



TRABAJO 97	
Área:	Materiales
Categoría:	Alumno
Regional:	Santa Fe

Evaluaciones preliminares del efecto de la radiación laser sobre la pasta de cemento

Diana GONZALEZ¹, Mateo GARCÍA¹, Micaela GOMEZ CORONEL²

1-Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda, Facultad Regional Santa Fe, UTN

2-Grupo de Investigación en Física Aplicada a la Ingeniería, Facultad Regional Paraná, UTN

E-mail de autores: gonzalezdianelag@gmail.com, mmateo725@gmail.com, mmgcoronel@gmail.com.

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección de la Dra. Anabela Guillarducci y el Dr. Fabio Vincitorio, en el marco de un proyecto interno.

Resumen

Durante el proceso de hidratación del cemento Portland, como resultado de las reacciones químicas producidas entre los componentes de silicato tricálcico y bicálcico con agua, se generan productos de hidratación que llenan gradualmente los espacios entre partículas para dar una matriz continua. Debido a que los productos de hidratación tienen solubilidades limitadas en agua resulta un material compuesto relativamente impermeable constituyendo la base de su durabilidad.

La incidencia de un haz sobre la superficie de materiales de base cementicia, capaz de elevar la temperatura entre los 1200 y 1500 °C, provoca una vitrificación de la superficie, que según autores consultados, permiten alcanzar mejoras en la higroscopicidad de estos materiales.

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación preliminar del efecto de la radiación de un láser de CO₂ sobre muestras de pasta de cemento.

Palabras Claves: Cemento; Vitrificación; Laser de CO₂, Absorción.

1. Introducción

Durante el proceso de hidratación del cemento Portland, como resultado de las reacciones químicas producidas entre los componentes de silicato tricálcico y bicálcico con agua, se generan productos de hidratación que llenan gradualmente los espacios entre partículas para dar una matriz continua. Debido a que los productos de hidratación tienen solubilidades limitadas en agua, resulta un material compuesto relativamente impermeable constituyendo la base de su durabilidad, Giovambattista (2011).

Dentro de las condiciones favorables para lograr una elevada generación de productos de hidratación que permitan llenar adecuadamente los poros, y por tanto tener una baja porosidad del material endurecido, se destacan una elevada proporción de óxidos en la composición química del cemento, una baja relación agua/cemento y correctas condiciones de curado.

El láser es un dispositivo que produce luz amplificada por emisión estimulada, lo que genera un haz de gran intensidad, direccionalidad y coherencia. Entre las posibles clasificaciones de los láseres, en función del medio activo, se distinguen entre láseres de estado sólido, láseres en estado líquido y por último láseres de gas, Arieli et al (2012).

En un láser de gas, el medio activo del láser es un gas a baja presión, como es el caso del láser de CO₂ (dióxido de carbono). La acción láser en una molécula de CO₂ fue descubierta por

Kumar Patel en 1964, Patel (1964). En su investigación, Patel transmitió un pulso de descarga eléctrica a través de CO₂ puro en un tubo láser, y obtuvo una pequeña salida láser. El CO₂ es el gas en el que se produce la acción láser pero se agregan otros gases en el tubo láser que aumenta la eficiencia total. El láser estándar de CO₂ incluye en el medio activo una mezcla de CO₂ con N₂ (dinitrógeno) y He (helio). La proporción óptima de estos tres gases en la mezcla depende del sistema láser y del mecanismo de excitación.

El láser de CO₂ ha sido considerado el láser industrial por excelencia. Con una longitud de onda de 10,6 μm y régimen de operación continua o pulsada y potencias de hasta 10 KW ha sido usado en una gran variedad de aplicaciones. Este tipo de láser ha evolucionado a sistemas de media y baja potencia de cavidad cerrada, lo que ha bajado notablemente los costos de fabricación, razón por la cual se ha incrementado su uso.

El rendimiento del láser de CO₂ es muy alto, pudiendo convertir hasta un 30% de energía eléctrica a óptica, en contraste con la mayoría de láseres, que tienen eficiencias menores.

