

Determination of contaminant ablation parameters on OHP sheets using an Nd:YAG laser and its application in laser cleaning

Nazario-Naveda, R.¹, Delfin-Narciso, D.², Agreda-Delgado, J.³, Aldama-Reyna, W.³,
Rojas-Flores, S.⁴, Santiago M. Benites¹

¹Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Perú, scored731@gmail.com, santiago.benites@autonoma.pe

²Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Perú.
daniel.delfin@upn.edu.pe

³Laboratorio de Óptica y Láseres, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jagredad@unitru.edu.pe, claveraldama@gmail.com

⁴Instituto de Investigación, Universidad César Vallejo, Perú, segundo.rojas.89@gmail.com

Abstract— In this work, the parameters for laser ablation cleaning of contaminants deposited by electrostatic attraction on cellulose acetate (OHP) sheet substrates and their analysis by measuring the transmittance of the irradiated surface as a function of the energy per pulse of an Nd:YAG laser were determined. The energy was controlled by the Q-switch delay time using wavelengths in the infrared region of 1064 nm and green visible light of 532 nm. A maximum of 10 laser pulses with a frequency of 1 Hz were used on the substrates with contaminants with 9 μm and 11 μm thickness. It was found that for damage-free laser cleaning of OHP film substrates it is convenient to use a wavelength of 1064 nm, with an energy per pulse of 33.36 mJ and using a maximum of 6 pulses. The advantages of pulsed laser radiation in the non-destructive cleaning of substrates with contaminants and the analysis of the substrate transmittance in the monitoring of laser-matter interaction processes were verified.

Keywords—laser, transmittance, ablation, energy.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.466>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Determinación de los parámetros de ablación de contaminantes sobre láminas OHP mediante un láser Nd:YAG y su aplicación en limpieza láser

Nazario-Naveda, R.¹, Delfin-Narciso, D.², Agreda-Delgado, J.³, Aldama-Reyna, W.³,
Rojas-Flores, S.⁴, Santiago M. Benites¹

¹Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Perú, scored731@gmail.com, santiago.benites@autonoma.pe

²Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas y Nuevas Tecnologías, Universidad Privada del Norte, Perú.

daniel.delfin@upn.edu.pe

³Laboratorio de Óptica y Láseres, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jagredad@unitru.edu.pe, claveraldama@gmail.com

⁴Instituto de Investigación, Universidad César Vallejo, Perú, segundo.rojas.89@gmail.com

Resumen— En este trabajo se determinaron los parámetros para la limpieza por ablación láser de contaminantes depositados mediante atracción electrostática sobre sustratos de láminas de acetato de celulosa (OHP) y su análisis mediante la medición de la transmitancia de la superficie irradiada en función de la energía por pulso de un láser Nd:YAG. La energía fue controlada mediante el tiempo de retraso del Q-switch usando longitudes de onda en la región infrarroja de 1064 nm y luz visible verde de 532 nm. Se utilizó un máximo de 10 pulsos láser con una frecuencia de 1 Hz sobre los sustratos con contaminantes con 9 μm y 11 μm de espesor. Se encontró que para la limpieza láser sin daños de sustratos de las láminas OHP, es conveniente usar una longitud de onda de 1064 nm, con una fluencia de 0.4 J/cm² y usando un máximo de 6 pulsos. Se verificaron las ventajas de la radiación láser pulsada en la limpieza no destructiva de sustratos con contaminantes y el análisis de la transmitancia del sustrato en el monitoreo de los procesos de interacción láser-materia.

Keywords—láser, transmitancia, ablación, energía.

Abstract— In this work, the parameters for laser ablation cleaning of contaminants deposited by electrostatic attraction on cellulose acetate (OHP) sheet substrates and their analysis by measuring the transmittance of the irradiated surface as a function of the energy per pulse of an Nd:YAG laser were determined. The energy was controlled by the Q-switch delay time using wavelengths in the infrared region of 1064 nm and green visible light of 532 nm. A maximum of 10 laser pulses with a frequency of 1 Hz were used on the substrates with contaminants with 9 μm and 11 μm thickness. It was found that for damage-free laser cleaning of OHP film substrates it is convenient to use a wavelength of 1064 nm, with an energy per pulse of 33.36 mJ and using a maximum of 6 pulses. The advantages of pulsed laser radiation in the non-destructive cleaning of substrates with contaminants and the analysis of the substrate transmittance in the monitoring of laser-matter interaction processes were verified.

Keywords—laser, transmittance, ablation, energy.

I. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía láser es de vital importancia en el desarrollo de diferentes áreas de la ciencia y tecnología, es difícil imaginar un dominio de la actividad humana sin el uso de láseres. Son aplicados en metrología, telecomunicaciones, industria, medicina, entretenimiento y conservación. Se puede hacer una distinción entre las aplicaciones que no envuelven cambios físicos importantes y permanentes en el material irradiado y las que producen modificaciones irreversibles [1,2]. Las propiedades características de la radiación láser como la emisión monocromática, la coherencia y direccionalidad han sido enfocados a aplicaciones de diagnóstico para investigar materiales utilizando emisiones láser de baja potencia no invasiva como la espectroscopía Raman [3,4]. Por otro lado, elevando la potencia láser y bajo determinados parámetros se adentra en las delicadas aplicaciones de limpieza mediante ablación láser [1,2].

La ablación láser es uno de los efectos irreversibles de la radiación que puede ser inducido en materiales ópticamente absorbentes. La limpieza láser es un caso particular de ablación donde un material específico llamado sustrato es descubierto a través de la remoción de capas indeseadas o contaminantes [2]. Los procesos de limpieza láser son muy explotados en diferentes campos, como por ejemplo en la eliminación de suciedad en muchos productos industriales [5], en la remoción de imperfecciones de la piel [6,7], restauración de obras históricas y otros [8-10]. A lo largo de muchos años, las técnicas de limpieza láser no se desarrollaron principalmente debido a los limitantes tecnológicos de las fuentes de láser pulsado disponibles en su momento, la falta de versatilidad de los sistemas de salida, la baja fiabilidad para las operaciones en tiempos largos y los altos costos. Posteriormente el nivel tecnológico de los dispositivos aumentó significativamente, desde entonces, se ha avanzado mediante extensas investigaciones que han cubierto el estudio de la ablación láser para la limpieza superficial, diagnósticos sensibles e identificación de materiales con técnicas no destructivas, lo que ha permitido la cuantificación de los contaminantes eliminados sin daños no deseados en el sustrato [2].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.466>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

La limpieza láser se ha aplicado a una amplia gama de materiales entre los que podemos citar: incrustaciones debidas a la polución de mármol usando radiación láser UV y visible con un flashlamp de xenón [11], manchas en hilos de plata en textiles con radiación IR, visible y UV de un láser Nd:YAG [12], textos antiguos usando un láser Nd:YAG con fluencias entre 0.3-0.9 J/cm² y con pulsos de 6 ns controlado por Q-switch [13,14] y otros objetos de valor histórico [15]. En la limpieza de esculturas usando láser pulsado Nd:YAG se verificó que con una mayor longitud de onda se logra una mayor profundidad de penetración de la radiación, por lo que se pueden obtener mejores resultados con la combinación de longitudes de onda de 1064 y 532 nm en la radiación [16]. Se usó un láser Nd:YAG en modo de operación Q-switch con pulsos de 6 ns y operado a longitudes de onda de 266, 355, 532 y 1064 nm para la limpieza de papel de pulpa de madera ensuciado artificialmente con polvo, encontrándose buenos resultados para muestras irradiadas a 532 nm y en la fluencia del láser por debajo del umbral de daño del sustrato [13]. También, en la limpieza de muestras de papiros se ha demostrado que el polvo y la suciedad se pueden limpiar con un láser pulsado de Nd:VAN con una longitud de onda de 1064 nm, sin embargo, para no producir daños en la superficie del sustrato se debe evitar altas densidades de energía o exposiciones a un alto número de repeticiones [17].

Por las ventajas que presenta: no contacto, acción localizada, precisión, control inmediato, mínimo daño ambiental, entre otras [18], es necesario conocer los parámetros adecuados del láser pulsado para su uso en limpieza de contaminantes. Es por ello que el objetivo de esta investigación fue determinar los parámetros de ablación para una eficaz limpieza láser de un sustrato con una película de contaminante. Con tal fin, se determinó experimentalmente los umbrales de ablación de sustrato y contaminante mediante el análisis de la transmitancia.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Preparación de las muestras

Como contaminantes se escogieron las partículas de polvo negro de tinta que fueron depositadas mediante métodos electrostáticos propios de una fotocopiadora sobre sustratos de láminas delgadas de acetato de celulosa conocidas como láminas OHP. Se eligió el uso de estas láminas como sustrato debido a su resistencia al calor, necesaria para superar las temperaturas que se alcanzan en el proceso de atracción electrostática; así como su alta transmitancia que facilita su evaluación después de haber sido irradiados [19]. Las láminas usadas fueron de la marca 3M con un espesor de 90 μm. En la Fig. 1 se presentan las muestras usadas, sustrato sin contaminante (arriba) y con contaminante (abajo).

