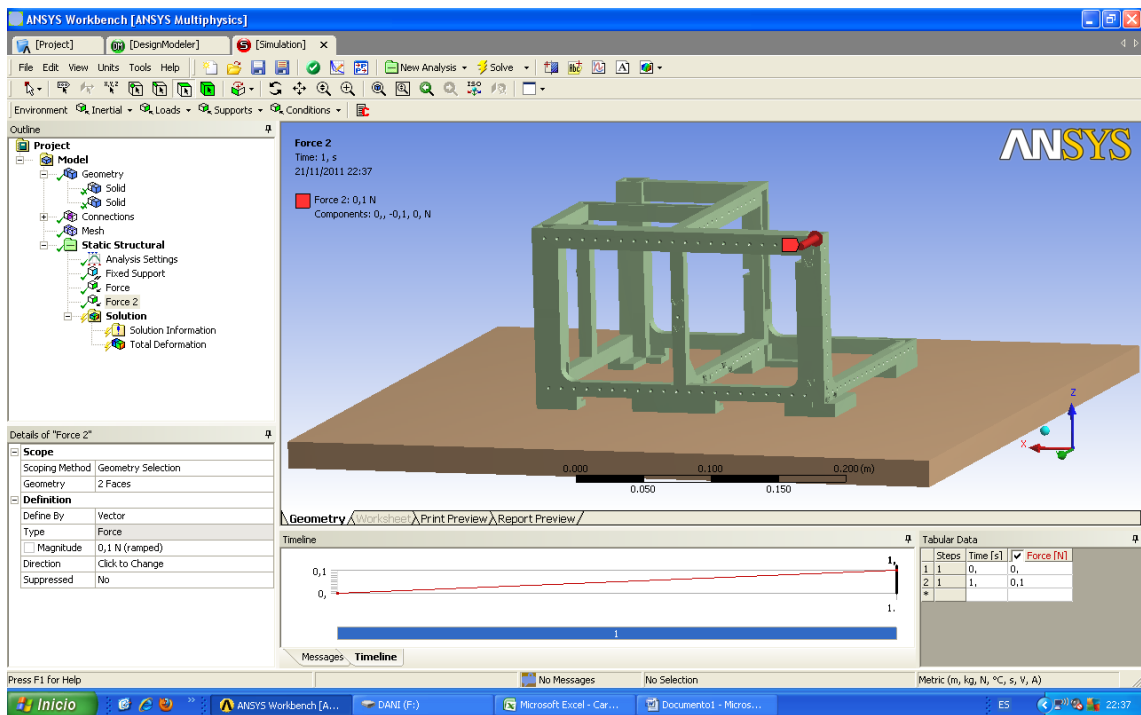


1ª Simulación



Deformación Máxima: 0,23 micras → OK!!!

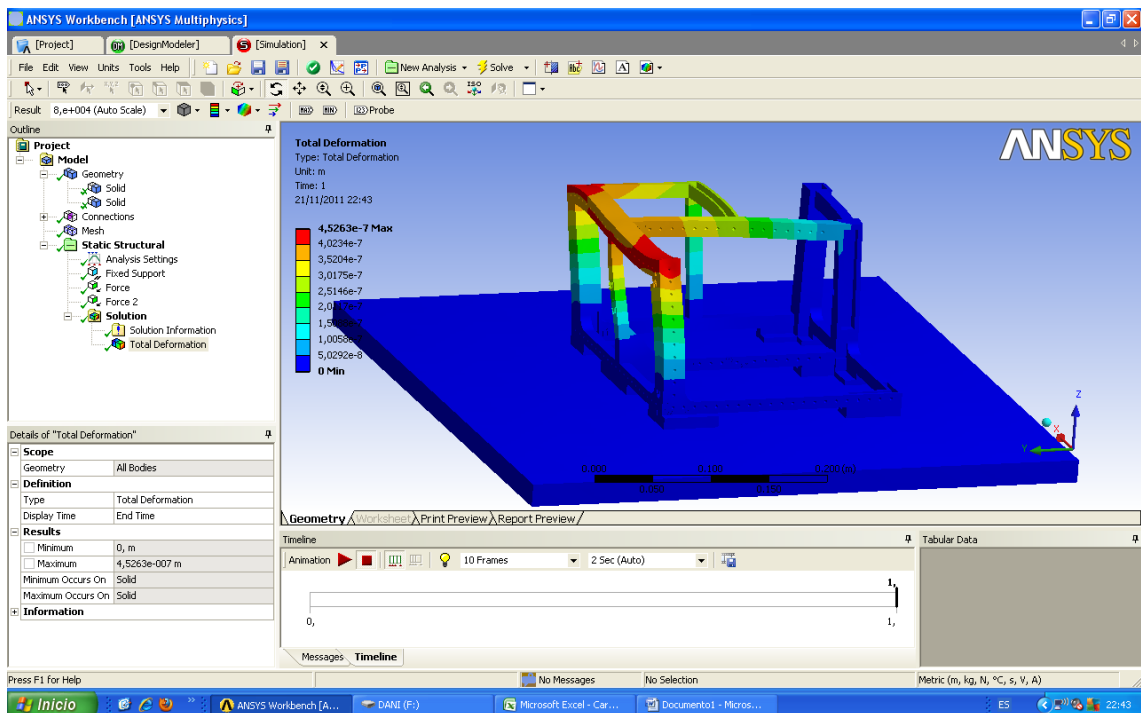
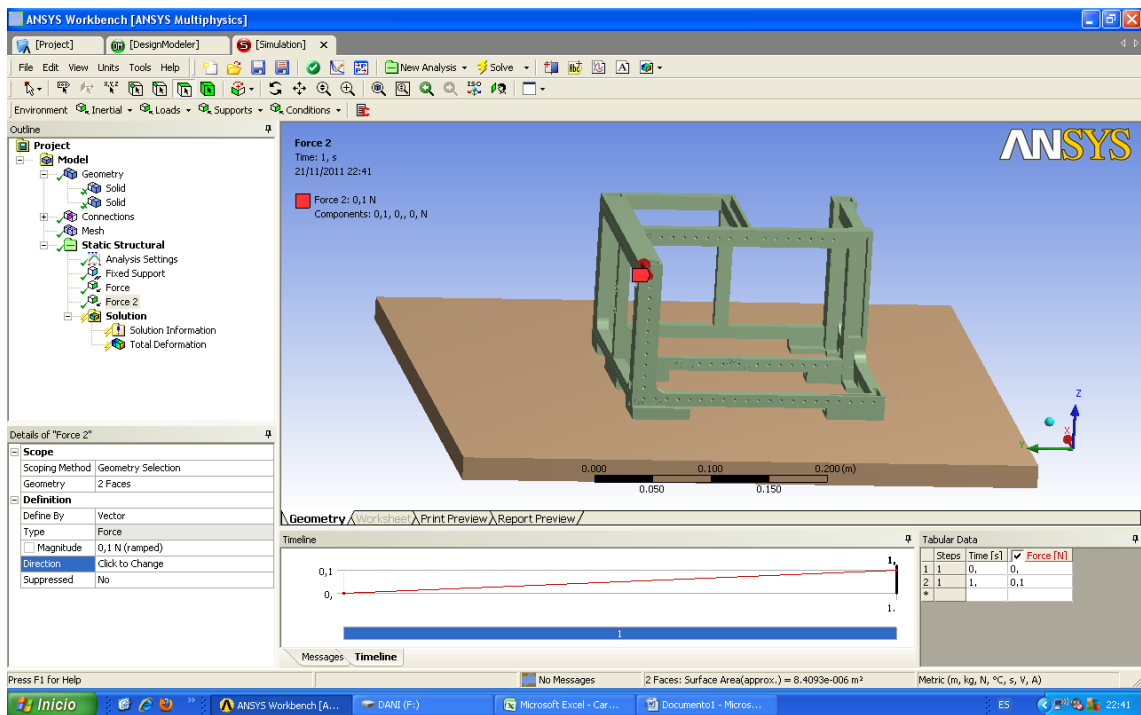
## 2ª Simulación