Cuando un haz láser incide sobre una superficie, tiene lugar una transferencia de energía dentro de una región muy cercana a la superficie. Esta transferencia energética, involucra procesos de excitación y desexcitación a nivel electrónico de los átomos y/o moléculas del material, en un periodo de tiempo extremadamente corto. En esa región superficial se pueden alcanzar velocidades de calentamiento y enfriamiento extremas del orden de 10³ a 10¹⁰ K/s, y aun así, la energía total, típicamente entre 0.1 y 10 J/cm², es insuficiente para afectar, de manera significativa, la temperatura del resto del material. Esto permite procesar sólo regiones muy superficiales bajo condiciones extremas, con un efecto mínimo sobre las propiedades del resto de la pieza de trabajo, Majumdar y Manna (2003).

Dependiendo de las condiciones de irradiación y las características superficiales, ópticas y térmicas del material, en la zona sujeta a irradiación se producirán cambios de fase y/o estado, relacionados con procesos de calentamiento, fusión y/o evaporación, Restrepo Montoya (2005).

La incidencia de un haz sobre la superficie de materiales de base cementicia, capaz de elevar la temperatura entre los 1200 y 1500 °C, provoca una pérdida del agua retenida y una posterior fusión obteniendo como resultado la formación de material vítreo amorfo, conformado por derivados del calcio, silicio y aluminio, Lawrence et Li (1999). Es decir que, se logra una vitrificación de la superficie, que según autores consultados, permiten alcanzar mejoras en la higroscopicidad de estos materiales, Moreno et al (2010).

El cemento portland consta de cuatro componentes principales: el silicato tricálcico (C₃S), el silicato bicálcico (C₂S), el aluminato tricálcico (C₃A) y el ferroaluminato tetracálcico (C₄AF). Estos silicatos que se encuentran en el clinker no son compuestos puros, pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Cada tipo de cemento presenta una composición distinta lo que le da su comportamiento característico, Rahha et al (2012).

Los óxidos presentes en los cementos, en mayor o menor medida, son: CaO (óxido de calcio), SiO₂ (dióxido de silicio), Al₂O₃ (trióxido de dialuminio u alúmina), Fe₂O₃ (trióxido de dihierro), SO₃ (trióxido de azufre) y MgO (óxido de magnesio). Dentro de estos óxidos mencionados resulta interesante destacar SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ que son componentes químicos del vidrio.

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación preliminar del efecto de la radiación laser sobre muestras de pasta de cemento, con el objetivo de determinar si es posible detectar indicios de vitrificación superficial a partir de una evaluación visual de la superficie tratada. Concentrando el trabajo en el conocimiento del láser y la metodología, se busca alcanzar conclusiones positivas que sirvan como punto de partida para el desarrollo de un nuevo proyecto de investigación.

2. Metodología

Con el objetivo de evaluar en forma visual los efectos que se producen sobre la superficie de la pasta de cemento hidratada, al aplicar radiación de láser de CO₂, se llevaron a cabo los siguientes ítems.

2.1 Caracterización del material

Debido a las variaciones que presentan las distintas partidas de un mismo tipo de cemento, incluso para un mismo fabricante, y dado a que el fenómeno que se pretende inducir afecta la microestructura del material, se considera pertinente realizar una caracterización del cemento empleado para el presente trabajo.

La información obtenida en la caracterización del cemento es considerada como una variable más de la experiencia.

En la etapa de caracterización del material se registra el tipo de cemento indicado por el fabricante y la procedencia. Luego se realizan los siguientes ensayos:

- Determinación de la densidad según norma IRAM 1624:2005.
- Agua para consistencia normal según norma IRAM 1612:2006.
- Tiempo de inicio y fin de fraguado según norma IRAM 1619:2006.

