

EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y DE COLOR DE PIEZAS PRODUCIDAS EN PROTOTIPOS RÁPIDOS

F. Eugenio López, Francisco Ramírez, Javier de la Garza, Angel Castillo
Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura.
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León.
Av. Universidad S/N, Apdo. Postal 9-“F”, CP. 64000, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904
E-mail: elopez@mail.uanl.mx

RESUMEN

El concepto de prototipos rápidos (RP) es utilizado en los departamentos de diseño para probar geometrías de productos antes de llevarlas al tren productivo. Las tecnologías disponibles varían en cuanto a rapidez, precisión, fidelidad de color, costo de materiales y algunas propiedades mecánicas básicas.

En la elaboración de prototipos que ensamblan con otros componentes, la certeza dimensional es crítica [LAU04], mientras que la fidelidad de color lo es para la utilización del prototipo en presentaciones ejecutivas y algunos casos en donde el color representa una condición mecánica como lo es el análisis de elemento finito.

Este trabajo presenta la evaluación de las características geométricas y de color de piezas elaboradas utilizando una máquina de prototipos rápidos. Se les sometió a análisis dimensional con una máquina de coordenadas y medición de color por espectrocolorimetría. Los resultados mostraron desviaciones de fabricación, las cuales permiten modificar el modelo geométrico original para lograr que la pieza sea funcional sin necesidad de ser maquinada o redimensionada.

Palabras clave: *prototipos rápidos, digitalización 3D, desviación geométrica, análisis de color, espectrocolorimetría, ingeniería inversa, estimación de error.*

ABSTRACT

Rapid prototyping (RP) has become a useful tool in product design. It allows to test the product geometry before the model is turned to the production. Different technologies exist, each with advantages like speed, precision, color fidelity, material cost or some basic mechanical properties.

This work presents the evaluation of the geometrical and color properties of the prototypes from a RP machine. This evaluation was done with a coordinate-measuring machine (CMM). The results show the construct deviation, allowing the error correction before the model was sent to build.

Keywords: *rapid prototyping, 3D scanninggeometric deviation, color analysis, spectrophotometry, reverse engineering, error estimation.*



Fig. 1. Fotografía del prototipo de portaherramienta producido con una máquina de prototipos rápidos y analizado en este trabajo.

INTRODUCCIÓN

Las ventajas de usar la técnica de prototipos rápidos en el diseño de partes mecánicas son numerosas [ALA99, MAV01]. Con la técnica RP (“Rapid Prototyping” por sus siglas en inglés), se pueden obtener en poco tiempo los prototipos físicos de partes diseñadas, lo que permite una evaluación de diseño casi inmediata. Adicionalmente es posible evaluar algunas otras propiedades mecánicas y/o funcionales [HAG03].

La evaluación de estas propiedades puede reducir considerablemente el tiempo de diseño y al mismo tiempo se mejora sustancialmente la calidad del diseño. Adicionalmente la técnica RP permite la fabricación de estructuras tridimensionales complejas, que no podrían ser fabricadas por procesos convencionales [LAU02].

El color es importante cuando la pieza se presenta para que sea evaluada por personas que no están habituadas a las convenciones de dibujo que los diseñadores usan normalmente. El objetivo puede ser simplemente para mostrar si un diseño es factible, práctico y de buen aspecto.

Las aplicaciones de la técnica de prototipos rápidos van desde la industria automotriz, productos de consumo, electrónica, arquitectura, arqueología, médica y sistemas geográficos y virtuales [WIE03, JOH04, LOP05].

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es conocer las desviaciones del proceso de construcción para obtener prototipos funcionales desde la primera fabricación.

Los objetivos particulares fueron:

- Determinar las desviaciones geométricas de los prototipos fabricados con la impresora 3D que se encuentra en las instalaciones de la División de Mecánica de la FIME/UANL.
- Determinar la calidad de color que la impresora arroja bajo condiciones de dosificadores nuevos y mantenimiento apropiado.

Para el análisis se seleccionó el modelo de un soporte portaherramienta para una máquina de modelaje ROLAND modelo MDX-20.

FUNCIONAMIENTO DE LA IMPRESORA 3D

Las impresoras 3D de Z Corporation permiten producir rápido y a bajo costo modelos físicos a partir de datos digitales. Para ello utilizan la tecnología de inyección de tinta para depositar líquido aglutinante sobre polvo, construyendo las partes en base a capas. Incorporan además la capacidad de adicionar una superficie a color mezclando tinta con el aglutinante. El resultado es una representación geométrica del diseño de CAD que puede incluir colores, dibujos y fotografías.

La tecnología que utiliza la impresora 3D fue desarrollada en el Tecnológico de Masachussets. Consiste en particionar el modelo geométrico (usualmente en formato de estereolitografía) en capas de espesor de 0.0762 a 0.2286 mm (0.003 a 0.009 pulgadas) de espesor. Ver tabla I, en donde se compara este proceso con respecto a otras tecnologías.