Deformación Máxima: 1,09 micras → OK!!!

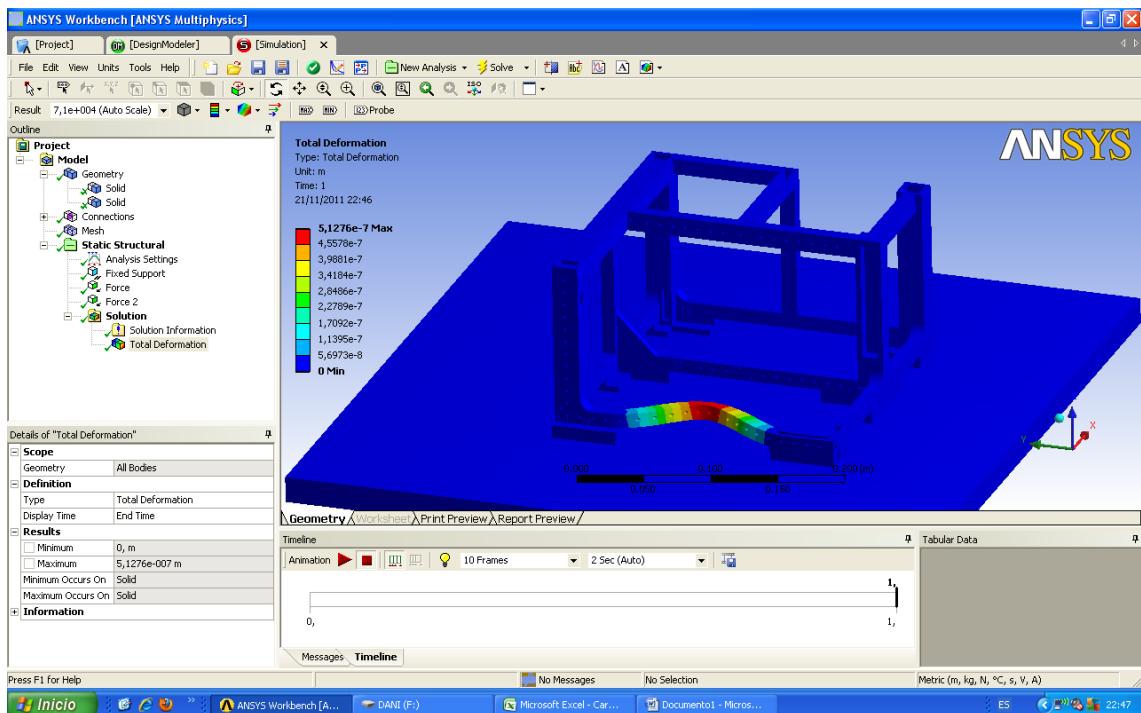
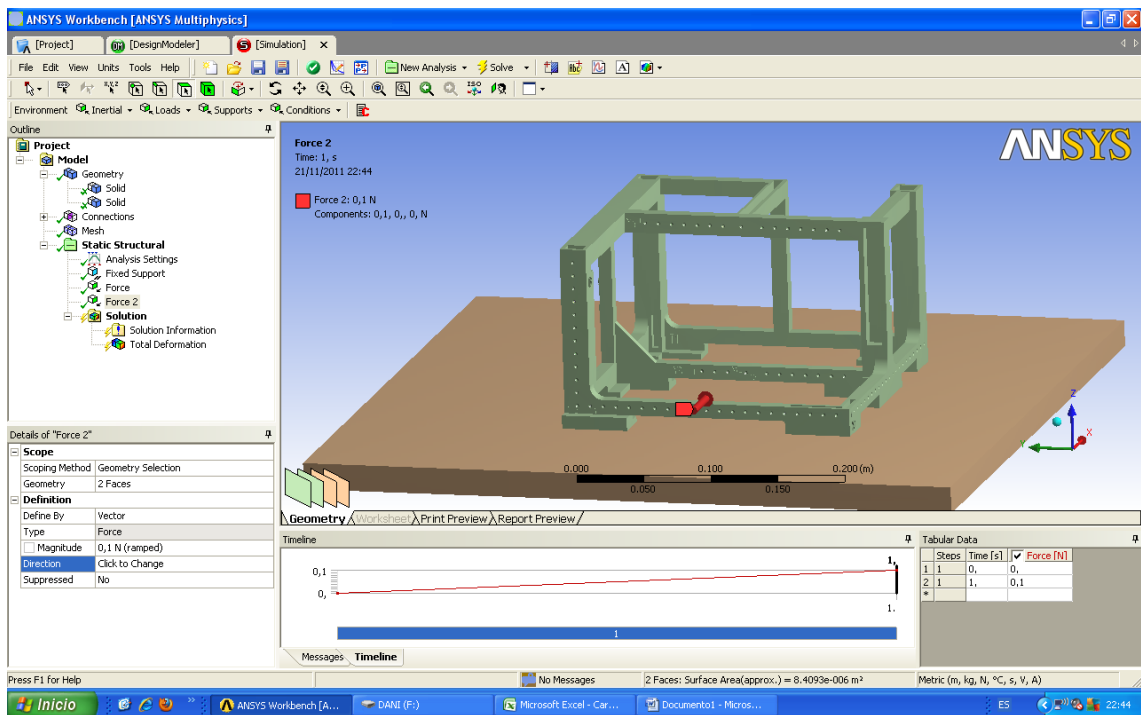