2.2 Determinación de la capacidad de absorción

Con el fin de cuantificar en trabajos futuros el efecto de la radiación láser sobre la pasta de cemento y dado que se pretende definir un tratamiento que permita mejorar la higroscopicidad del material, se determina la capacidad de absorción de la pasta de cemento hidratada previo a su tratamiento superficial.

Para ello se moldearon probetas de pasta de cemento a una consistencia normal. Las muestras son moldeadas y ensayadas adaptando a pasta de cemento la metodología descrita en la Norma IRAM 1590:1993, norma que se emplea usualmente para determinar el coeficiente de absorción al evaluar la capacidad de absorción capilar de morteros cementicios.

2.3 Tratamiento superficial con láser de CO₂

En esta etapa se empleó un láser de CO₂ de cavidad cerrada, no polarizado de fuente modulada en amplitud. El mismo permite seleccionar la potencia de salida desde 3 W hasta 40 W como potencia máxima. El sistema de posicionamiento posee solamente dos grados de libertad siendo el ajuste del foco o eje z configurable en forma manual. El software de control permite programar velocidades de barrido desde 1 mm/s a 500 mm/s. En la figura 1 se muestran detalles del equipo utilizado.



Figura 1. Láser semi industrial de 40 W y detalle boquilla de salida. Fuente: Bucci CNC.

Cuando el haz láser incide sobre la superficie de una pieza de trabajo, parte de la radiación es reflejada y otra parte penetra en el material. Una vez que la energía ha sido absorbida por el material se produce un aumento de su temperatura, este aumento no se limita a las zonas donde incide el haz sino que se difunde hacia las zonas adyacentes. Con el objetivo de proteger la óptica de focalización se emplea como gas de trabajo aire comprimido mediante un sistema de compresión libre de aceites a una presión de 1,5 bar.

Haciendo uso del láser de CO₂ se efectuaron barridos en línea recta, en sentido horizontal, sobre la superficie de muestras de pasta de cemento, para obtener un área tratada de 1 cm x 1 cm. Dado que en esta instancia se busca acotar los rangos de velocidad y potencia de barrido que permitan obtener una superficie con acabado vitreo (ya que las posibilidades de combinación de estas variables son elevadas), se propone evaluar en el presente trabajo las siguientes combinaciones:

- Muestra 1: Velocidad de barrido: 1 (mm/s)
Potencias: 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36,40 (W)
- Muestra 2: Velocidad de barrido: 3 (mm/s)
Potencias: 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36,40 (W)
- Muestra 3: Velocidad de barrido: 5 (mm/s)
Potencias: 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36,40 (W)

En total se realizan 27 barridos con distintas combinaciones.

Una vez realizado el barrido se evalúa visualmente el acabado superficial alcanzado, para ello se hace uso de una lupa con un rango de aumento de 60x.

3. Resultados y Discusión

3.1 Caracterización del material

El cemento empleado corresponde a un cemento Portland Normal (CPN 40). A partir de los ensayos realizados al mismo es posible determinar las características que se indican en la Tabla I.

Tabla I. Características del cemento empleado.

Ensayo	Norma IRAM	Parámetro	Unidad
Densidad	1624	3,12	[g/cm ³]
Pasta Consistencia Normal	1612	28	% de agua de mezclado
Tiempo de Fragüe	1619	180	Minutos
		345	Minutos

Estos primeros ensayos permiten comenzar a definir una variable importante de la investigación en la que se enmarca el presente trabajo. Sin embargo para tener una caracterización completa del material es necesario determinar otras características del mismo, algunas consideradas críticas para el estudio del tratamiento superficial que se pretende lograr, tal como la composición química.

3.2 Determinación de la capacidad de absorción

Se determina la absorción del material (sin tratamiento superficial), ya que a partir de dicho parámetro se pretende cuantificar o evaluar los cambios en la estructura de poros, debidos al tratamiento superficial con láser de CO₂.

En la Figura 2 se muestra la variación de la absorción de H₂O por unidad de la pasta de cemento en función del tiempo, como se indica el ensayo se realiza por triplicado.