El contaminante fue depositado sobre las láminas teniendo en cuenta la graduación de la tinta de la fotocopiadora. El espesor de tinta depositada sobre las películas de acetato sería el parámetro usado para clasificar las muestras. Una vez que la tinta fue depositada, las películas fueron cortadas en delgadas láminas de 0.9 cm de ancho y 21 cm de largo.



Fig. 1. Sustrato sin contaminante (arriba) y con contaminante (abajo).

B. Irradiación Láser

Las muestras antes mencionadas fueron expuestas a la radiación emitida por un láser pulsado de Nd:YAG Brilliant de la marca Quantel. Este láser tiene la capacidad de operar en cuatro longitudes de onda distintas (1064 nm, 532 nm, 355 nm y 266 nm) usando los armónicos correspondientes, con una potencia promedio máxima de 3.6 W y una energía por pulso máxima de 360 mJ para 1064 nm y una potencia promedio máxima de 1.8 W y una energía por pulso máxima de 180 mJ para 532 nm. Se trabajó con longitudes de onda de 1064 nm y 532 nm, que se encuentran en el rango infrarrojo y visible (verde) del espectro respectivamente. Se utilizó el modo de operación Q-switch, lo que permite que la energía por pulso del láser pueda ser variada mediante el tiempo de retraso teniendo pulsos cortos del orden de 4 a 6 ns [20, 21]. Una ventaja de usar el modo de operación Q-switch es que nos permite variar la energía por pulso mediante la variación del tiempo de retraso (delay) [22], este procedimiento fue usado satisfactoriamente por Langrock [23] y West [24].

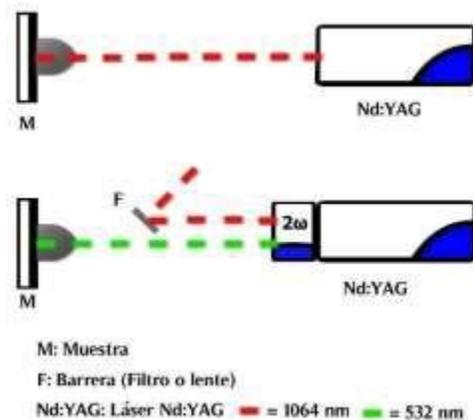


Fig. 2. Esquema experimental para la irradiación de las muestras.

La Fig. 2 muestra el esquema experimental usado para la irradiación de las muestras, a 1064 nm (arriba) y 532 nm

(abajo). Como se observa en la figura, el rayo láser fue disparado en un ángulo recto con respecto a la muestra. En la figura se muestra una barrera (F), que consistió de una placa negra, que fue usada para desviar la radiación infrarroja residual que acompaña en la salida a la radiación verde al usar el segundo armónico.

C. Determinación de la Transmitancia

Los efectos provocados por la radiación del láser pulsado fueron comprobados mediante la variación de la transmitancia de las muestras, la cual fue determinada mediante la medición de la potencia transmitida de una fuente de luz. Para eso, se escogió una fuente de luz con poca divergencia para evitar pérdidas por dispersión. La fuente de luz utilizada fue un láser CW de marca Radioshack con una longitud de onda de 650 ± 10 nm (luz roja) con una potencia máxima de 5 mW. Al usar este láser no se producen efectos en el material irradiado que puedan hacer cambiar su transmitancia debido a su baja potencia.

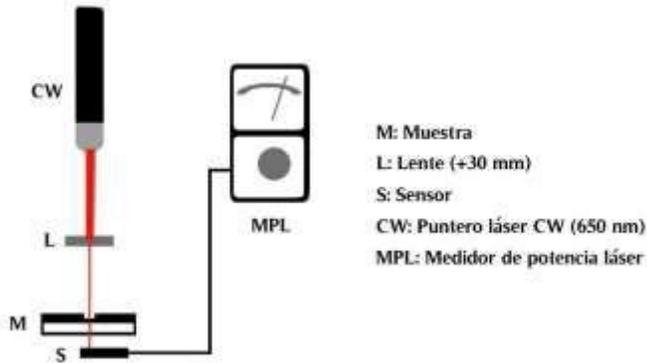


Fig. 3. Esquema experimental para la medición de la potencia transmitida.