3ª Simulación



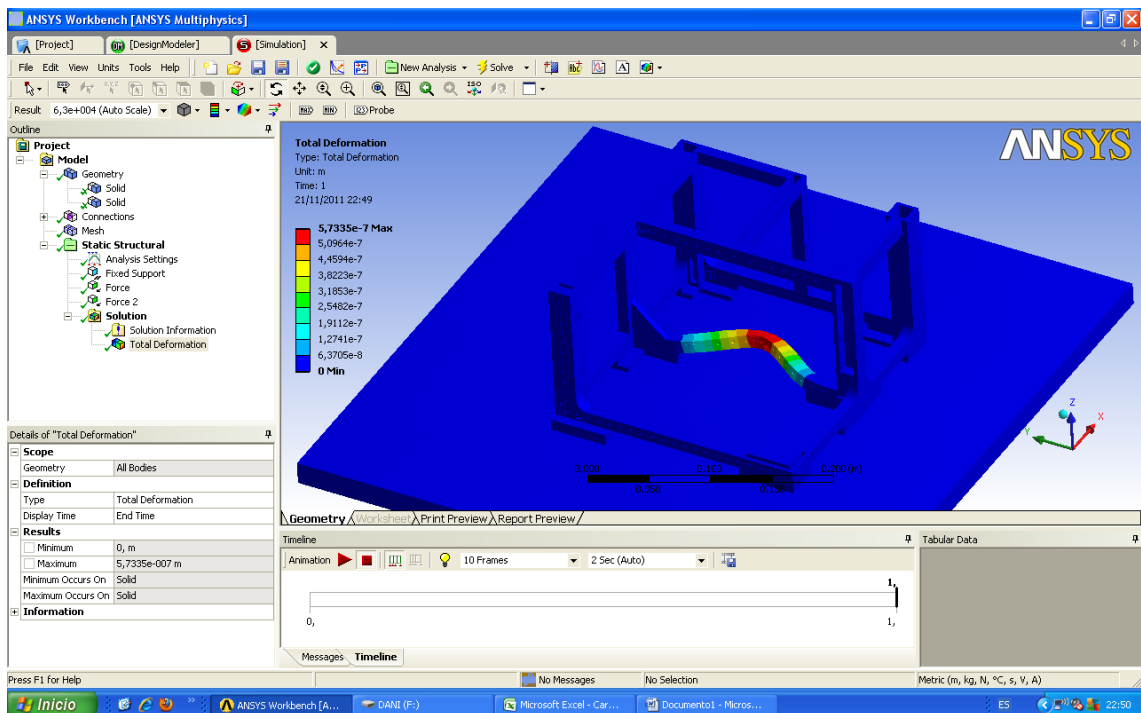
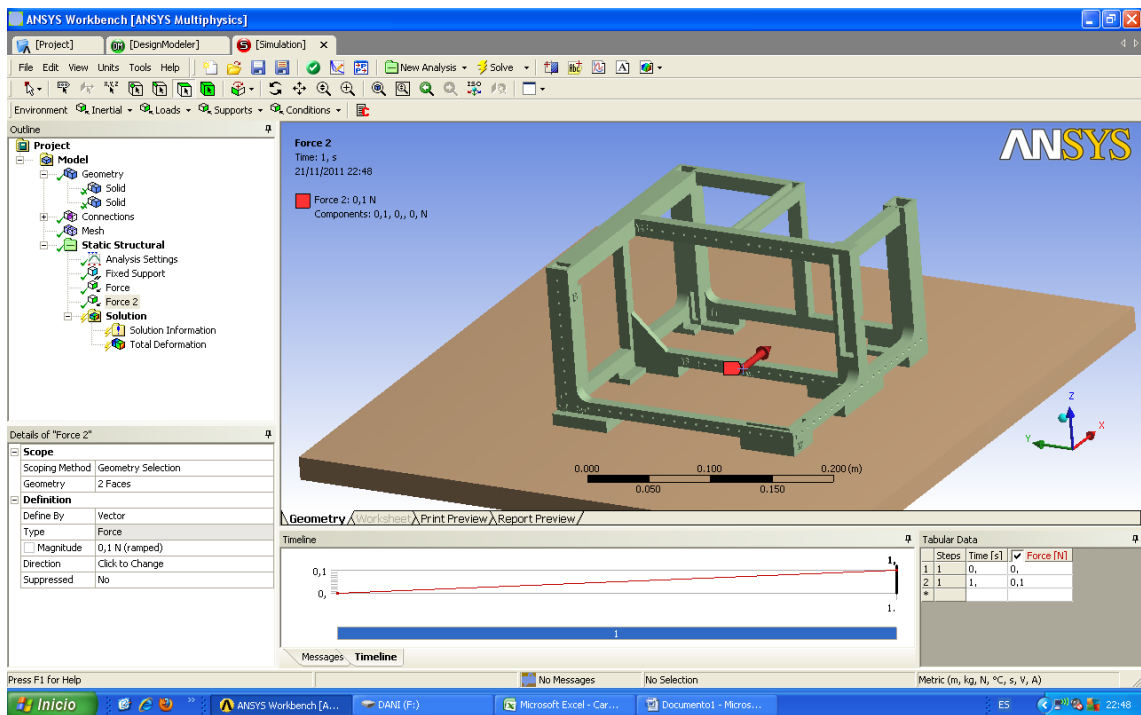
Deformación Máxima: 0,45 micras → OK!!!