A partir de este ensayo se determina que la pasta de cemento posee una absorción máxima promedio de 0,39 kg/m².

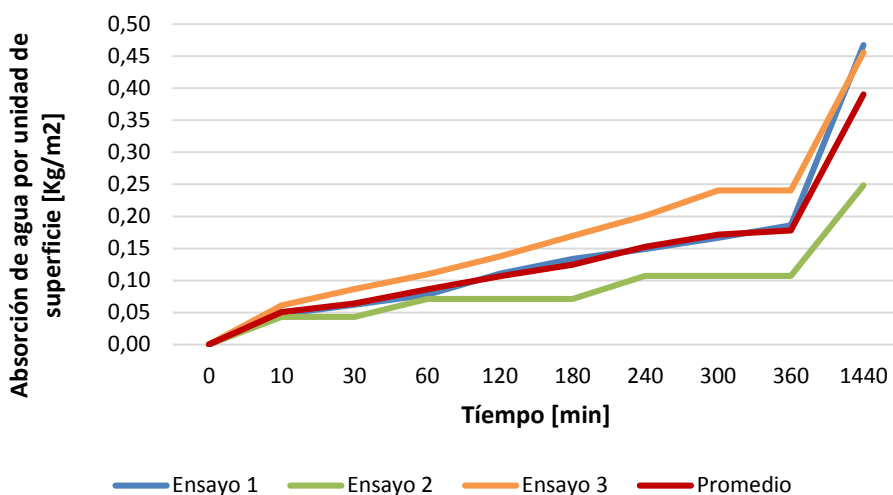


Figura 2. Variación de la absorción de agua por unidad de superficie en función del tiempo.

Dada la baja porosidad que presenta la pasta de cemento hidratada, la absorción capilar de H₂O es baja si se compara con morteros cementicios que presentan una absorción capilar del orden de 2 a 3 kg/m².

3.3 Tratamiento superficial con láser de CO₂

A partir de los distintos barridos superficiales fue posible obtener los acabados superficiales que se observan en Figura 3, Figura 4 y Figura 5.

En la Figura 3 se muestran los acabados obtenidos al realizar barridos con el láser a una velocidad de 1 mm/s, variando las potencias de trabajo, (en total se realizaron 9 evaluaciones). Dado a que la velocidad de barrido es baja se produce una remoción de unos pocos mm del material superficial, sin indicios de vitrificación. A medida que la potencia se incrementa se incrementa el espesor de material removido y se logra un acabado superficial menos rugoso. Este efecto se denomina comúnmente como ablación láser y ocurre cuando la energía del haz láser absorbida por

el sustrato es lo suficientemente intensa como para que se produzca la evaporación y expulsión del material.