Para medir la potencia transmitida se utilizó un Medidor de Potencia Láser de la marca Sanwa Electric, modelo LPM 5673. Este medidor puede ser calibrado para ser sensible a longitudes de onda del espectro visible desde 633 nm (luz roja) hasta infrarrojo en el rango de 750-820 nm. Además, el instrumento permite obtener potencias en las escalas de 3 mW, 1 mW y 0.3 mW con incertidumbres de ± 0.1 mW, ± 0.02 mW y ± 0.01 mW respectivamente. La Fig. 3 muestra el arreglo experimental usado, entre otros elementos se encuentran el puntero láser (CW), el medidor de potencia láser (MPL) y una lente (L) de +30 mm de distancia focal. El cálculo de la transmitancia con valores normalizados se hizo mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$T = \frac{P}{P_{sus}} \quad (1)$$

donde T es la transmitancia de la muestra irradiada que se obtiene como el cociente entre la potencia transmitida por la muestra irradiada (P) y la potencia transmitida por el sustrato sin contaminante y sin daños (P_{sus}). Durante el proceso de

medición de la potencia transmitida se tuvo en consideración que el haz de luz del puntero láser sea suficientemente fino de modo que su área de sección transversal sea menor que el área de la zona irradiada sobre la muestra, lo cual se consiguió con la ayuda de la lente convergente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La energía por pulso láser fue controlada mediante el tiempo de retraso del Q-switch (delay) usando longitudes de onda en la región infrarroja de 1064 nm y luz visible verde de 532 nm. La relación de energía por pulso y delay para cada longitud de onda usada se encuentra en la Fig 4.

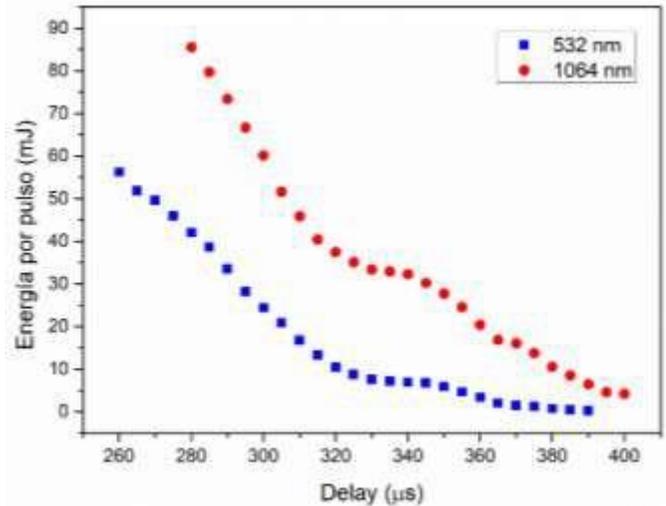


Fig. 4. Energía por pulso en función del tiempo de retraso del Q-switch (delay) del láser.

En una primera etapa, se irradiaron sustratos sin ninguna capa de tinta con el fin de hallar el umbral de ablación láser para los cuales se producen daños en el material. La transmitancia para un sustrato sin tinta y sin quemaduras debe tener un valor máximo de 1, disminuyendo cuando el sustrato tiene partículas contaminantes o está dañado. En la Fig. 5 se presenta una gráfica de la transmitancia en función de la energía por pulso para las muestras de sustrato sin tinta irradiadas con 10 pulsos a una razón de repetición de 1 Hz. En dicha gráfica se observa como los daños, representados por valores de $T < 1$, aumentan al aumentar la energía por pulso. Cuando se usa una longitud de onda de 1064 nm se observan daños en el sustrato con energías mayores a 33.36 mJ, este valor fue considerado el umbral de ablación del sustrato para esta longitud de onda. Por otro lado, se observa que cuando se usó una longitud de onda de 532 nm los daños en el sustrato se presentan a energías más bajas, esto puede deberse probablemente a que el material es más absorbente a esta longitud de onda. La transmitancia aumenta conforme disminuye la energía por pulso hasta llegar al valor de 1 en los 6.92 mJ. Este valor fue considerado como el umbral de ablación del sustrato para esta longitud de onda. Cabe señalar

que estos valores umbrales encontrados pueden cambiar con la frecuencia de repetición.