4ª Simulación



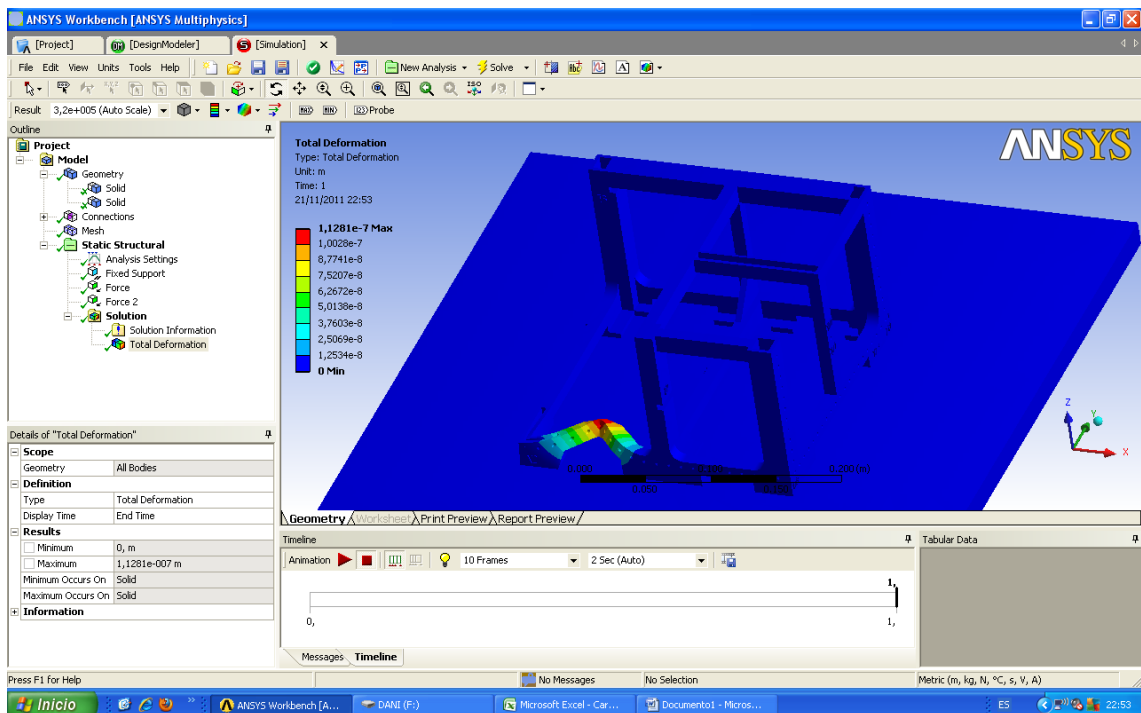
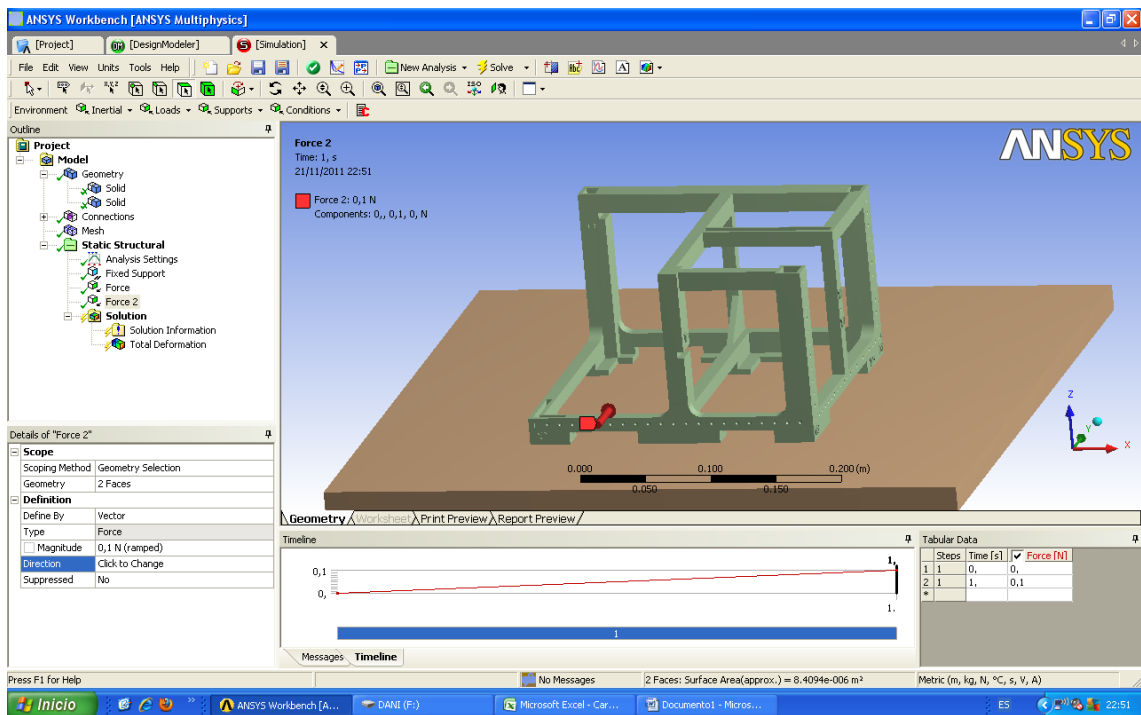
Deformación Máxima: 0,51 micras → OK!!!