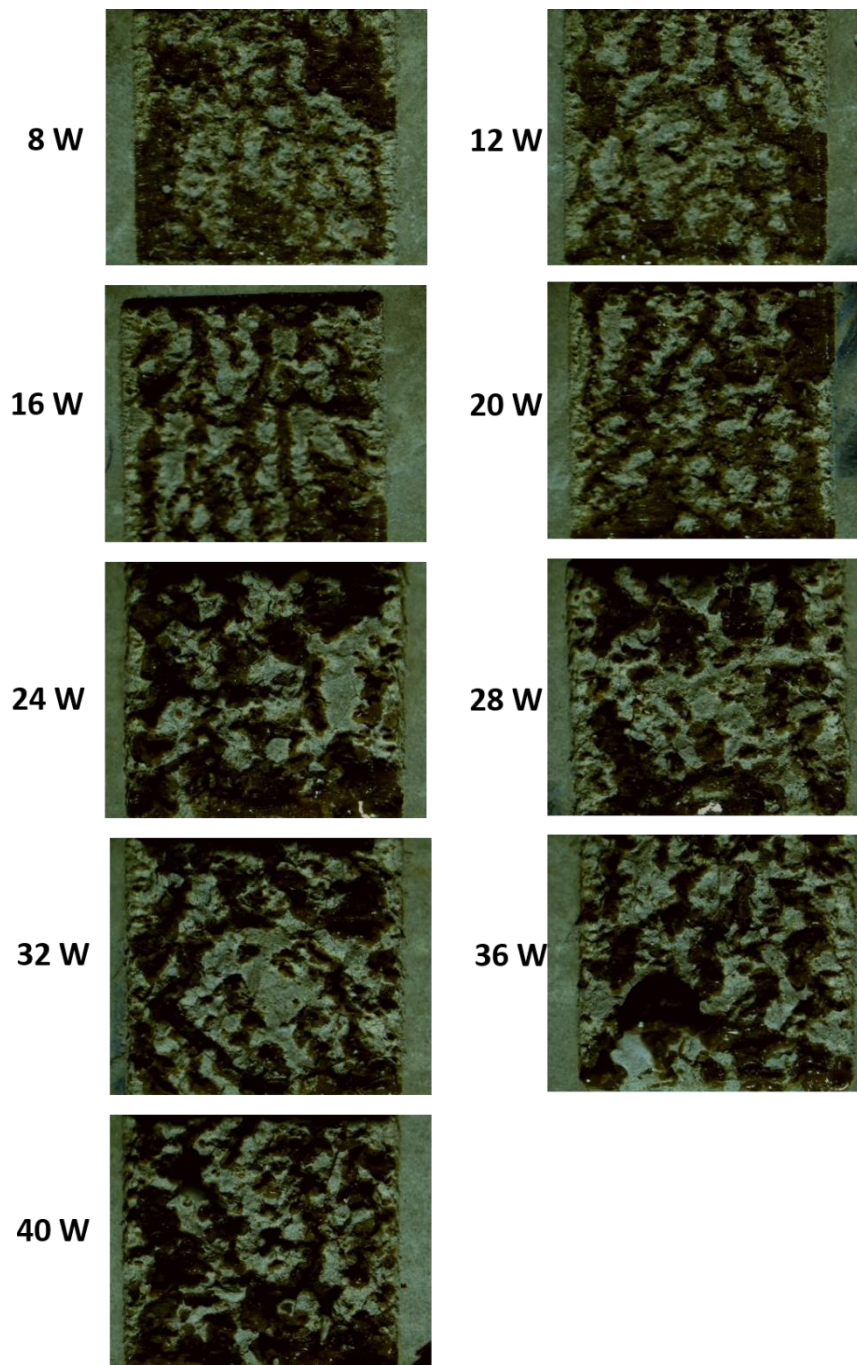


Figura 3. Muestra 1: superficies barridas a una velocidad de 1 mm/s, variando la potencia.

En la Figura 4 se muestran los acabados obtenidos al realizar barridos con el láser a una velocidad de 3 mm/s, variando las potencias de trabajo, (en total se realizaron 9 evaluaciones). En estas pruebas al realizar un barrido más rápido la ablación laser es mínima y se detectan zonas muy pequeñas con indicios de aparente vitrificación. Es decir que, el efecto del láser sobre la superficie es menos agresiva que las pruebas realizadas a una velocidad menor, presentando un pequeño indicio de vitrificación en zonas muy pequeñas.