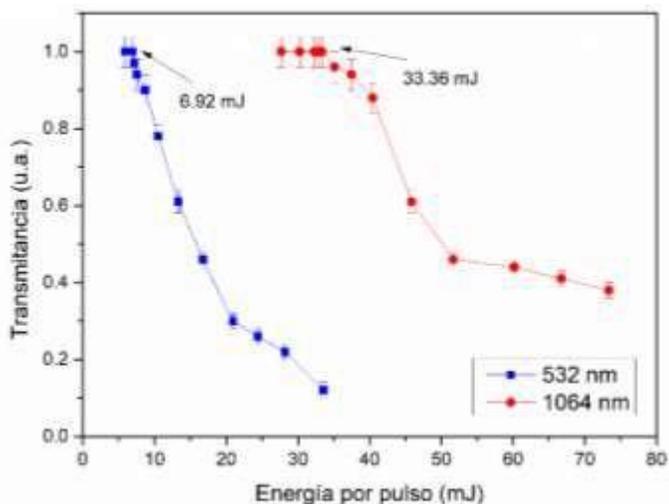


Fig. 5. Transmitancia de un sustrato sin contaminante. El sustrato fue irradiado con 10 pulsos a 1 Hz.

Se determinó la transmitancia de los sustratos con contaminantes antes de ser irradiados. Las muestras con mayor espesor de contaminante tienen una transmitancia menor debido a que el mayor número de partículas no permiten el paso de la luz como sí lo haría una capa con menor espesor. Para un espesor de contaminante de $9 \pm 0.2 \mu\text{m}$ se obtuvo una transmitancia de 0.16 ± 0.02 , mientras que para $11 \pm 0.2 \mu\text{m}$ se obtuvo 0.08 ± 0.01 . Estas transmitancias nos indican el punto de partida de la limpieza láser, conforme las partículas de contaminante son removidas la transmitancia aumentará a partir de estos valores.

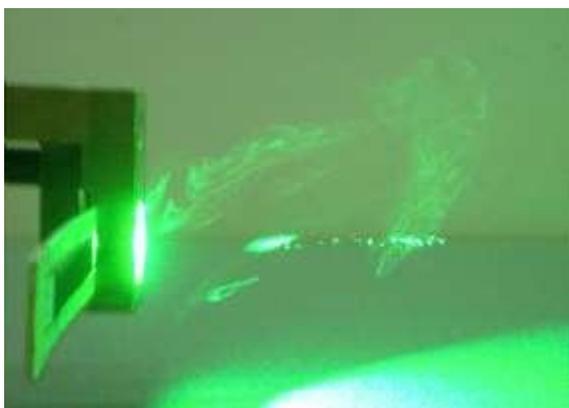


Fig. 6. Evaporación del contaminante como efecto de la interacción con la radiación láser

Conociendo los efectos en el sustrato y su umbral de ablación, se procedió a ver los efectos en los contaminantes. En la Fig. 6 se observa una fotografía del momento en que una muestra es irradiada por el láser Nd:YAG a una longitud de

onda de 532 nm, se observa una nube de polvo y plasma producto de la evaporación del material contaminante que consiste de conglomerados, moléculas, átomos, iones y electrones [2]. Como resultado de la evaporación de material y la generación del plasma, se forma un cráter en la superficie de la muestra, el cual denominaremos huella o spot.

Las regiones irradiadas fueron examinadas y comparadas con un área no irradiada del sustrato para determinar la eficiencia del proceso de limpieza. Un proceso de limpieza es efectivo si se retira la capa de suciedad completamente, las cuales se identificarán por una transmitancia $T = 1$. En la Fig. 7 se tienen gráficas de la transmitancia en función del número de pulsos, se comparan las curvas obtenidas a energías umbrales del sustrato, es decir 33.36 mJ para la longitud de onda de 1064 nm y 6.92 mJ para 532 nm. Se observa una limpieza más rápida en las muestras irradiadas en el rango infrarrojo, obteniendo una limpieza óptima con 5 o 6 disparos dependiendo del espesor de tinta, mientras que para 532 nm se llega a una buena limpieza con 10 disparos para la muestra con menor espesor y siendo necesario más de 10 disparos para el de mayor espesor. Es importante resaltar que el sustrato está formado por fibras de acetato de celulosa, las partículas del contaminante pudieron alojarse en sus poros, pudiendo complicar en muchos casos su extracción. La longitud de onda escogida afecta la eficiencia de la limpieza ya que determina la cantidad de energía absorbida por el contaminante y/o el sustrato [25]. El número de pulsos usados para irradiar el sustrato influye también en la eficiencia de la limpieza. Incrementando el número de disparos, es posible reducir la energía usada, teniendo aún una alta eficiencia de limpieza, mientras se minimiza el riesgo de daños en el sustrato por el uso de altos valores de energía [12].