5ª Simulación



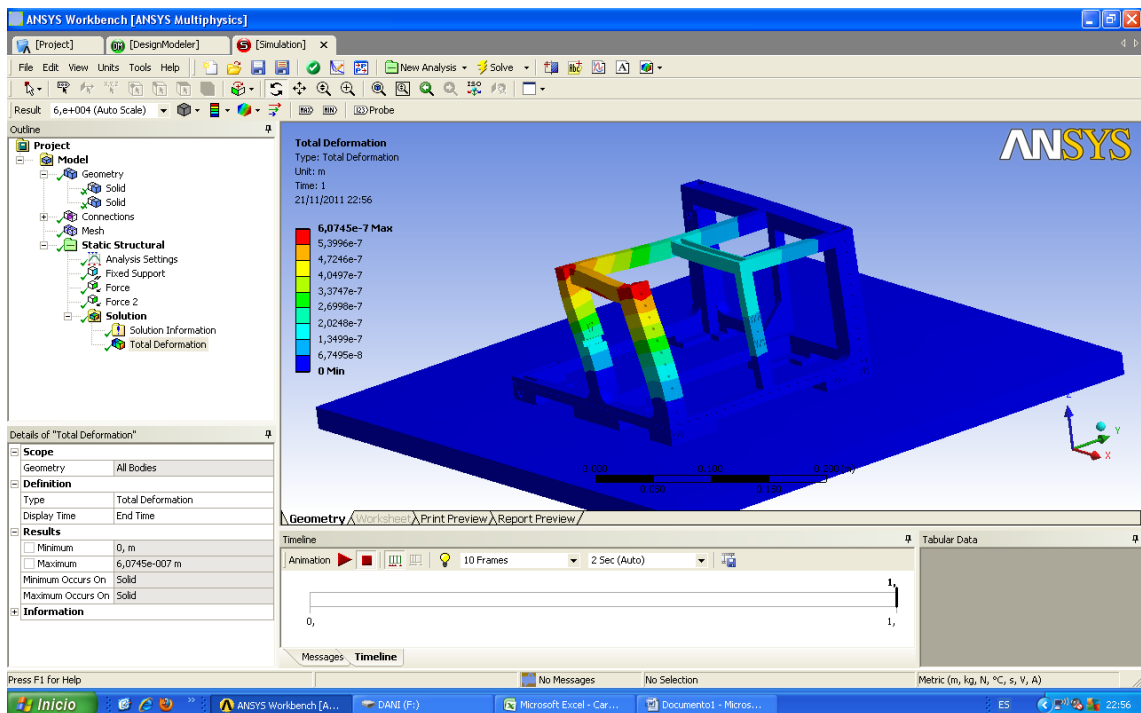
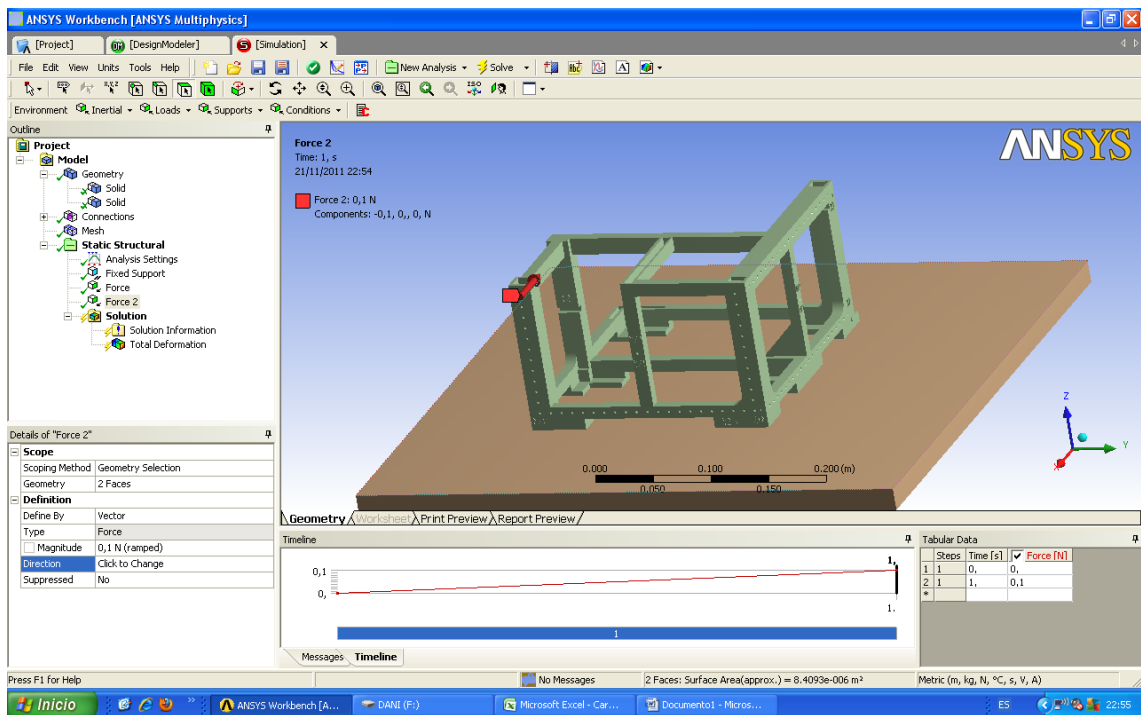
Deformación Máxima: 0,57 micras → OK!!!