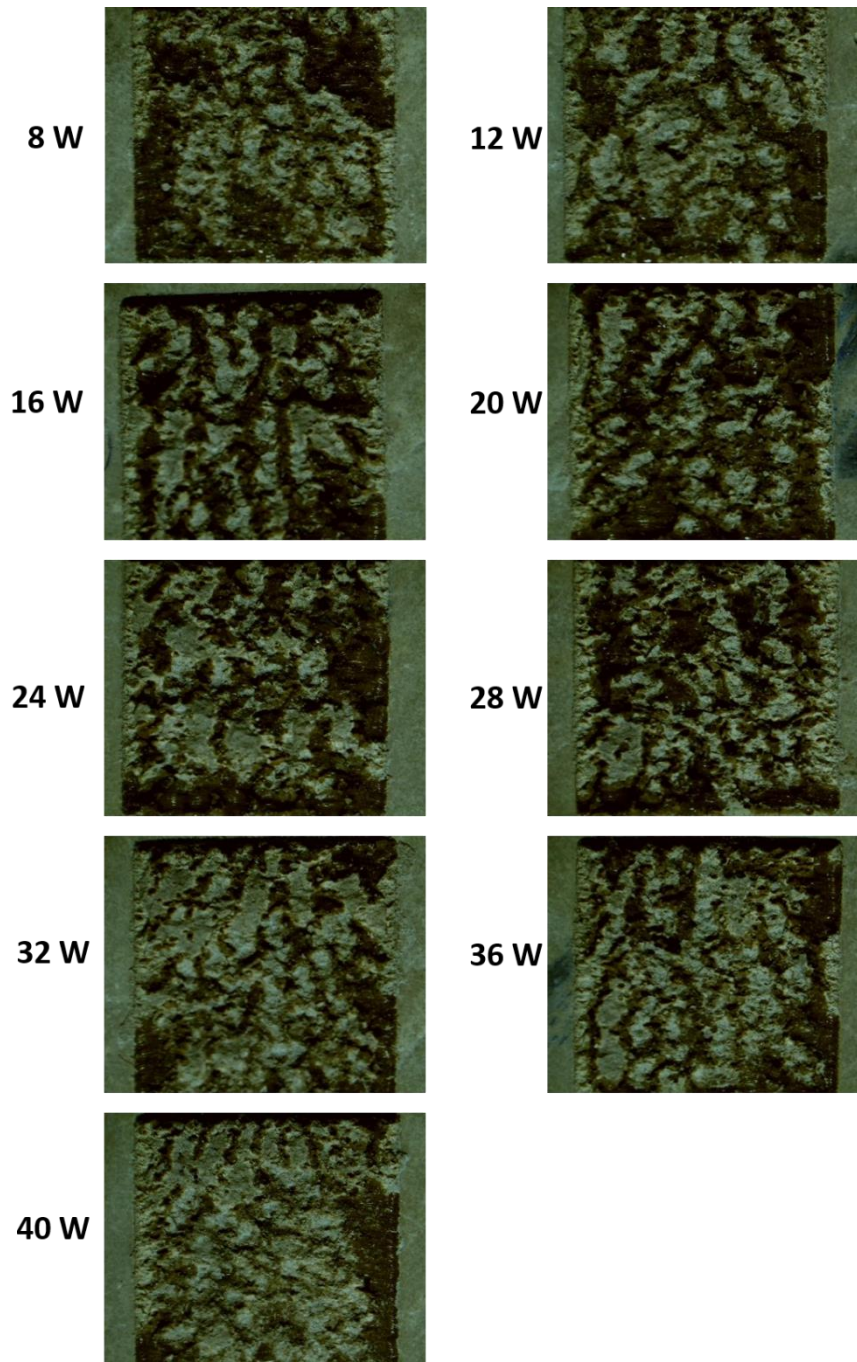


Figura 4. Muestra 2: superficies barridas a una velocidad de 3 mm/s, variando la potencia.

En la Figura 5 se muestran los acabados obtenidos al realizar barridos con el láser de CO₂ a una velocidad de 5 mm/s, variando las potencias de trabajo. En estas pruebas al realizar un barrido más rápido la agresividad sobre el material es menor, sin embargo, la rugosidad superficial del material se incrementa respecto del acabado sin tratamiento. A su vez, para esta velocidad de barrido es posible percibir mayores zonas con indicios de vitrificación, aunque esta no llega a ser completa. La muestra tratada con una potencia de 40 W es la que menor superficie presenta con acabado vítreo. Para el resto de las potencias evaluadas los resultados son semejantes, con la diferencia de que a medida que se incrementa la potencia la rugosidad del acabado superficial también se incrementa.

Otro aspecto a mencionar es que el acabado vítreo resultante es frágil, pudiéndose remover manualmente con la ayuda de algún dispositivo mecánico.