Cada capa se imprime sobre un depósito de polvo de impresión, utilizando dos pistones para controlar la alimentación y construcción (ver figura 2).

Ya que la producción de geometrías con este procedimiento implica una conversión de formato CAD a STL y posteriormente a capas, el prototipo final puede contener errores de conversión [SMI00].

La tecnología de inyección de tinta se basa en la mezcla subtractiva de colores *MAGENTA-CYAN-AMARILLO*, la cual es vectorialmente complementaria al sistema aditivo RGB (ver figura 4). Además del dosificador de

aglutinante, la máquina de prototipos utiliza 3 dosificadores para cada componente de color.

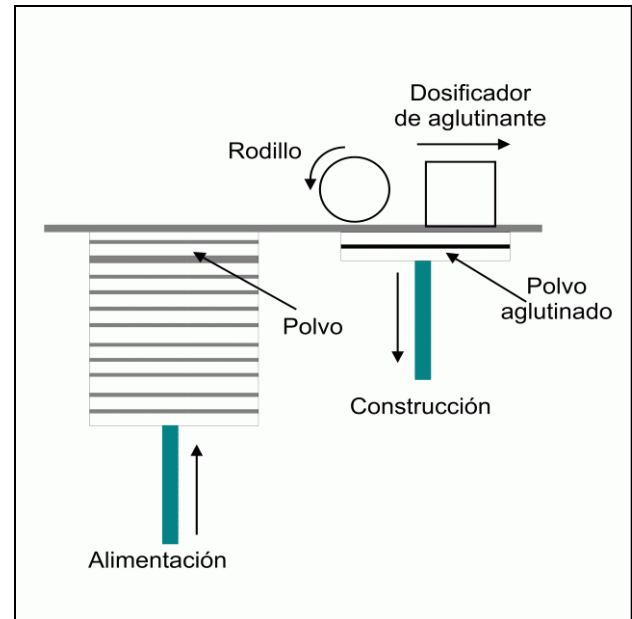


Fig. 2. Principio de funcionamiento de la impresora tridimensional.

Tabla I.- Diferentes tecnologías de prototipos rápidos [BRA04]		
Tecnología de prototipado	Tolerancia típica	Material base
Sinterizado selectivo de láser (SLS)	± 0.1778 mm. Varía dependiendo del material sinterizado con láser.	Metales termoplásticos, povos cerámicos
Modelado por deposición fundida (FDM)	± 0.13 mm.	Termoplásticos, metales eutecticos
Estereolitografía (SLA)	± 0.127 mm a 0.0381 mm para cada 25.4 mm subsiguientes.	Fotopolímero
Modelado Multi Jet (MJM)	± 0.0127 mm.	Fotopolímero
Objeto manufacturado por capas laminadas (LOM)	± 0.1066 mm.	Papel
Fusión por electrorayo (EBM)	$0.05 - 0.2$ mm	Aleaciones de titanio
Impresión 3D (3DP)	0.0762 a 0.2286 mm	Materiales varios

DETALLE DEL MODELO A ANALIZAR

Para las pruebas se seleccionó el prototipo de soporte portaherramienta para una máquina de modelaje ROLAND modelo MDX-20. La figura 1 muestra el componente en RP ensamblado y la figura 3 muestra los modelos geométricos de CAD de las tres piezas que conforma el soporte.