6ª Simulación



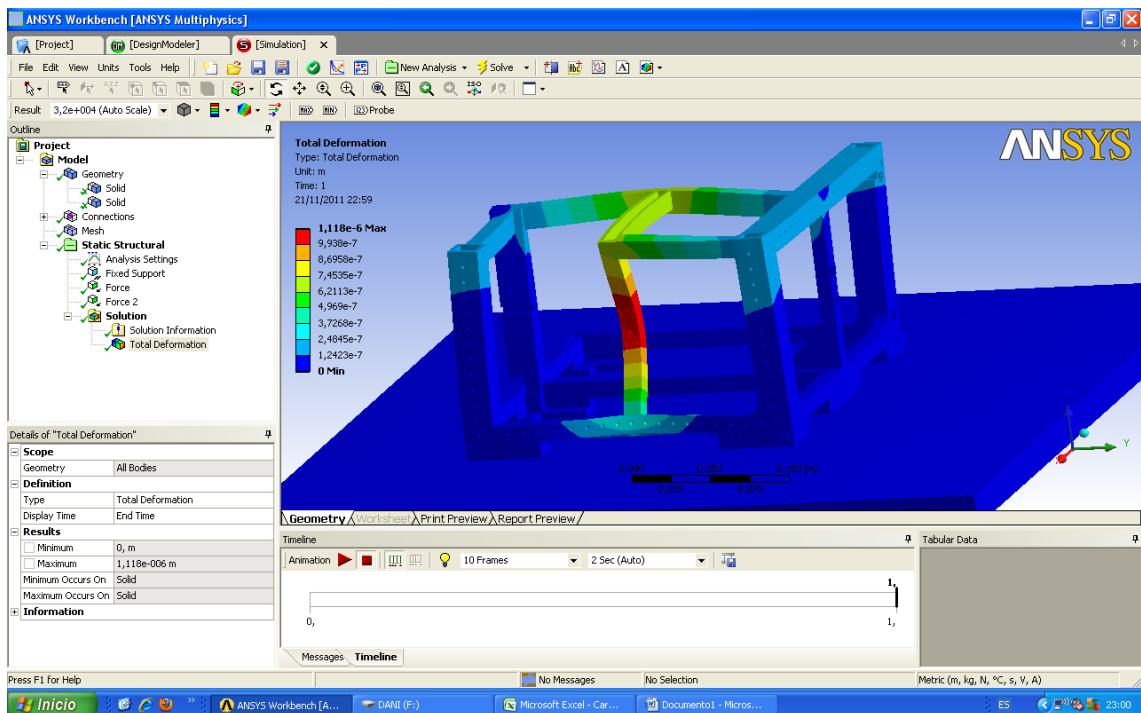
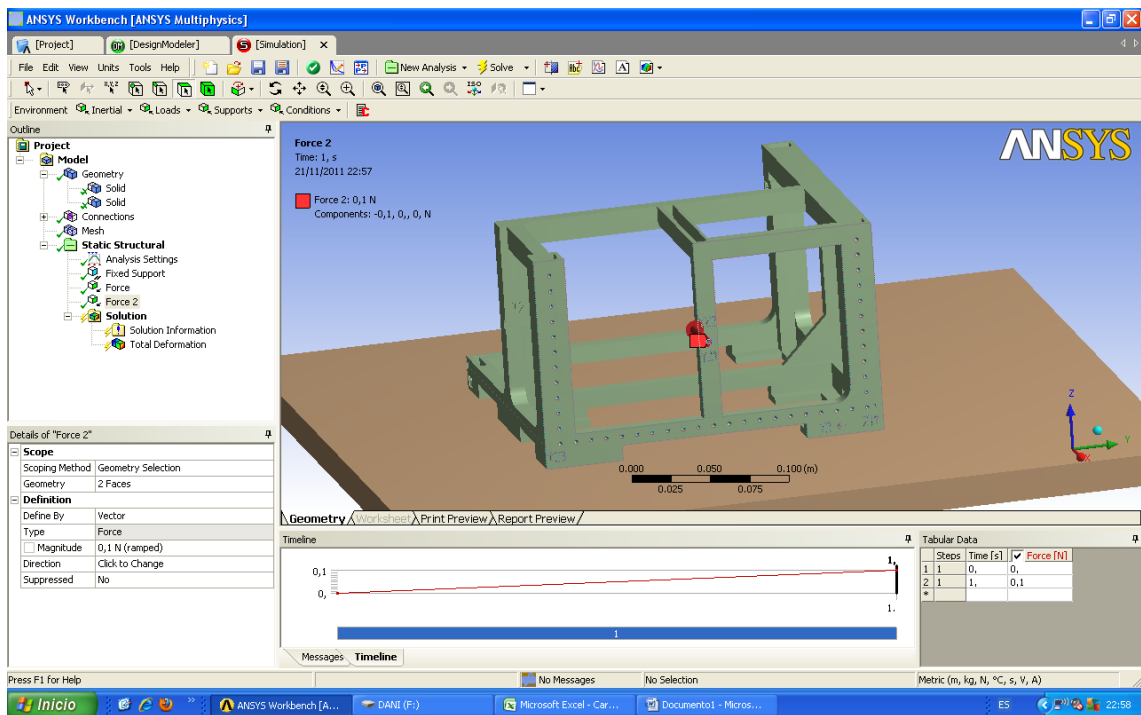
Deformación Máxima: 0,11 micras → OK!!!

7ª Simulación



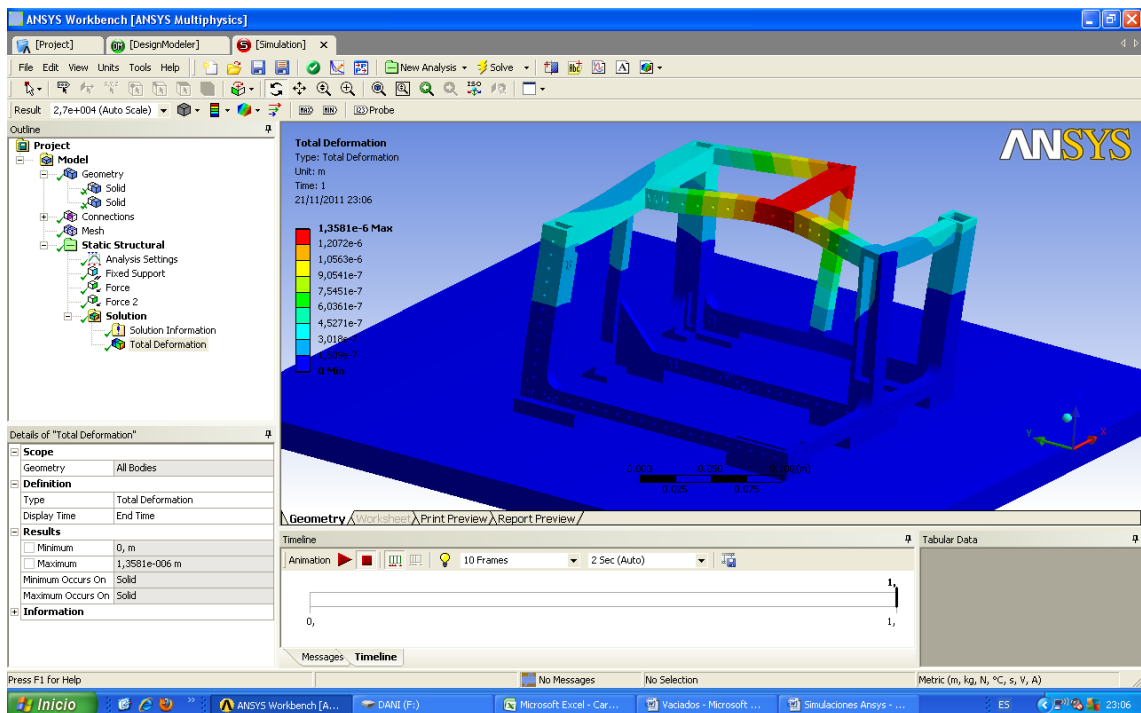
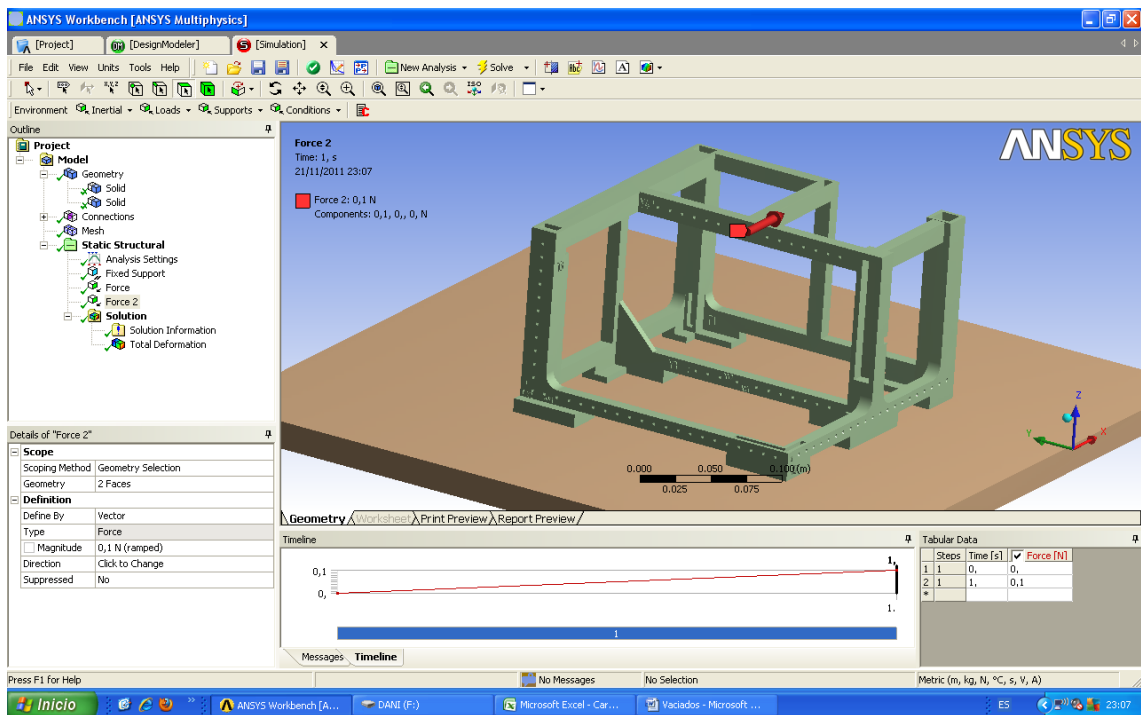
Deformación Máxima: 0,607 micras → OK!!!