Si bien para la velocidad de barrido de 5 mm/s se comienza a percibir mayores zonas con indicios de vitrificación, el acabado logrado no es el que se persigue, por lo que es necesario continuar evaluando menores velocidades de trabajo que permitan lograr un vitrificado superficial más completo sin incrementar la rugosidad.

Lo que se busca en estas evaluaciones preliminares es definir un entorno de rango de potencia y velocidad de barrido para reducir el número de variables y poder realizar determinaciones y evaluaciones más rigurosas que permitan cuantificar los efectos de la radiación laser sobre materiales de base cementicia.

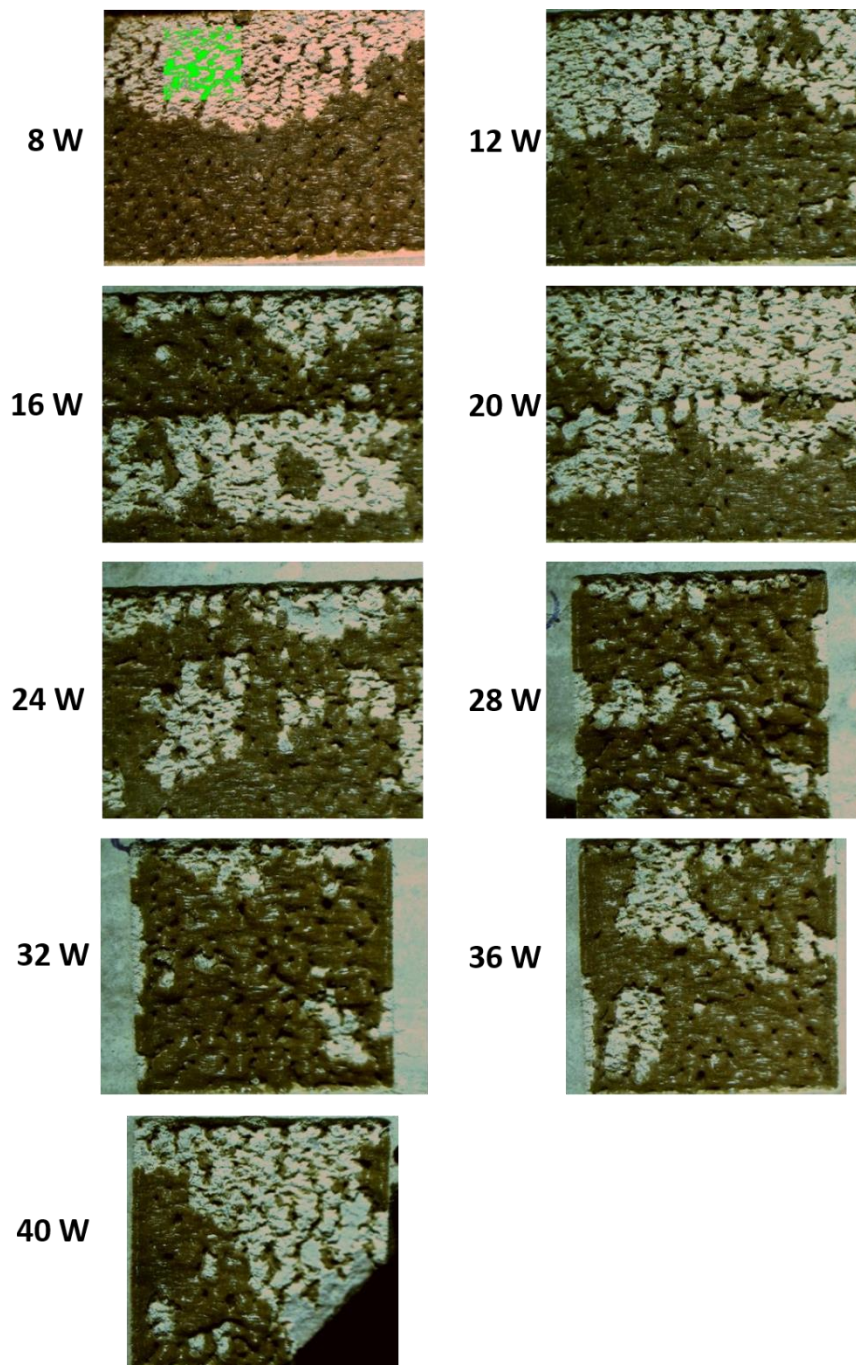


Figura 5. Muestra 3: superficies barridas a una velocidad de 5 mm/s, variando la potencia.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentaron los primeros resultados de la evaluación del efecto de la radiación laser sobre muestras de pasta de cemento. A partir de esta experiencia inicial es posible concluir que:

- El cemento Portland normal (CPN 40) empleado para el presente trabajo presenta una densidad de $3,12 \text{ g/cm}^3$, una demanda de agua del 28 % para alcanzar una pasta de cemento de consistencia normal, el inicio de fraguado a los 180 min desde que el cemento entra en contacto con el agua y el fin de fragua a los 345 min desde que el cemento entra en contacto con el agua. Si bien estas variables permiten comenzar a caracterizar el material de trabajo, es necesario realizar otras determinaciones, algunas consideradas críticas para el estudio del tratamiento superficial que se pretende lograr, tal como la composición química.
- La capacidad máxima de absorción de las muestras de pasta de cemento de consistencia normal, es de $0,39 \text{ kg/m}^2$.
- Todas las muestras tratadas superficialmente con el láser de CO_2 en el presente trabajo presentan un incremento de la rugosidad superficial respecto del material sin tratamiento laser.
- Las muestras que fueron sometidas a barridos laser a una velocidad de 1 mm/s presentan ablación laser, es decir que, se produce la evaporación y expulsión del material, alcanzando mayores espesores removidos a mayor potencia de trabajo.