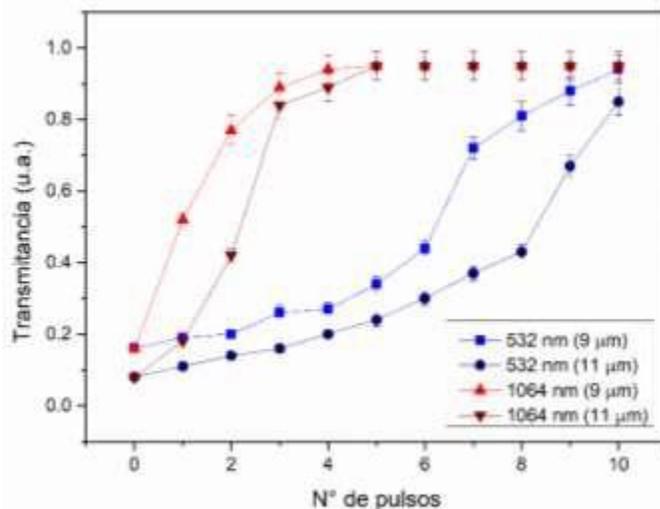


Fig. 7. Limpieza de contaminantes usando las energías umbrales del sustrato: 1064 nm (33.36 mJ) y 532 nm (6.92 mJ)

Las curvas obtenidas en un rango mayor de energías por pulso nos permitieron conocer la velocidad de remoción por pulso del contaminante. La tasa de ablación se determinó como

la variación de la transmitancia obtenida por cada pulso láser tomando en cuenta la pendiente de la región lineal hasta la saturación [20]. En la Fig. 8 se muestra la tasa de ablación de los contaminantes en función de la energía por pulso para cada longitud de onda usada, esta no depende significativamente del espesor de la muestra, comportamientos similares se encontraron en los trabajos de Shaheen y Stafe [26, 27]. Se observan tasas de ablación altas usando bajas energías por pulso con radiación de 532 nm comparado con 1064 nm; sin embargo, el umbral de ablación del sustrato representa un limitante. Esta se encuentra en los 6.92 mJ para los 532 nm, lo que significa que para no causar daños en el sustrato se aplicaría una tasa de ablación de alrededor de 8% por pulso, mientras que usando el mismo criterio para 1064 nm se tendría cerca del 27%, lo que implica un menor número de pulsos para lograr la limpieza total. Esto explicaría lo observado en la Fig. 7; en donde, usando una energía por pulso de 33.36 mJ, la limpieza se logra al menos con 6 pulsos, dependiendo siempre del espesor de la capa de contaminante. Esto confirma la ventaja de usar radiación a una longitud de onda de 1064 nm para una limpieza más eficaz del contaminante.

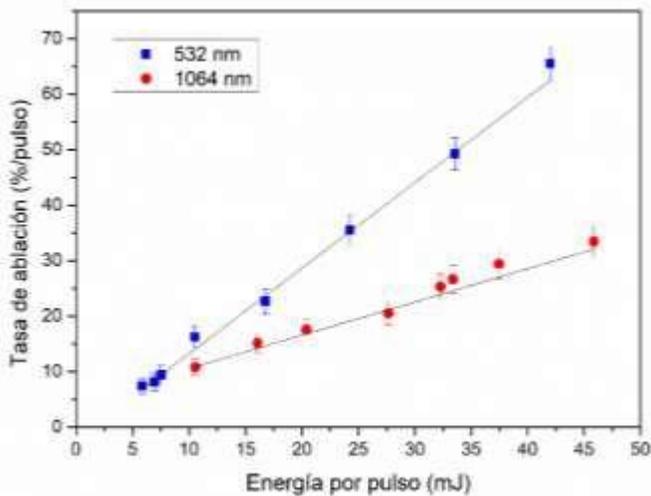


Fig. 8. Tasa de ablación láser sobre del contaminante. Las muestras fueron irradiadas con 10 pulsos a 1 Hz.