8ª Simulación



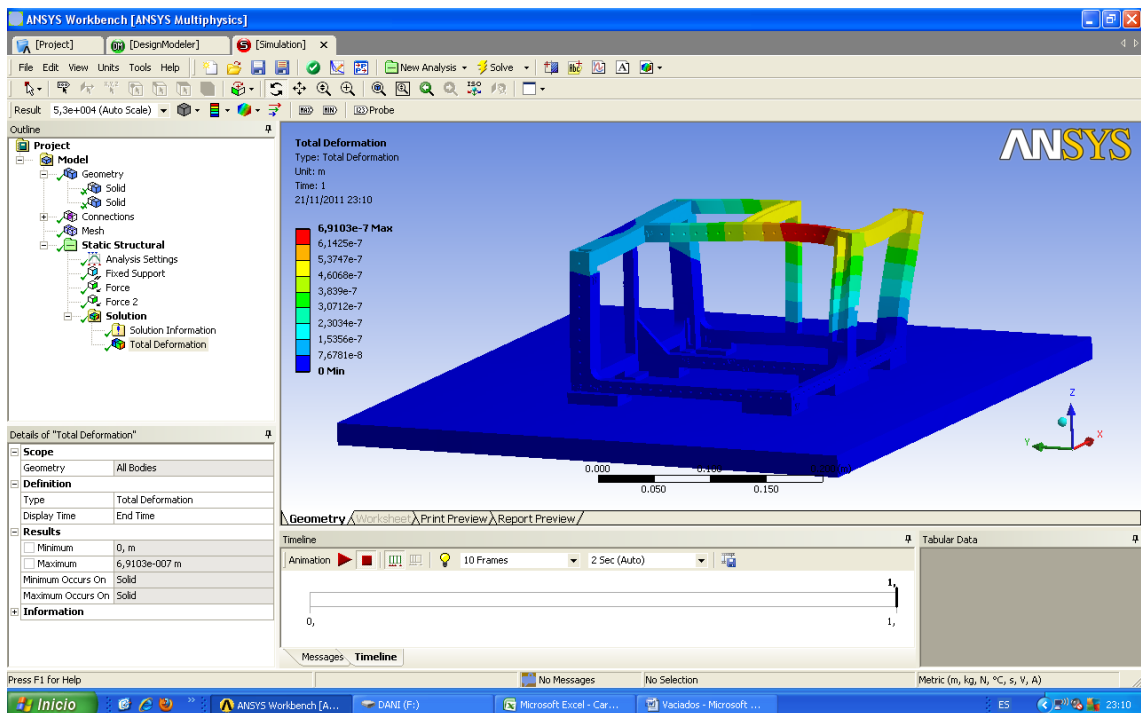
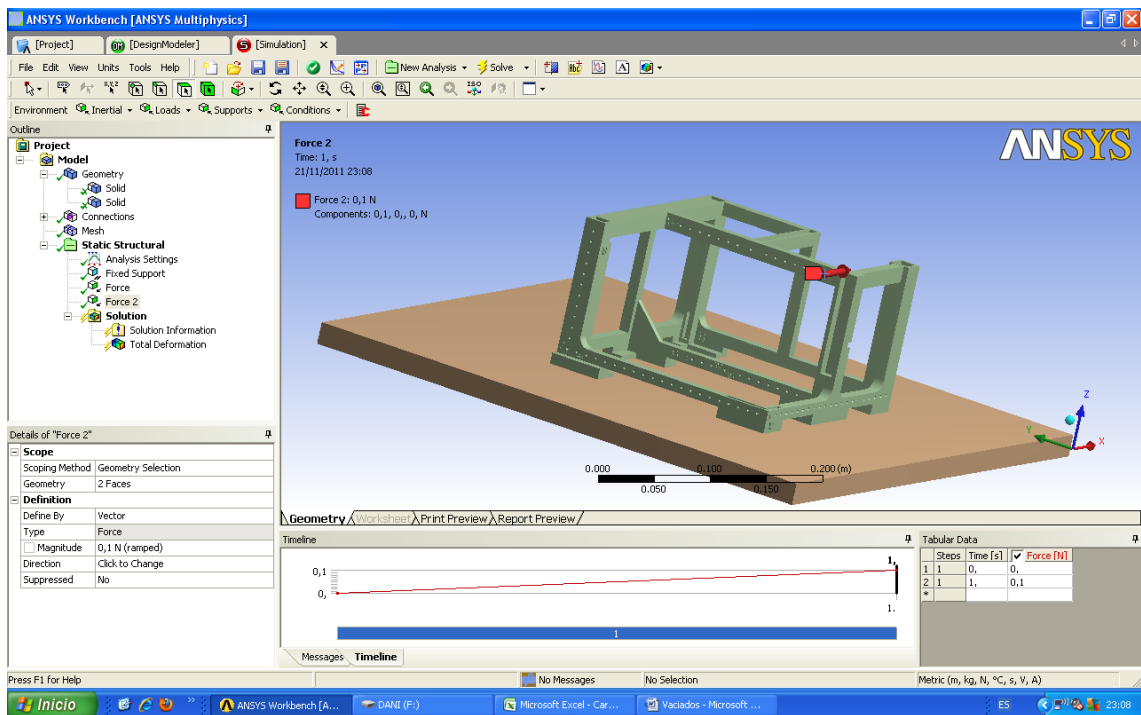
Deformación Máxima: 1,11 micras → OK!!!

