

Calidad superficial en el prototipado rápido, proceso FDM*

Surface quality in rapid prototype MMD process

Lisandro Vargas Henríquez¹, Ernesto Córdoba N.²

RESUMEN

Este artículo es una síntesis de la tesis de maestría en el Posgrado de Materiales y Procesos de Manufactura, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. El *paper* muestra la interacción de los parámetros del proceso, distancia de la deposición (Gap) y la velocidad del cabezal de extrusión, para la máquina Titán SH-1 de prototipado rápido, proceso de modelado por deposición fundida de material (FDM), del CEIF (Centro de Equipos Interfacultades), a través del análisis del mejoramiento en la calidad de la superficie y la resistencia a la tensión de los prototipos y la caracterización del material. El proyecto aplica criterios del diseño experimental para orientar la selección de los parámetros experimentales del proceso. Previamente se realiza la caracterización mecánica y físico-química del Acrilnitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) material utilizado en el proceso FDM.

PALABRAS CLAVE: acrilnitrilo-butadieno-estireno (ABS), microanálisis, prototipado rápido, termograma.

ABSTRACT

This article summarises a Manufacturing Materials and Processes MSc thesis written for the Mechanical and Electrical Engineering Department. The paper shows the interaction of process, gap (deposition distance) and extrusion terminal velocity modelled process parameters for CEIF's (Centro de Equipos Interfacultades) rapid prototype molten material deposit (MMD) Titan SH-1 machine by analysing prototypes improved surface quality and resistance to tension and characterising material. The project applies experimental design criteria for orientating the selection of experimental process parameters. Acrylonitrile-butadien-styrene (ABS) had already been mechanically and physico-chemically characterised (i.e. the material used in the MMD process).

KEY WORDS: acrylonitrile-butadien-styrene (ABS), microanalysis, rapid prototype, thermogram.

Recibido: Septiembre 29 de 2004

Aceptado: Noviembre 24 de 2004

Introducción

Los ingenieros de diseño usan el proceso de prototipado rápido para crear prototipos tangibles de sus diseños, para ayudar a visualizar y entender sus ideas en las primeras fases del proceso de desarrollo. Los prototipos ayudan a descubrir problemas potenciales en una área donde no son aparentemente legibles, en papel o en una pantalla de computador. También, permiten obtener partes completamente funcionales para ser sometidas a pruebas bajo uso de condiciones reales, para estimar las características de forma, manufacturabilidad y acabado. Un buen acabado de la superficie de los modelos ayuda a eliminar la inexactitud dimensional y reduce los costos producidos por los pos-procesados realizados.

I. Caracterización del Acrilnitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

Las propiedades mecánicas de los prototipos son dependientes de las propiedades del material y de la calidad del resultado de la unión entre las capas. El ensayo mecánico permite la determinación de los datos específicos del material termoplástico ABS (resistencia y módulo elástico) necesarios para su aplicación en el diseño de ingeniería o en el control de calidad.

La Figura 1 muestra que el material es rígido y resistente, ya que presenta un módulo de elasticidad alto (1.893,47 MPa) y el área debajo de la curva es grande (6,537 MPa). La Tabla 1 muestra una comparación de las características

¹ Universidad Nacional de Colombia, MSc lvargash@unal.edu.co

² Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia. ecordoban@unal.edu.co

* Maestría en ingeniería - materiales y procesos de manufactura, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia - sede bogotá.

mecánicas del material ABS utilizado en el proceso de FDM, con el comercial y el extruido.

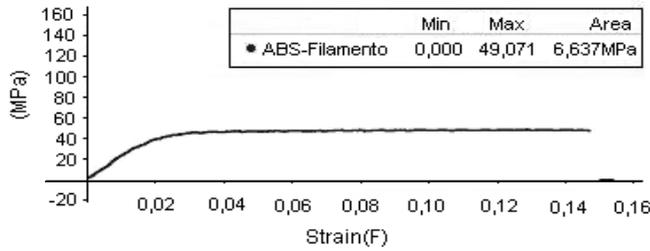


Fig. 1. Curva esfuerzo-deformación para el filamento de material ABS (Software Data Studio, Aparato Stress/Strain, Laboratorio de Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia).