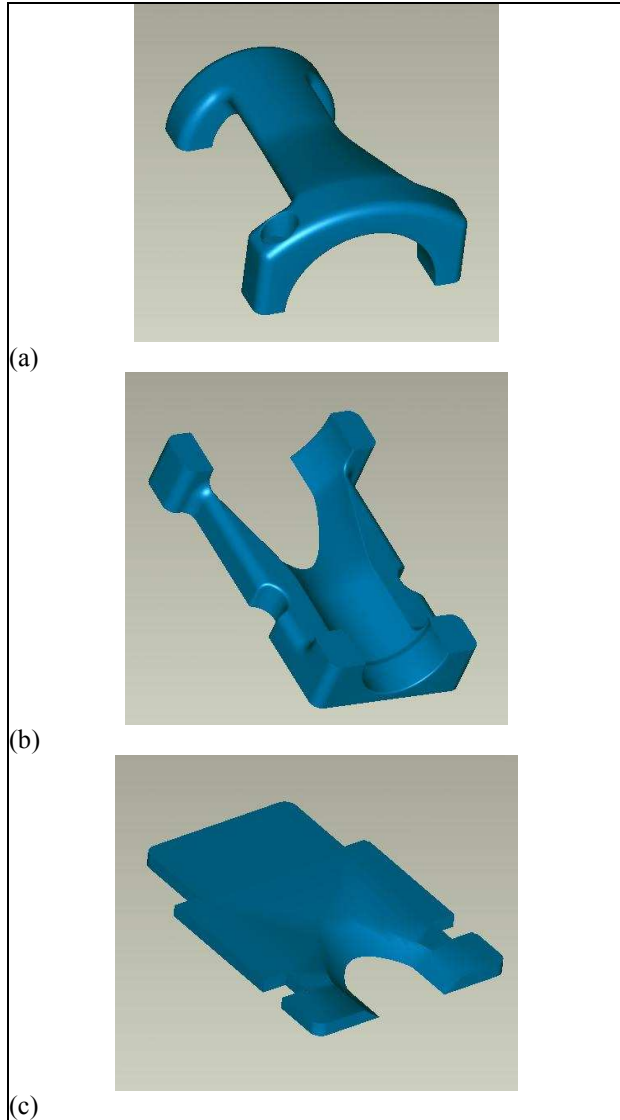


Fig. 3. Partes del soporte portaherramienta. (a) pieza A, (b) pieza B y (c) pieza C.

EXPERIMENTACIÓN

Para la experimentación se fabricaron 2 prototipos de cada pieza que compone el soporte. Para evitar incluir potenciales errores de conversión al generar los archivos de impresión (en formato de estereolitografía STL), éstos fueron considerados los modelos CAD y por lo tanto la referencia geométrica.

Por lo tanto, se realizaron 6 experimentos a partir de los tres archivos de impresión de las piezas A, B y C que conforman el soporte. Las combinaciones de medición se muestran en la tabla II.

TABLA II. Combinaciones utilizadas en la medición geométrica con la máquina de coordenadas.			
Experimento	Archivo modelo de referencia	Prototipo rápido modelo de prueba	Color de fabricación del prototipo
1	A	A1	Magenta
2	A	A2	Magenta
3	B	B1	Cyan
4	B	B2	Cyan
5	C	C1	Amarillo
6	C	C2	Amarillo

Para analizar el desempeño de color, las dos piezas A se produjeron en color magenta, las dos piezas B en color cyan y las dos piezas C en color amarillo.

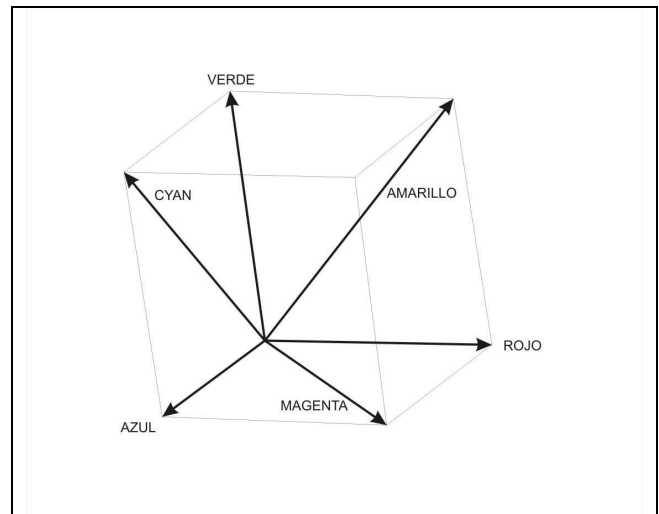


Fig. 4. Diagrama vectorial de colores en el sistema MAGENTA-CYAN-AMARILLO.

Para la medición de color, se tomaron 3 muestras a cada prototipo rápido, por lo que se hicieron 6 ensayos para cada color.

TABLA III. Lecturas para la evaluación del color.			
Lectura	Magenta	Cyan	Amarillo
1	Muestra Lab Pieza A2	Muestra Lab Pieza B2	Muestra Lab Pieza C2
2	Muestra Lab Pieza A2	Muestra Lab Pieza B2	Muestra Lab Pieza C2
3	Muestra Lab Pieza A2	Muestra Lab Pieza B2	Muestra Lab Pieza C2
4	Muestra Lab Pieza A1	Muestra Lab Pieza B1	Muestra Lab Pieza C1
5	Muestra Lab Pieza A1	Muestra Lab Pieza B1	Muestra Lab Pieza C1
6	Muestra Lab Pieza A1	Muestra Lab Pieza B1	Muestra Lab Pieza C1

PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

El instrumento proyecta una línea de rayo láser sobre la superficie del objeto a medir. Por triangulación determina las coordenadas de los puntos sobre la imagen, y a través de sensores de posición de las articulaciones, es posible conocer las coordenadas globales de los puntos marcados por el láser [ROD01].

Las condiciones de operación del instrumento deben considerar anteriormente a su uso la calibración, fuente de luz, densidad de digitalizado y distancia de digitalización del instrumento que no se especifican aquí.

RESULTADOS

La tabla IV muestra los resultados de las desviaciones geométricas, mientras que las tablas V, VI y VII muestran los resultados de las lecturas de color. Las tablas VIII, IX y X muestran el diferencial de cada muestra de color con respecto al color referencia ideal.

