

# Comparación entre el corte con láser de CO<sub>2</sub> de PMMA virgen y PMMA reciclados

## Comparison between CO<sub>2</sub> laser cutting of virgin PMMA and recycling PMMA

**DIEGO REYES JIMÉNEZ<sup>1</sup> - DIEGO RAMOS ACOSTA<sup>2</sup>**

1. MSc. Eng. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. MSc. Eng. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

diego.reyes@escuelaing.edu.co - diego.ramos@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/12/2012 Aceptado: 01/02/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

El corte de acrílico con láser de CO<sub>2</sub> es un proceso muy utilizado dentro de la industria de la transformación de plástico debido a la excelente calidad del corte y a su precisión. En el mercado existen dos tipos de acrílico: el fabricado con metil-metacrilato virgen y el fabricado con metil-metacrilato reciclado. En este estudio se realizaron pruebas de corte láser de CO<sub>2</sub> de estos dos materiales, con distintos parámetros de velocidad y potencia, para observar cuánto se afectan estos materiales por el calor generado durante el proceso de corte y qué diferencias hay en la calidad de corte. Los resultados experimentales mostraron que el comportamiento durante el corte láser del acrílico virgen y el acrílico reciclado es muy distinto debido a las impurezas propias del acrílico reciclado.

**Palabras claves:** láser, acrílico, corte con láser, láser de CO<sub>2</sub>, aplicaciones industriales del láser.

### Abstract

Cutting acrylic with CO<sub>2</sub> laser is a widely used process in the industry of plastic transformation due to the excellent quality of the cut and its accuracy. In the plastic market there are two types of acrylic, one manufactured with virgin methyl-methacrylate and the other manufactured with recycled methyl-methacrylate. In this study, cutting tests of these two materials were made with a CO<sub>2</sub> laser using different parameters of speed and power in order to observe how both materials are affected by the heat generated during the cutting process and if there were any differences on the cutting quality. The experimental results showed a great difference in behavior between the virgin acrylic and recycled acrylic during laser cutting, due to the impurities in the recycled acrylic.

**Keywords:** laser, acrylic, laser cutting, CO<sub>2</sub> laser, industrial laser applications.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo se están haciendo grandes esfuerzos para desarrollar métodos eficientes de reciclaje y reutilización de los plásticos, debido al daño ambiental que éstos causan al ser desechados por métodos convencionales, así como por el incremento constante de los costos de fabricación de plásticos provenientes del petróleo. En el campo de los plásticos, el poli-metil-metacrilato (PMMA) o acrílico se ha convertido en un material muy deseado dentro de la industria de la transformación de plástico, gracias a sus propiedades físicas [1].

En razón de las características particulares de este material es posible, por un proceso de pirólisis, transformar el retal de PMMA en su monómero, el metil-metacrilato (MMA). Este monómero, a su vez, puede volverse a utilizar para fabricar PMMA, permitiendo así el proceso de reciclaje del PMMA [2].

La pirólisis del PMMA consiste en el calentamiento del PMMA a temperaturas por encima de los 500 K en un ambiente libre de oxígeno. Este calentamiento genera una reacción de despolimerización en la que hay una rotura de las cadenas poliméricas, la cual lleva a la producción del monómero MMA y otros subproductos. El proceso de pirolisis del PMMA puede llegar a tener eficiencias de recuperación del monómero de hasta el 97 %, haciendo de éste un proceso eficiente y económico [3,4].

Uno de los mayores retos dentro del proceso de reciclaje de cualquier material es tratar de que las propiedades físicas del material reciclado se mantengan dentro de un nivel que le permita un uso en la misma aplicación que se le había dado al material original, o en alguna otra aplicación que tenga valor.

En la actualidad, uno de los procesos de transformación del PMMA más utilizados en la industria es el corte con láser. El mecanismo por el cual un láser puede llegar a generar un corte en el PMMA se denomina corte por vaporización, el cual consiste en llevar el PMMA a su estado gaseoso por medio de un láser de alta potencia.

Una de las ventajas de este mecanismo de corte láser para el PMMA es que gracias a que los puntos de fusión y vaporización de este material son muy bajos, no se necesita mucha energía por parte del láser para realizar este cambio de estado [5,6].