Tabla 1. Datos de resistencia y módulo para el material ABS

Propiedades	ABS Comercial	Filamento a Granel	Filamento Extruido
Resistencia Tensión (MPa)	30 – 45	49,071	19,251
Módulo Elástico (MPa)	1972 – 2485	1893,47	1414,831
% Elongación	2 - 5	0,15	0,017

El valor de la resistencia a la tensión y del módulo elástico para el ABS utilizado en el prototipado rápido se encuentra dentro del rango de las propiedades del ABS comercial. La resistencia y el módulo elástico para el ABS extruido disminuye con respecto al ABS sin extruir, debido a la creación de poros en la estructura durante el proceso de fabricación, por el comportamiento anisotrópico del material y debido a la forma como se aplicó la carga a la probeta para realizar el ensayo de tensión, que fue a 45° con respecto a la dirección de la deposición del material.

Es posible concluir que el proceso de extrusión no tiene una influencia considerable en el módulo del material pero afecta notablemente el esfuerzo y la deformación máxima. Este último efecto puede explicarse por el comportamiento visco-elástico del ABS: durante el proceso de extrusión a través de la boquilla de 0,016 pulg. de diámetro, el polímero se somete a una orientación de las cadenas de la molécula que crea una anisotropía y un alargamiento del material.

La Figura 2 muestra el análisis de difracción de rayos-X realizado a las diferentes muestras de ABS, con un barrido entre 5° y 100°.

El espectro de la materia prima muestra que no hay picos significativos para un barrido entre 30° y 90°, ni se identifican fases cristalinas algunas, por lo tanto, el material es completamente amorfo. Comparándolo con un ABS de referencia se observa que son muy parecidos, se considera que no hay aditivos presentes en el material. El ABS al ser extruido presenta unos picos diferentes que en el

filamento, esto se puede interpretar por la orientación molecular que se produce durante el proceso de extrusión y el alineamiento de las cadenas moleculares. Esta orientación molecular es causada por la deformación que se presenta durante el enfriamiento del material polimérico ABS.

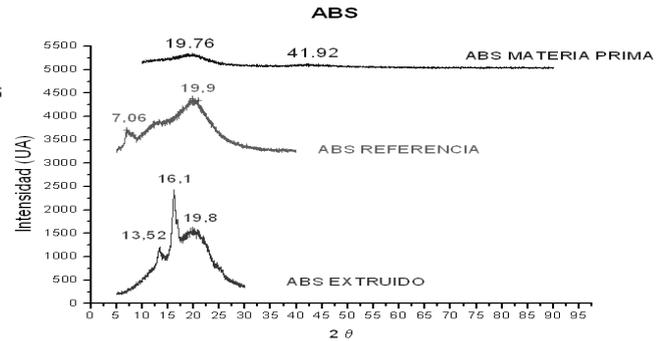


Fig. 2. Difracción que compara el ABS de referencia, el extruido y sin extruir.

Se obtuvieron imágenes con un microscopio electrónico Philips ESEM XL 30 TMP, e imágenes topográficas con el microscopio de barrido por sonda, Park Scientific Instruments AutoProbe CP, en el modo de microscopía de fuerza atómica en el modo Contacto (AFM – C), en el Laboratorio del Plasma de la Universidad Nacional, sede Manizales.