Resultados de las mediciones geométricas

Los valores máximos de desviación se muestran en la tabla IV. A pesar de que las desviaciones máxima positiva y negativa tienen para todos los casos valores del orden de milímetros, esto puede deberse a puntos remanentes del lugar en donde se sujetó la pieza para hacer las mediciones. El promedio de las desviaciones muestra que esto es plausible.

Las figuras 5-10 muestran en tonos de colores los valores de los puntos de medición hechos con la máquina de coordenadas. Nótese que el número de puntos hechos a cada pieza son a partir de los 600,000. Los rangos de desviación son de ± 0.3 -0.4; para los datos con mayor porcentaje de los histogramas (figuras 11-16) la desviación típica fue de 0.022 mm, lo cual concuerda con las especificaciones del fabricante de la máquina de prototipos.

Si se observan los histogramas de las lecturas en las figuras 11-16 en conjunto con las figuras 5-10 de tonalidad, el experimento 1 y 2 (pieza A) arrojan que la frecuencia de lecturas son de desviación positiva (sobre dimensionamiento), lo cual se aprecia en la tonalidad rojiza de las figuras 5 y 6. Los experimentos 3 y 4 (pieza B) son curvas de campana muy cercanas al óptimo, lo cual se aprecia en la ocurrencia rojizo-azulada en las figuras 7 y 8. Los experimentos 5 y 6 (pieza C) es el único que arroja sobre y bajo dimensionamiento (la figura 9 es rojiza y la 10 azulada).

TABLA IV. Resultados de la medición 3D.				
Experi- mento	Desviación max pos (mm)	Desviación max neg (mm)	Prom. +/- (mm)	Desviación estandard
1	3.299	-3.287	0.185 -0.116	0.157
2	3.258	-3.3	0.154 -0.119	0.142
3	2.296	-1.582	0.119 -0.075	0.154
4	0.914	-1.106	0.140 -0.051	0.138
5	3.237	-3.280	0.133 -0.157	0.220
6	3.05	-2.665	0.188 -0.469	0.236

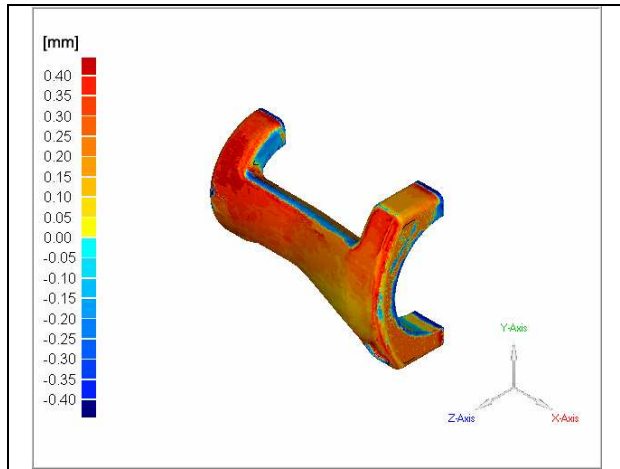


Fig. 5. Desviaciones en milímetros como tonos de colores del experimento 1. Puntos medidos: 1,556,551

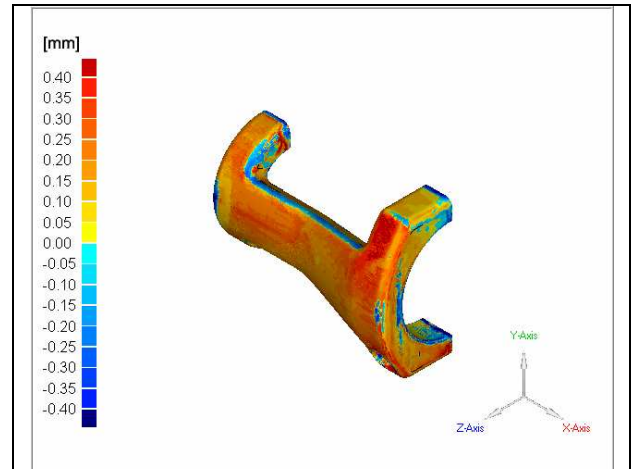


Fig. 6. Desviaciones en milímetros como tonos de colores del experimento 2. Puntos medidos: 1,507,417

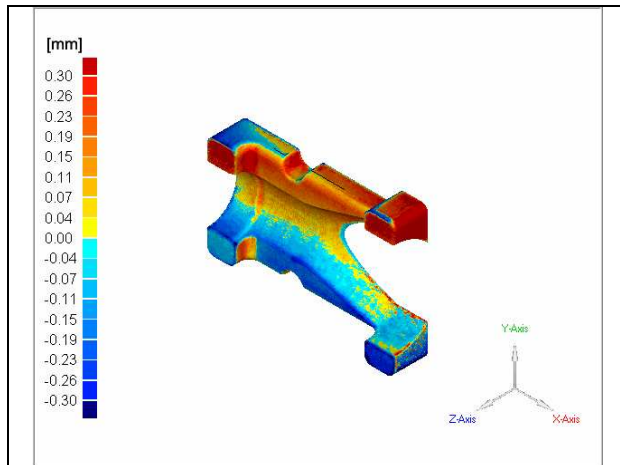


Fig. 7. Desviaciones en milímetros como tonos de colores del experimento 3. Puntos medidos: 695,329