El otro atributo del corte láser del PMMA por encima de un corte mecánico tradicional es que la calidad

de corte obtenido por el láser es superior. Los bordes de una pieza resultante de un corte de PMMA con láser son brillantes y pulidos, lo cual les da un alto valor estético a las piezas cortadas por este proceso.

Dichas características hacen que los láseres de CO<sub>2</sub> sean una herramienta ideal para el corte con láser de PMMA. Dependiendo de la potencia del láser, permite el corte de distintos espesores de lámina de PMMA. Igualmente, Zhou y Mahdavian han demostrado que láseres de CO<sub>2</sub> de 60 W de potencia son capaces de realizar cortes de hasta 1 cm de espesor [7].

El objetivo de esta investigación es comparar el corte láser de un PMMA fabricado con monómero virgen (PMMA virgen) y un PMMA fabricado con monómero reciclado (PMMA reciclado). Se desea observar qué diferencias hay en la calidad de corte y en la afectación térmica por este proceso en cada uno de tales materiales, lo que permitirá dar un concepto acerca de las posibilidades de uso del PMMA reciclado en las mismas aplicaciones que se le dan al PMMA virgen cortado con láser.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

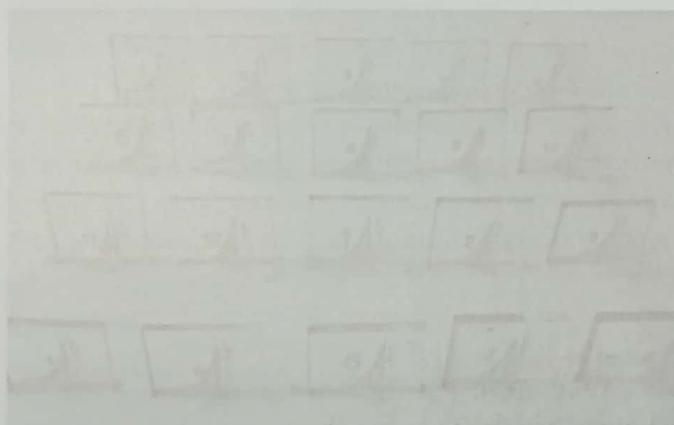
Para la realización del experimento se contó con un láser de vidrio sellado de 80 W, una mesa X-Y y un lente de longitud focal de 40 mm. Los parámetros variados fueron la potencia del láser y la velocidad de corte. Se dejó constante la posición focal del láser sobre la superficie del material y no se utilizó gas auxiliar de corte para evitar turbulencia dentro de la zona de corte que pudiera afectar los resultados [8].

En cuanto al material, puesto que comercialmente hay PMMA de muchos colores, se decidió usar PMMA transparente, ya que los rellenos que se utilizan para darle color al PMMA pueden afectar el corte láser del PMMA [9]. Se diseñó una probeta con forma cuadrada de 30 x 30 mm y de 3 mm de espesor, para permitir un mejor análisis de la zona de corte. Para la fabricación de las probetas se emplearon PMMA transparente fabricado con monómero virgen y PMMA transparente fabricado con monómero reciclado.

Para el desarrollo del experimento se programó cada probeta para ser cortada con distintas combinaciones de potencia del láser y de velocidad de corte (tabla 1, figura 1).

**Tabla 1**  
Variables experimentales y resultados para el corte de PMMA virgen y reciclado

Prueba	Velocidad (mm/s)	Potencia (W)	HAZ acrílico virgen (mm)	HAZ PMMA reciclado	Calidad de corte acrílico Virgen (mm)	Calidad de corte PMMA Reciclado	Espesor (mm)	Energía específica
1	3	80	0,5	0,65	Translúcido	Opaco	3	8,9
2	3	70	0,58	1,1	Translúcido	Opaco	3	7,8
3	3	60	0,6	1	Translúcido	Opaco	3	6,7
4	2	80	0,6	1	Translúcido	Opaco	3	13,3
5	2	70	0,9	1,4	Translúcido	Opaco	3	11,7
6	2	60	0,65	1	Translúcido	Opaco	3	10,0
7	1	80	0,7	1,5	Translúcido	Opaco	3	26,7
8	1	70	1,1	1,7	Translúcido	Opaco	3	23,3
9	1	60	0,86	1,6	Translúcido	Opaco	3	20,0
10	0,5	80	1,2	2,2	Translúcido	Quemado	3	53,3
11	0,5	70	1,4	2,4	Translúcido	Quemado	3	46,7
12	0,5	60	1,5	2,5	Translúcido	Quemado	3	40