9ª Simulación



Deformación Máxima: 1,35 micras → OK!!!

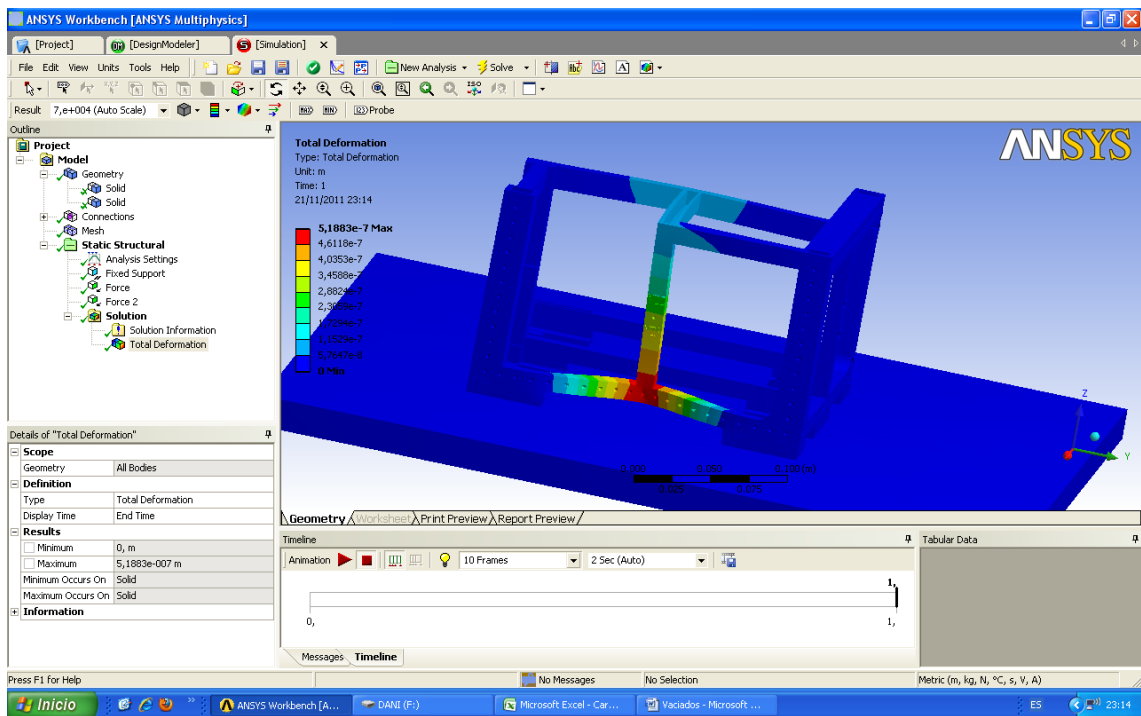
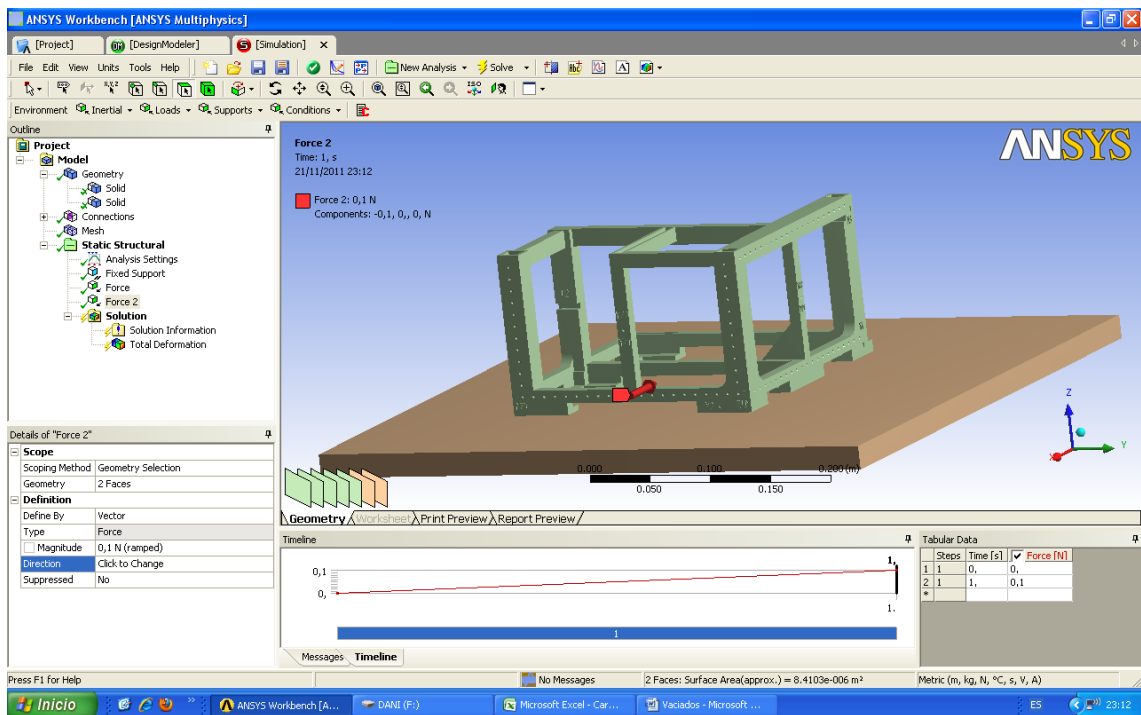
10ª Simulación



Deformación Máxima: 0,69 micras → OK!!!



11ª Simulación



Deformación Máxima: 0,51 micras → OK!!!