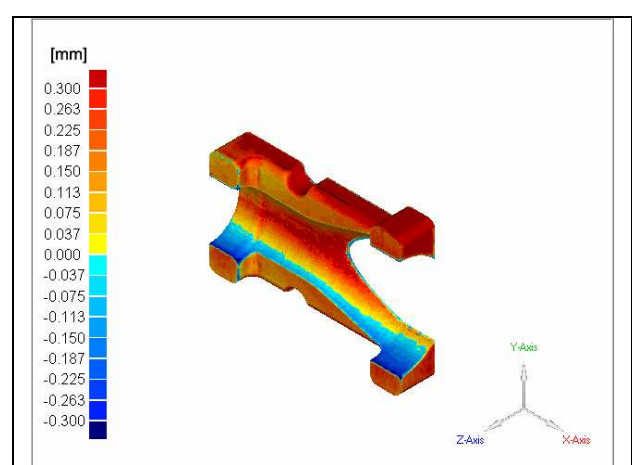


Fig. 8. Desviaciones en milímetros como tonos de colores del experimento 4. Puntos medidos: 674,697

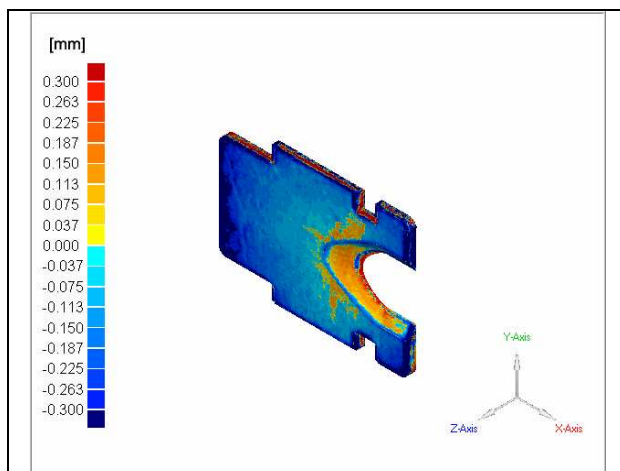


Fig. 9. Desviaciones en milímetros como tonos de colores del experimento 5. Puntos medidos: 1,424,392

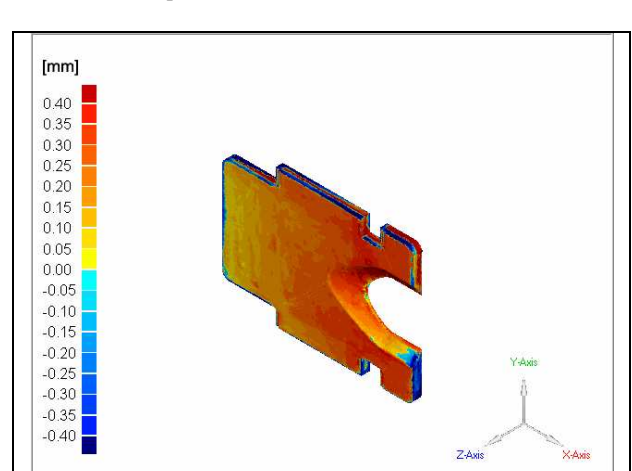


Fig. 10. Desviaciones en milímetros como tonos de colores del experimento 6. Puntos medidos: 1,264,726

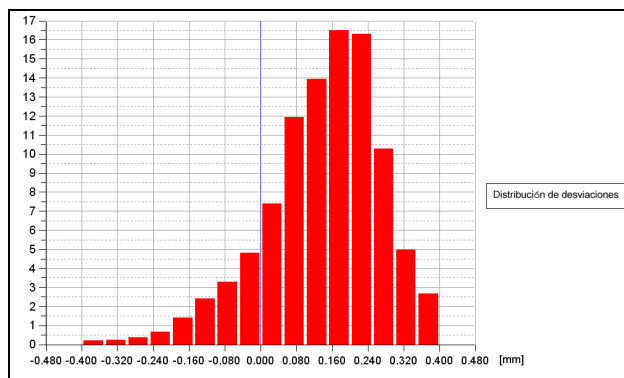


Fig. 11. Histograma de desviaciones geométricas del experimento 1.