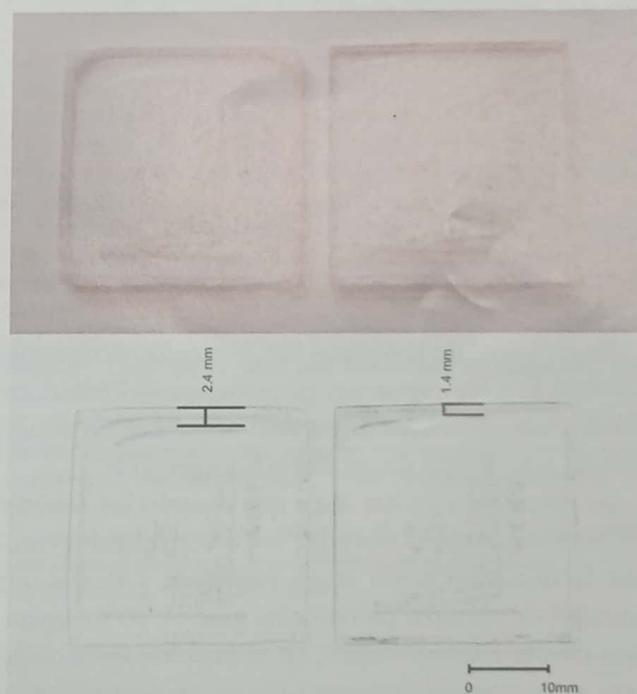
**Figura 1.** Diseño experimental de probetas.

Una vez cortados, se les hizo a las probetas un análisis visual de la calidad de corte y se tomaron fotos, las cuales se pasaron por un filtro que permitió observar y medir la extensión de la zona afectada por el calor en cada probeta (figura 2).

## RESULTADOS

En la tabla se muestran los resultados de la calidad de corte y la zona afectada por calor (HAZ) para cada potencia y velocidad de corte utilizado.

También se realizó el cálculo de la energía aportada por el láser al material, llamada energía específica  $E_E$ , la cual es función de la potencia del láser  $P$ , la velocidad de corte  $v$  y el espesor del material  $S$ .



**Figura 2.** Arriba: foto para prueba #11 de acrílico reciclado (izq.) y acrílico virgen (der.). Abajo: foto modificada con filtro de detección de bordes para medición del HAZ mediante análisis fotográfico para prueba #11.

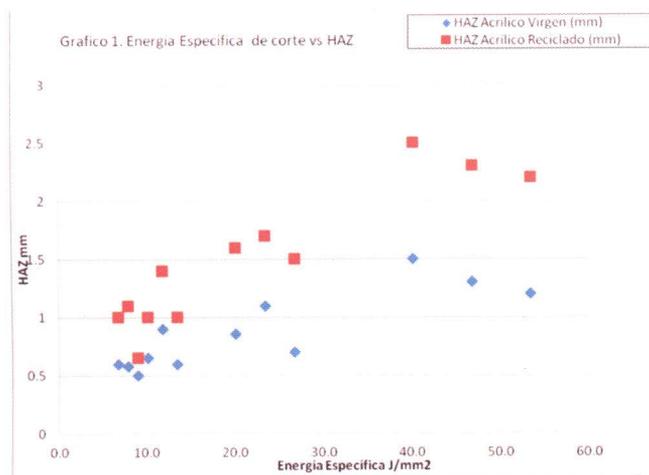
$$E_E = \frac{P}{Sv} \quad [10]$$

Este valor permite evaluar la cantidad de energía que está entrando a la zona de corte, independientemente de la potencia o velocidad a la cual se está realizando el proceso.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Afectación térmica del material

A continuación se puede apreciar cómo, para cualquier valor de energía específica, el PMMA virgen siempre tiene una afectación térmica menor que el PMMA reciclado. Este efecto se observa también en los resultados de la calidad de corte, donde se ve que para ningún valor de energía específica el PMMA virgen se degradó durante el corte, mientras que para valores altos de energía específica hubo una gran degradación en el PMMA reciclado y generó cortes de mala calidad.