En la Fig. 9. se muestra una gráfica de las áreas del spot dejado tras la irradiación de las muestras en función de la energía por pulso del láser para las dos longitudes de ondas usadas. Se observa que áreas mayores a 2 mm² se encuentran usando energías por pulso encima de los 10 mJ para 1064 nm y 5 mJ para 532 nm. La radiación de 532 nm actúa sobre un área más grande, esto explica por qué se necesita menos energía por pulso, pero a su vez un mayor número de pulsos para obtener una limpieza efectiva de los contaminantes. Los tamaños de spot más grandes permiten una penetración más profunda y una limpieza más eficaz de los contaminantes [6]; sin embargo, no se debe dejar de lado los efectos en el sustrato. Conociendo las energías umbrales del sustrato de 33.36 mJ (1064 nm) y 6.92 mJ (532 nm) junto a lo mostrado en la Fig. 9, se encontraron las

fluencias umbrales en 0.4 J/cm² y 0.2 J/cm² respectivamente. Estas fluencias representan a la energía por pulso que actúa por unidad de superficie [2].

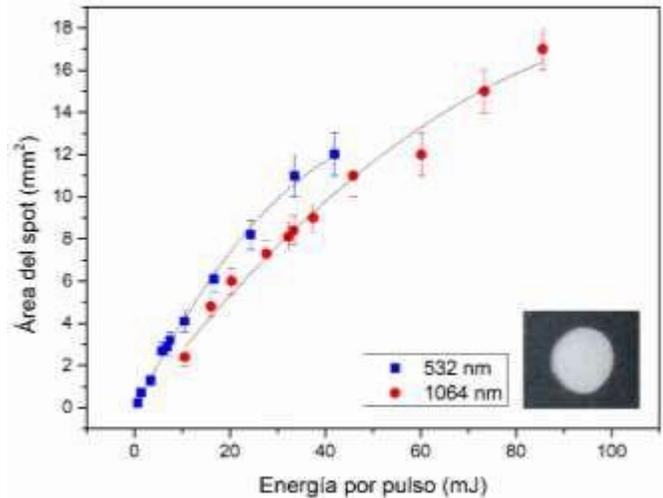


Fig. 9. Áreas de las secciones transversales de la luz láser en función de la energía por pulso.

IV. CONCLUSIONES

Se observó que la radiación a la longitud de onda de 532 nm causa más daños en las láminas de acetato, esto puede deberse a la mayor energía de los fotones y la alta absorbancia de las láminas a esta longitud de onda. Se encontró que para la limpieza láser sin daños de sustratos como las láminas OHP, de 90 μm de espesor, es conveniente usar una longitud de onda de 1064 nm con una fluencia de 0.4 J/cm² con número de pulsos que dependerán del espesor de la capa de contaminante. Se confirmó que la variación del tiempo de retraso del Q-switch es una manera efectiva de controlar la energía de un láser pulsado Nd:YAG. Se verificaron las ventajas de la radiación láser pulsada en la limpieza no destructiva de sustratos con contaminantes y que el análisis de la transmitancia del sustrato es de gran utilidad en el monitoreo de los procesos de interacción láser-materia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica de Perú - CONCYTEC (Contrato N° 07-2018-Fondecyt-BM-IADT-MU “Estudio de aplicación de técnicas láser para limpieza y restauración de bienes arqueológicos y el uso de difracción de rayos X para identificación de componentes cristalográficos que afectan las pinturas murales en la Costa Norte del Perú”).

REFERENCIAS

- [1] Bilmes, G. M., Orzi, D. J. O., Martínez, O. E., & Lencina, A. (2006). A real time method for surface cleanliness measurement. *Applied Physics B*, 82(4), 643-648.
- [2] Kane, D. M. (2006). *Laser cleaning II* (Vol. 4). World Scientific.