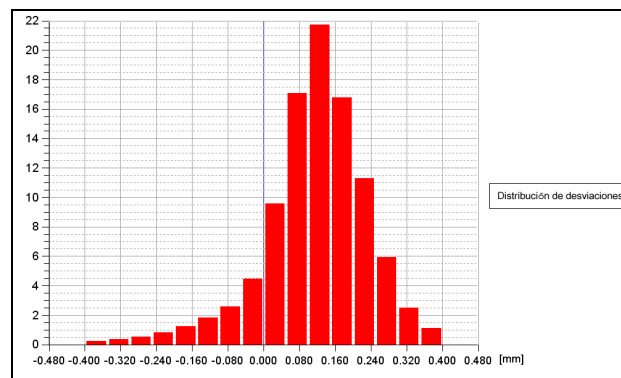


Fig. 12. Histograma de desviaciones geométricas del experimento 2.

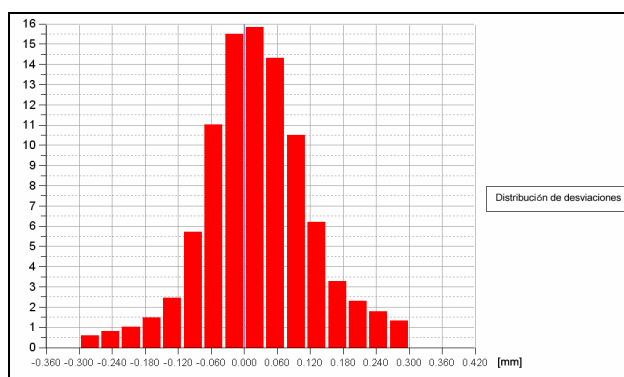


Fig. 13. Histograma de desviaciones geométricas del experimento 3.

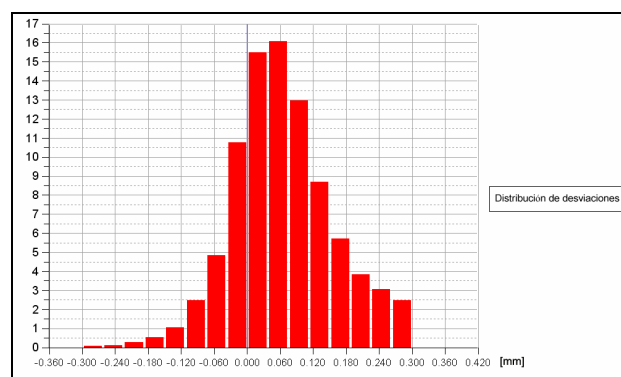


Fig. 14. Histograma de desviaciones geométricas del experimento 4.

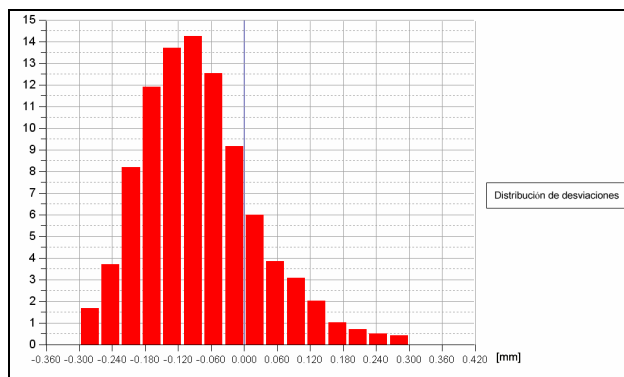


Fig. 15. Histograma de desviaciones geométricas del experimento 5.

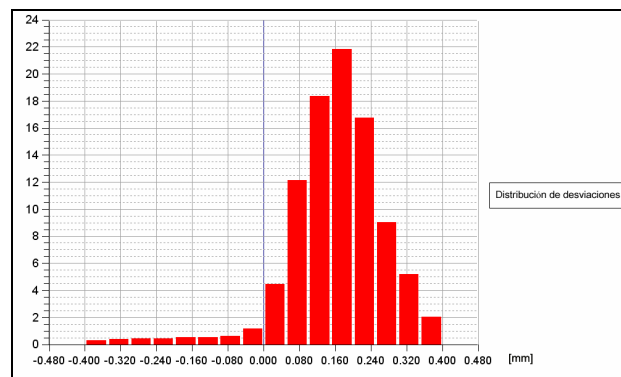


Fig. 16. Histograma de desviaciones geométricas del experimento 6.

Resultados de la medición de color

Las tablas V a VII muestran los valores de las muestras de color realizadas a las piezas. Las tablas VIII a X son las desviaciones de cada valor con respecto al color de referencia en el sistema $L^*a^*b^*$.