Investigaciones anteriores han permitido determinar que debido a las impurezas presentes en el PMMA reciclado, hay una mayor dispersión de luz dentro de este PMMA que dentro de un PMMA virgen [11].

La dispersión de luz hace que cuando los fotones del láser impactan el material, éstos comiencen a cambiar de dirección y, por tanto, empiezan a afectar una cantidad de material mucho más grande, en comparación con el PMMA virgen, en el cual los fotones del láser se mantienen concentrados en un área pequeña, lo que genera una menor afectación térmica del material. Dicho fenómeno hace que durante el corte de un PMMA reciclado, éste se afecte más térmicamente en comparación con el PMMA virgen. Por tal razón, el acrílico reciclado es mucho más sensible a la cantidad de energía que se utilizará durante el proceso de corte. Se puede observar que para valores de energía específica altos, el acrílico reciclado produce cortes de mala calidad, por lo que este material siempre debe cortarse en combinaciones de potencia y velocidad que generen valores no mayores de 20 J/mm<sup>2</sup>.

### Calidad de corte

Según los resultados, se puede observar que el corte sobre el PMMA virgen genera un borde transparente y pulido, sin ningún tipo de rebaba para todas las pruebas, mientras que el corte sobre PMMA reciclado produce un borde opaco, sin importar los parámetros de velocidad y potencia del láser, pero el corte en general sigue siendo bueno, ya que no genera ningún tipo de rebaba y la superficie de corte no es muy rugosa.

La formación del corte transparente y pulido en el PMMA virgen ha sido investigado por Powell, el cual propone que el proceso por el cual se genera esta superficie transparente y pulida es gracias a la repolimerización rápida del PMMA fundido dentro de la zona de corte. Este material repolimerizado vuelve a tener las mismas propiedades de transparencia del material base. En caso de que el material se enfríe antes de haber terminado la repolimerización (esto puede ocurrir), el corte queda opaco. Este proceso se puede generar cuando se utiliza gas auxiliar de corte a una presión muy alta, el cual por convección enfría rápidamente la zona de corte y no da tiempo para que el material se repolimerice. Como la polimerización de las cadenas se interrumpe, quedan muchas cadenas cortas, las cuales generan un fenómeno de dispersión de luz y, por tanto, disminuyen la transparencia del material. A este efecto se le conoce como glaseado.

En el corte de PMMA virgen se pudo observar que en todas las probetas se presentó el proceso de repolimerización en la zona de corte, ya que todas las pruebas obtenidas generaron bordes pulidos y transparentes.

En el PMMA reciclado este proceso de repolimerización rápida no se presentó, ya que nunca se obtuvo un corte transparente. Las impurezas que tiene el PMMA reciclado son la principal razón por la cual sucede este fenómeno, ya que aunque dichas impurezas sólo llegan a ser del 5 %, se ha comprobado que éstas afectan las propiedades químicas del PMMA. Durante el proceso de polimerización estas impurezas actúan como inhibidores de la reacción, llegando a reducir la velocidad de la reacción en un 50 % [4, 16]. Durante el corte láser de PMMA reciclado, la presencia de las impurezas disminuye la velocidad de repolimerización, la cual no es lo suficientemente alta para terminar la reacción antes que el material se haya enfriado, por lo que se consigue una calidad de corte similar a la que se obtiene cuando se corta el PMMA con un flujo de gas alto.

## CONCLUSIONES

El proceso de corte láser de PMMA virgen permite generar cortes de buena calidad, los cuales no generan rebaba y producen un borde de corte transparente. El acrílico virgen tiene una afectación térmica muy baja durante el proceso de corte, motivo por el cual el rango de velocidad y potencia dentro del que se puede cortar PMMA virgen es muy amplio.