- [3] Hitz, C. B., Ewing, J. J., & Hecht, J. (2012). *Introduction to laser technology*. John Wiley & Sons.
- [4] Bertolotti, M. (2004). *The history of the laser*. CRC press.
- [5] Razab, M. K. A. A., Jaafar, M. S., Abdullah, N. H., Suhaimi, F. M., Mohamed, M., Adam, N., & Yusuf, N. A. A. N. (2018). A review of incorporating Nd: YAG laser cleaning principal in automotive industry. *Journal of radiation research and applied sciences*, 11(4), 393-402.
- [6] Cencic, B., Lukac, M., Marincek, M., & Vizintin, Z. (2010). High fluence, high beam quality Q-switched Nd: YAG laser with optoflex delivery system for treating benign pigmented lesions and tattoos. *JLAHA*, 2010, 9-18.
- [7] Tanzi, E. L., Lupton, J. R., & Alster, T. S. (2003). Lasers in dermatology: four decades of progress. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 49(1), 1-34.
- [8] Siano, S., Agresti, J., Cacciari, I., Ciofini, D., Mascacchi, M., Osticioli, I., & Mencaglia, A. A. (2012). Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd: YAG lasers. *Applied Physics A*, 106(2), 419-446.
- [9] Kim, J. E., Lee, J. M., Hyun, J. H., Jeong, J. H., & Kim, J. D. (2021). A Study on the Laser Removal of Epoxy Coatings on SS400 Surface by Beam Scanning Patterns. *Coatings*, 11(12), 1510.
- [10] Sanjeevan, P., & Klemm, A. (2005, November). A review of laser technique application in cleaning process of porous construction materials. In *PROBE conference*.
- [11] Leavengood, P., Twilley, J., & Asmus, J. F. (2000). Lichen removal from Chinese spirit path figures of marble. *Journal of Cultural Heritage*, 1, S71-S74.
- [12] Degrigny, C., Tanguy, E., Le Gall, R., Zafropoulos, V., & Marakis, G. (2003). Laser cleaning of tarnished silver and copper threads in museum textiles. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 152-156.
- [13] Kaminska, A., Sawczak, M., Komar, K., & Śliwiński, G. (2007). Application of the laser ablation for conservation of historical paper documents. *Applied Surface Science*, 253(19), 7860-7864.
- [14] Zekou, E., Tsilikas, I., Chatzitheodoridis, E., & Serafetinides, A. A. (2017, January). Laser paper cleaning: the method of cleaning historical books. In *19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications* (Vol. 10226, pp. 41-50). SPIE.
- [15] Al Sekhaneh, W., El Serogy, A., & El-Bakri, M. (2015). Yag-laser cleaning of archaeological materials in Jordanian museums. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 15(3), 157-164.
- [16] Pouli, P., Papakonstantinou, E., Frantzikinaki, K., Panou, A., Frantzi, G., Vasiladias, C., & Fotakis, C. (2016). The two-wavelength laser cleaning methodology: theoretical background and examples from its application on CH objects and monuments with emphasis to the Athens Acropolis sculptures. *Heritage Science*, 4(1), 1-11.
- [17] Elnaggar, A., Fitzsimons, P., Nevin, A., Watkins, K., & Strlič, M. (2015). Viability of laser cleaning of papyrus: conservation and scientific assessment. *Studies in conservation*, 60(sup1), S73-S81.
- [18] Watkins, K. G., Curran, C., & Lee, J. M. (2003). Two new mechanisms for laser cleaning using Nd: YAG sources. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 59-64.
- [19] Kim, K. B., Lee, J., & Kim, M. (2020). Optical and electrical properties of AZO thin films deposited on OHP films. *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(9), 28-34.
- [20] William, T. S. (2004). *Laser fundamentals*. Cambridge University Press.
- [21] Csele, M. (2004). *Fundamentals of light sources and lasers*, A Jhon Wiley and Sons. Inc., Publication. New Jersey, 360.
- [22] Sato, A., Okubo, S., Asai, K., Ishii, S., Mizutani, K., & Sugimoto, N. (2015). Stable dual-wavelength Q-switched Nd: YAG laser using a two-step energy extraction technique. *Applied Optics*, 54(10), 3032-3042.
- [23] Langrock, C., Hum, D. S., Diamanti, E., & Charbonneau-Lefort, M. (2002). Flash Lamp Pumped Quanta Ray Nd:YAG Laser Experiment. *Pulse*, 20(40), 60.
- [24] West, N. J., Jandrell, I. R., & Forbes, A. (2008, September). Remote triggering of high voltage systems by laser-induced plasmas. In *Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing IV* (Vol. 7070, pp. 158-167). SPIE.
- [25] Yap, S. S., Siew, W. O., Ladam, C., Reenaas, T. W., & Tou, T. Y. (2011). Effects of Laser Wavelength and Fluence in Pulsed Laser Deposition of Ge Films. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1328, No. 1, pp. 305-307). American Institute of Physics.
- [26] Shaheen, M. E., Gagnon, J. E., & Fryer, B. J. (2014). Femtosecond laser ablation behavior of gold, crystalline silicon, and fused silica: a comparative study. *Laser Physics*, 24(10), 106102.
- [27] Stafé, M., Vladioiu, I., & Popescu, I. M. (2008). Impact of the laser wavelength and fluence on the ablation rate of aluminium. *Central European Journal of Physics*, 6(2), 327-331.