Tabla V. Color magenta			
Lectura	L	a	b
1	48.36	45.69	-6.51
2	47.44	44.42	-6.81
3	46.19	44.3	-6.53
4	49.16	40.4	-6.59
5	48.87	44.08	-6.74
6	47.73	39.65	-6.09

Tabla VI. Color cyan			
Lectura	L	a	b
1	57.28	-26.76	-20.4
2	56.13	-27.25	-20.78
3	53.5	-26.46	-20.25
4	56.17	-27.91	-21.24
5	55.9	-26.8	-20.47
6	56.04	-27.2	-20.83

Tabla VII. Color amarillo			
Lectura	L	a	b
1	76.85	0.1	73.07
2	77.03	0.05	71.7
3	77.1	0.11	70.77
4	77.97	-0.24	70.31
5	76.84	0.05	69.83
6	77.54	-0.28	70.58

Cálculo de la desviación de color

Para la determinación de la desviación de color se consideró el sistema $L^*a^*b^*$. La determinación de la desviación de las componentes está dada por la ecuación 1:

$$\begin{aligned}\Delta L &= L_{\text{ideal}} - L_{\text{real}} \\ \Delta a &= a_{\text{ideal}} - a_{\text{real}} \\ \Delta b &= b_{\text{ideal}} - b_{\text{real}}\end{aligned}\quad (1)$$

Tabla VIII. Diferencia de magenta			
Lectura	ΔL	Δa	Δb
1	11.64	52.31	-53.49
2	12.56	53.58	-53.19
3	13.81	53.7	-53.47
4	10.84	57.6	-53.41
5	11.13	53.92	-53.26
6	12.27	58.35	-53.91

Tabla IX. Diferencia de cyan			
Lectura	ΔL	Δa	Δb
1	33.72	-21.24	6.4
2	34.87	-20.75	6.78
3	37.5	-21.54	6.25
4	34.83	-20.09	7.24
5	35.1	-21.2	6.47
6	34.96	-20.8	6.83

Tabla X. Diferencia de amarillo			
Lectura	ΔL	Δa	Δb
1	20.15	-25.1	23.93
2	19.97	-25.05	25.3
3	19.9	-25.11	26.23
4	19.03	-24.76	26.69
5	20.16	-25.05	27.17
6	19.46	-24.72	26.42

Y el cálculo del error ΔE será por tanto (ec. 2):

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (2)$$

Como se puede apreciar en la figura 17, una desviación mayor de color se presentó en la componente magenta, mientras que la desviación de las componentes cyan y amarillo fue la misma.

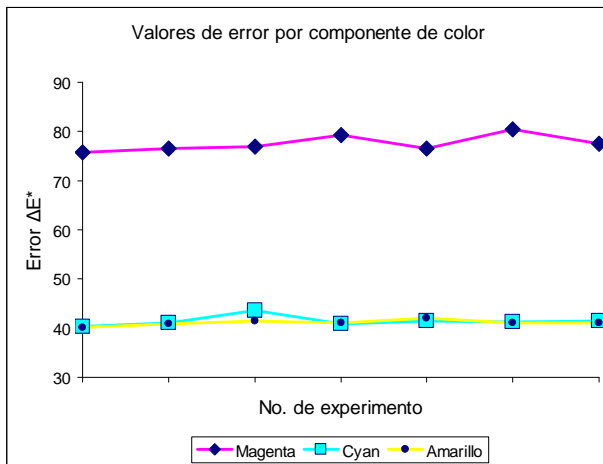


Fig. 17. Valores de error por componente de color calculados utilizando las tablas VIII a X y la ecuación 2.

CONCLUSIONES

Se presentó la comparación entre el archivo en formato STL y una serie de mediciones hechas al modelo de un portaherramienta compuesto de tres piezas fabricado con una máquina de prototipos rápidos.

Considerando las propiedades de color, se estableció un parámetro numérico de error para poder establecer si los requerimientos de una situación dada pueden ser satisfechos con la calidad que la máquina RP provee. Aunque el valor del error encontrado permite inferir que el color del prototipo es para muchas aplicaciones confiable, para lograr una mejor fidelidad es necesario compensar el valor de cantidad de tinta del color magenta con respecto al color deseado.

La máquina evaluada representa una buena herramienta en la reconstrucción de geometrías en una gran cantidad de aplicaciones en la manufactura de productos. Los resultados de este reporte dejan en claro que deben considerarse las condiciones de operación de la máquina.

Actualmente se está desarrollando un método que trata el problema de compensar las desviaciones encontradas para mejorar la funcionalidad del prototipo.

AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo se han presentado los resultados preliminares de una propuesta de proyecto UANL-PAICYT 2007. Fue realizado en el marco de la línea de generación y aplicación de conocimiento LGAC L2: "Optimización geométrica de productos" del Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL con el apoyo financiero de la misma.

Los autores agradecen especialmente María Gallegos de la compañía Tecnologías y soluciones 3D TECSOL3D, representante en México, por su gestión ante Z Corporation USA para el apoyo en consumibles, información técnica y de procedimientos de la impresora. También se agradece a METRICA SA de CV por su apoyo en procedimientos tecnológicos y calibración así mismo a los estudiantes Iván Marquez y Francisco Gámez.

EQUIPO UTILIZADO

La máquina de prototipos rápidos motivo de este estudio fue de la compañía ZCorp, modelo Spectrum Z510 con capacidad de construcción de 2 capas por minuto y un volumen de trabajo de 254 x 356 x 203 mm, con resolución 600 x 540 dpi.