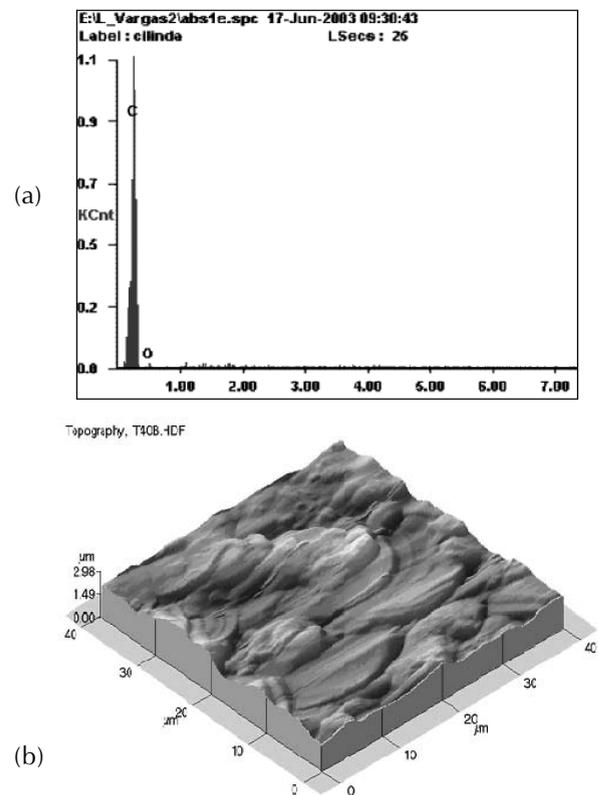
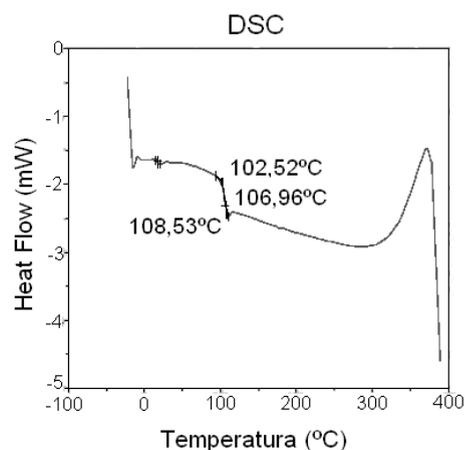


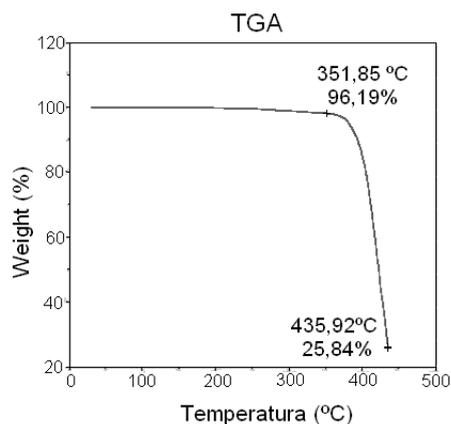
Fig. 3. (a) Espectro EDS con la imagen ESEM del punto donde se realizó el microanálisis (Universidad Nacional sede Manizales). (b) imagen topográfica del material ABS con área de barrido de 40 mm².

La Figura 3(a) muestra un espectro EDS, así como la micrografía ESEM obtenido sobre el ABS. Se observa que la muestra es completamente homogénea en composición, con una presencia considerable de carbono en su superficie. Se considera que el material es 95% puro. En la Figura 3(b) se observa en la morfología de la superficie cierto grado de orientación de la estructura presentada por el proceso de fabricación del material, este tipo de orientación no se puede prevenir completamente.

El análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), Figura 4(a), muestra la curva de temperatura contra flujo de calor obtenida de la muestra de ABS.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Termograma del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), y (b) termograma del análisis termogravimétrico (TGA) para el material ABS (Universidad Nacional, 2003).

Se observa que la curva baja linealmente con el aumento de la temperatura, sólo a temperaturas bajas. Se presentan unos cambios en la pérdida de calor a temperaturas de transición vítrea entre 102,52 - 108,53°C. Con el ataque de movilidad de las cadenas moleculares sobre esta transición, toma lugar una pequeña cristalización. A temperatura alta (300°C), estos pequeños cristales funden con el levantamiento correspondiente en la curva del

calor específico y a temperaturas de 350°C se presenta la degradación del material. La transición vítrea causa un cambio endotérmico en la línea básica inicial debido al aumento de la capacidad de calor en la muestra. El análisis termogravimétrico, Figura 4(b), muestra que el material ABS tiene una excelente estabilidad térmica hasta 351,85°C y su porcentaje en peso no tiene un cambio significativo, pero más allá de esa temperatura el material comienza a descomponerse y su pérdida de peso se hace evidente (25,84%).