El proceso de corte de PMMA reciclado permite generar cortes de buena calidad, los cuales no generan rebaba y producen un borde de corte opaco. El PMMA reciclado tiene una afectación térmica alta debido a la alta dispersión de fotones que se genera dentro del material, por lo que el rango de velocidad y potencia dentro del cual se puede cortar PMMA reciclado es muy restringido.

Dependiendo de la aplicación final de la pieza cortada, el PMMA reciclado puede o no remplazar el acrílico virgen. La principal consideración que se debe tomar al respecto es si para la aplicación final se requiere que el borde del acrílico sea transparente. En caso de que esto no sea necesario, el acrílico reciclado puede ser una buena opción para remplazar el acrílico virgen.

## REFERENCIAS

1. Nunes dos Santos, W., Marcondes, J., Agnelli, A., Mummery, P. & Wallwork, A. (2007). Effect of recycling on the thermal properties of polymers. *Polymer Testing*, N.º 26, 216-221.
2. Kaminsky, W. & Eger, C. (2001). Pyrolysis of filled PMMA for monomer recovery. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, N.ºs 58-59, 781-787.
3. Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G., Aguado, R., Olazar, M. & Bilbao, J. (2010). Recycling poly-(methyl methacrylate) by pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering and Processing*, N.º 49, 1089-1094.
4. Achilias, D. (2007). Chemical recycling of poly (methyl methacrylate) by pyrolysis. Potential use of the liquid fraction as a rawmaterial for the reproduction of the polymer. *European Polymer Journal*, N.º 43, 2564-2575.
5. Powell, J. & Kaplan, A. (2004). Laser Cutting: From First Principles to the State of the Art. Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2004.
6. Havrilla, D. & Anthony, P. (1999). Process fundamentals of industrial laser welding and cutting. Rofin-Sinar, Inc.
7. Zhou, B.H. & Mahdavian, S.M. (2004). Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO<sub>2</sub>. *Journal of Materials Processing Technology*, N.º 146, 188-192.
8. Radovanovic, M. & Madic, M. (2011). Experimental Investigations of CO<sub>2</sub> Laser Cut Quality: A Review. *Nonconventional Technologies Review*, N.º 4.
9. Black, I. (1998). Laser cutting of Perspex. *Journal of Materials Science Letters*, N.º 17, 1531-1533.
10. Steen, W.M. & Mazumder, J. *Laser Cutting, Drilling and Piercing. Laser Material Processing*, 4th ed. ISBN 978-1-84996-061-8. Springer.
11. Popescua, V., Vasileb, C., Brebub, M., Popescua, G.L., Moldovanc, M. & Prejmereanc, C., Stanulet, L., Cojocaruf, I. (2009). The characterization of recycled PMMA. *Journal of Alloys and Compounds*, N.º 483, 432-436.
12. Davima, J.P., Barricasa, N., Conceicao, M. & Oliveira (2008). Some experimental studies on CO<sub>2</sub> laser cutting quality of polymeric materials. *Journal of Materials Processing Technology*, N.º 198, 99-104.
13. Noor, M.M., Kadirgama, K., Rahman, M.M., Zuki, N.M., Rejab, M.R.M. & Muhamad, K.F. (2009). Prediction Modelling of Surface Roughness for Laser Beam Cutting on Acrylic Sheets. *Advance Material Research*, ISSN 1022-6680.
14. Dahotre, N.B. & Harimkar, S.P. (s.f.). Laser Cutting of Various Materials. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. ISBN 978-0-387-72343-3.
15. Newborough, M., Highgate, D. & Matcham, J. (2003). Thermal depolymerisation of poly-methyl-methacrylate using mechanically fluidised beds. *Applied Thermal Engineering*, N.º 23, 721-731.
16. Davim, J.P., Oliveira, C., Barricasa, N. & Conceição, M. (2008). Evaluation of cutting quality of PMMA using CO<sub>2</sub> lasers. *Int J Adv Manuf Technol*, N.º 35, 875-879.