Las mediciones geométricas fueron realizadas con una máquina de coordenadas manual certificada marca FARO modelo "Platinum Arm P0805" de 19,200 mediciones/segundo, con una exactitud de 50μm (0.002 pulgadas) y repetibilidad ± 50μm, 2σ (± 0.002 pulgadas). Las licencias de software para el tratamiento de datos son: Geomagic Studio v9 y Geomagic Qualify v9.

Para el análisis de color se utilizó un instrumento de medición de color espectrómetro certificado marca Garden con capacidad de cumplir con los estándares: DIN 5033, 5036, 6174; ISO 7724; ASTM D2244, E308, E522; con un factor de iluminación D10° 65.

REFERENCIAS

- [ALA99] M. Alam, C. Mavroidis, N. Langrana and P. Bidaud. *"Mechanism design using rapid prototyping"*. Tenth World Congress On The Theory Of Machines And Mechanisms. Oulu, Finland, June 20-24, 1999
- [BRA04] J.W. Branch, J.B. Gomez, F. Prieto. *"Reconstrucción 3D a partir de imágenes de rango: Revisión de la literatura"*. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, V.8, N° 23, 2004. España.
- [HAG03] R. Hague, S. Mansour, N. Saleh. *"Design opportunities with Rapid Manufacturing"*. Assembly Automation v.23 N4 2003 pp 346-356 ISSN 0144-5154.
- [JOH04] R.A. Johnston, K. Barnes, T. Lovell-Smith and N.B. Price. *"Use of a Hand-held Laser Scanner in Palaeontology: A 3D Model of a Plesiosaur Fossil"*. Image and Vision Computing '04 New Zealand 21-23 November 2004 Akaroa, New Zealand
- [LAU02] K. J. De Laurentis, F. Kong and C. Mavroidis. *"Procedure for rapid fabrication of non-assembly mechanisms with embedded componentes"*. ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Montreal, Canada, September 29-October 2, 2002
- [LAU04] K. J. De Laurentis and C. Mavroidis. *"Rapid fabrication of a non-assembly robotic hand with embedded components"*. Assembly Automation. Vol. 24 Number 4 2004 pp. 394-405. Emerald Group Publishing Limited. ISSN 0144-5154
- [LOP05] C. López, L. Alcalá, L. Berges, V. Yoldi, A. Cobos, R. Royo, *"Nuevas perspectivas en la reconstrucción de dinosaurios 3D"*. XVII CONGRESO INTERNACIONAL INGEFRAF – ADM, Junio de 2005.
- [MAV01] C. Mavroidis, K.J. DeLaurentis, J. Won, M. Alam. *"Fabrication of Non-Assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping"*. Transactions of the ASME p 516-524 Vol. 123, December 2001.
- [ROD01] F. Rodrigues, P. Leronés. *"Digitalización automática de superficies empleando escáneres ópticos"*. XXII Jornadas de Automática en la Industria. Bellaterra (Barcelona, España). Septiembre de 2001.
- [SMI00] B. de Smit, J. Broek, I. Horváth. *"Expected performance of the FF-TLOM technology, based on preliminary testing of the involved basic technologies"*. 1st RAPDASA Annual Conference, Pretoria, South Africa. November 2000.
- [WIE03] B. Wieneke, H. Gerber. *"Rapid Prototyping*

Technology – New potentials for offshore and abyssal engineering". The 13th International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE 2003 - Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003.

AUTORES

López Guerrero, Francisco Eugenio.

Ingeniero Mecánico Electricista e Ingeniero en Control y Computación de la UANL, Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Sistemas por la misma Universidad, durante estos estudios participó en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania en donde desarrolló su tesis de maestría. Doctor en Ingeniería de materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.

Ramírez Cruz, Francisco.

Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias de la Mecatrónica en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Dirigió el departamento de Somatoprótesis de la Facultad de Medicina de la UANL. Profesor de la División de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”. Actualmente trabaja en su tesis doctoral sobre optimización para elemento finito con criterio de crecimiento biológico.

De la Garza Salinas, Francisco Javier.

M.C. Ingeniero en Control y Computación egresado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En la misma institución realizó sus estudios de maestría en el área de Eléctrica con especialidad en Electrónica. Tiene especialización en Sistemas Distribuidos en la Universidad Técnica de Hamburgo en Alemania. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.

Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Actualmente es Jefe del Departamento de Mecatrónica.

Castillo Castro, José Ángel

Egresado de la carrera de Ingeniero en Control y Computación, FIME, UANL. También obtuvo la maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Electrónica en la misma institución.

Es profesor de tiempo completo de la UANL e imparte los cursos de Microprocesadores, Diseño Digital y Teoría Electromagnética. Actualmente es Jefe de Academia de Máquinas Inteligentes de la carrera *Ingeniero en Mecatrónica* y colabora como profesor investigador en el laboratorio de mecatrónica de la División de Mecánica de la FIME UANL.