II. Experimentos y resultados

Se considera que el acabado de la superficie es una función de varios factores. Entre ellos están: el *Gap*, la velocidad del cabezal de extrusión, la orientación en la construcción, el espesor de capa, la anchura del recorrido y la temperatura del modelo. Esta investigación se concentra en el efecto de los parámetros, distancia de la deposición (*Gap*) y la velocidad del cabezal de extrusión, sobre el acabado de la superficie y la resistencia mecánica para los prototipos construidos en la máquina Titán SH-1, que es basada en la tecnología o proceso de modelado por deposición fundida (FDM). Para poner los niveles apropiados para cada variable, se partió de la base de los niveles con los que se trabaja actualmente en la máquina y de las especificaciones técnicas aportadas por el fabricante de la máquina Titán SH-1, ubicada en el Centro de Equipos e Interfacultades, CEIF, de la Universidad Nacional de Colombia.

Así, para el *gap*, los niveles se tomaron con respecto a la calibración que se realiza en la máquina Titán, esta calibración tiene una distancia de 0,033 pulg. (0,84 mm) y la máquina reconoce el punto cero (0,0) o *setpoint*. Desde este punto se subió la boquilla de deposición dos milésimas de pulgada, es decir, un *Gap* de 0,035 pulg (0,89 mm) y se bajó una milésima, es decir un *Gap* de 0,032 pulg (0,81 mm).

Tabla 2. Parámetros de proceso, símbolos y niveles asignados para el diseño de experimento

Factor	Nivel Bajo	Nivel Central	Nivel Alto
Gap (A) pulg	0.032	0.033	0.035
Velocidad (B) mm/seg	0.135	0.140	0.145

Se considera que un diseño factorial completamente al azar con dos factores y tres niveles para cada factor, que produce nueve tratamientos experimentales, da para estimar adecuadamente los efectos principales y sus interacciones. Posteriormente, los tratamientos fueron aleatorizados, esto se realiza con el fin de evitar obtener datos sesgados que den una información errónea del experimento. Las probetas fabricadas para los ensayos de tensión tienen las dimensiones estandarizadas por la ASTM en su designación D-638 para plásticos.

El valor de la rugosidad de las 36 probetas se obtiene usando un rugosímetro Hommel T500, de contacto su-

periferal en el Laboratorio de metrología de la Universidad Nacional; se realizaron cuatro medidas por cada superficie y el promedio de éstas se tomó para su análisis. Cada medida se tomó con una longitud de barrido de 4,8 mm. El equipo utilizado para la realización del ensayo de tensión es el Apparatus stress/strain de PASCO referencia AP-8216. Por medio de un software, DataStudio, generar la gráfica de esfuerzo-deformación del material ensayado.

A. Análisis del diseño experimental para la rugosidad

Los datos de la variable respuesta rugosidad de las 36 probetas fueron analizadas usando el software de diseño de experimento Design Expert. El resultado para la rugosidad, donde se calculan y analizan los efectos principales y sus interacciones, se muestra a continuación.

Tabla 3. Analisis de varianza para la rugosidad

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	Valor F _o	Prob>F
Modelo	291,08	8	32,38	284,12	< 0,0001**
Gap	62,37	2	31,19	273,61	< 3,35
Velocidad	160,30	2	80,15	703,20	< 3,35
Gap*Vel	36,40	4	9,10	79,84	< 2,73
Error	3,08	27	0,11		
Total	262,16	35			

** Significante

Fuente: Software Desing Expert. Universidad Nacional de Colombia

Del análisis de varianza se concluye que la interacción entre el Gap y la velocidad del cabezal de extrusión es significativa, también son significantes los factores individualmente, es decir estos factores afectan la rugosidad. De manera auxiliar en la interpretación de los resultados anteriores, resulta útil la construcción de la gráfica de la rugosidad promedio de cada combinación de tratamiento (Figura 5).

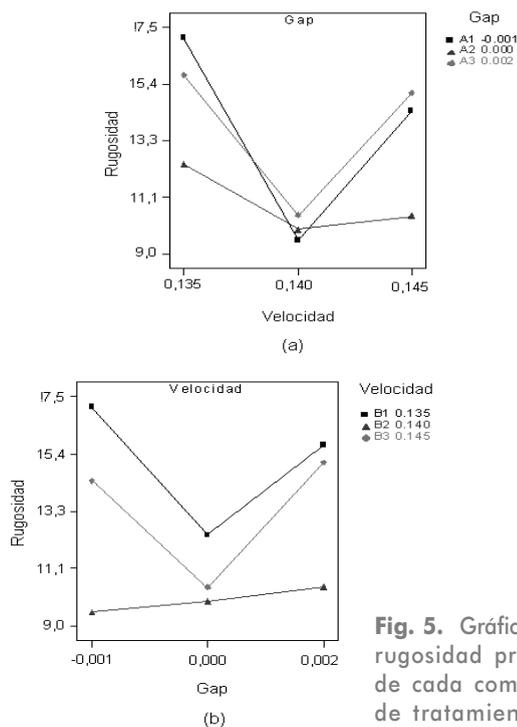


Fig. 5. Gráficas de la rugosidad promedio de cada combinación de tratamientos

Como las rectas no son paralelas nos indica una interacción de los factores significativa, y se observa que el Gap no es un factor significativo, ya que se puede disminuir la rugosidad a velocidades intermedias sin importar el Gap utilizado. Este análisis de varianza no solo determina qué efectos son significantes sino que también formula un modelo matemático que usa los efectos como sus coeficientes calculados para las variables significantes.

$$\text{Rugosidad} = 7.77 + 0.03*A - 0.83*B + 3.13*A^2 + 4.20*B^2 + 0.51*A*B$$

Esta ecuación puede usarse para predecir el valor de la rugosidad de la superficie de los modelos fabricados por el proceso FDM. La gráfica de la superficie de respuesta tridimensional para la respuesta de la rugosidad es generada por la ecuación de la rugosidad.

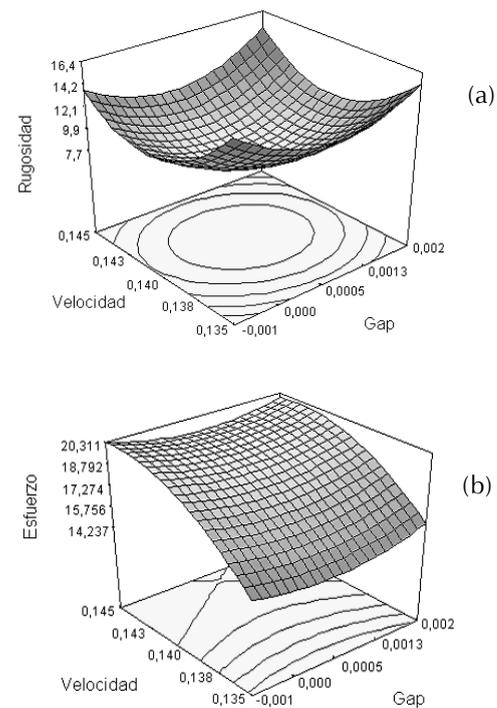


Fig. 6. (a) Superficie de respuesta para la rugosidad. (b) superficie de respuesta para la resistencia a la tensión

Examinando la superficie de respuesta para la rugosidad (Figura 6a), se observa que la mínima rugosidad se logra a velocidades de 0,140 mm/seg y a un Gap de 0,033 pulg. El análisis de varianza para los datos de la resistencia a la tensión son similares a los obtenidos en la rugosidad. La interacción entre los factores y solo el factor velocidad del cabezal de extrusión son significantes, es decir, afectan la resistencia de los modelos. Examinando la gráfica de superficie de respuesta para la resistencia a la tensión (Figura 6b), se observa que la máxima resistencia a la tensión se logra a velocidades entre 0,140 y 0,145 mm/seg independientemente del Gap utilizado en la fabricación del prototipo.

B. Optimización del diseño experimental

La optimización es una combinación iterativa de valores de los niveles de factores, distancia de la deposición (Gap) y velocidad del cabezal de extrusión, que simultáneamente pueden satisfacer los requerimientos funcionales de minimizar la rugosidad y maximizar la resistencia, generando las condiciones óptimas y estableciendo los límites mínimos y máximos para cada respuesta. Para la rugosidad se escogió la meta de 9,5 μm y el límite inferior de 9 μm y el superior de 10,5 μm . Los límites para la resistencia a la tensión son 18,058 MPa para el límite inferior y 21 para el superior, con una meta de 20 MPa. Con estas condiciones se encontraron dos respuestas:

La optimización gráfica establece los límites mínimo y máximo para la respuesta creando un gráfico final de un área de operabilidad. Esta gráfica se muestra en la Figura 7.

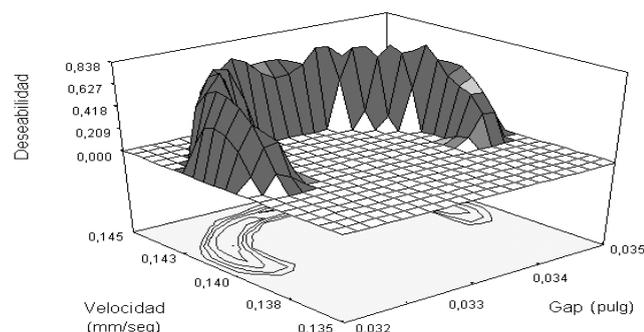


Fig. 7. Superficie de respuesta del área de operabilidad seleccionada

Las mejores condiciones de los parámetros es en el área de velocidad entre 0,140 mm/seg y 0,143 mm/seg, y la distancia de la deposición puede ser entre 0,033 pulg y 0,034 pulg.

III. Conclusión

En resumen, las especificaciones del material ABS con el que trabaja la máquina Titán SH-1 de prototipado rápido, proceso FDM, suministrada por Stratasys, es de 95% de pureza, completamente amorfo, la resistencia a la ten-

sión es de 49 MPa, el módulo de elasticidad es de 1.893 MPa. Tiene una estabilidad térmica en cuanto al peso excelente hasta temperaturas de 350°C aproximadamente, la temperatura de transición vítrea está entre 100 y 110°C. La textura de la superficie del filamento consiste en pequeños nudos que son debidos al proceso de fabricación y a la forma del filamento.

La velocidad del cabezal de extrusión y la interacción de los factores Gap y velocidad del cabezal, son significantes determinantes para la calidad de la superficie y para la resistencia a la tensión de los modelos fabricados por el proceso FDM. Se determinó que el Gap no tiene gran influencia sobre las respuestas, rugosidad y resistencia a la tensión de los modelos fabricados por el proceso FDM. Una distancia de la deposición de material de 0,034 pulg y una velocidad de 0,140 mm/seg, produjeron el mejor acabado de la superficie y la mayor resistencia a la tensión obtenida en el modelo.

Se recomienda estudiar la cinética de la formación de la mesoestructura del material utilizado en el proceso de modelado por deposición fundida de materia (FDM). También, estudiar la utilización de materiales compuestos en el proceso.

IV. Bibliografía

- [1] Brent Strong, A. *Plastic, Materials and Processing*. Ed. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [2] Montgomery, C. Douglas. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica, México. 1991.
- [3] Montero Michael, Roundy Shad; Odell Dan; Ahn Hoon, Sung, and Wright K., Paul, *Material Characterization of Fused Deposition. Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments*, University of California, Berkeley.
- [4] http://www.everandever.com/dan/publications/sme_rp_2001.pdf
- [5] Richardson & Lokensgard, *Industria del plástico: plástico industrial*, Editorial Paraninfo, Madrid, España, 2000.
- [6] Suh P. Nam, *Axiomatic Design, Advances and Applications*, Oxford University Press, New York, 2001.