- A partir de realizar barridos a velocidades mayores a 1 mm/s es posible comenzar a detectar indicios de vitrificación, sin embargo, el acabado logrado no es el que se persigue, por lo que es necesario continuar evaluando menores velocidades de trabajo que permitan lograr un aparente vitrificado superficial más completo sin incrementar la rugosidad

Dadas a las conclusiones arribadas se propone a futuro considerar los siguientes aspectos:

- Debido a la baja porosidad que presentan las muestras de pasta de cemento se propone trabajar sobre muestras de mortero, ya que se considera que el tratamiento superficial que se pretende desarrollar significará una mejora sustancial para este último material. Es por eso que se propone, en función de lo comentado anteriormente, que en futuros trabajos el objeto de estudio sean muestras de mortero, debiendo evaluar la incidencia de la presencia de arena en el proceso de vitrificación.

Bibliografía

- A. Giovambattista, "Materiales", in Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005, INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), Ed. Buenos Aires, Argentina: BRAPACK, 2011.
- Arieli, R; A. Requena, C. Cruz; A. Bastida; J. Zúñiga. (2012). La Aventura del láser. (en línea) Universidad de Murcia. España. Disponible en web <<http://www.um.es/LEQ/láser/index.htm>>Consultado 5/9/2019.
- Patel, C.K. (1964). Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO_2 . Physical Review. 136(N ó 5A).p p.A1187–A1193.
- J. D. Majumdar y I. Manna (2003). "Laser processing materials", Sadhana 28 (3-4), 495-562.

- J. W. restrepo Montoya. (2005). Marcado y esmaltado de materiales cerámicos con láser. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. Departamento de Física Aplicada y Óptica.
- Rahhal, V., Eperjesi, L. (2012). Capítulo 3. En: Ese material llamado Hormigón. Ciudad: Buenos Aires. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- J. Lawrence, L. Li. (1999). Surface glazing of concrete using a 2.5 kW high power diode laser and the effects of large beam geometry. Optics & Laser Technology 31, 583±591.
- M.R Moreno Virgen, J.J. Soto Bernal, J.A. Ortiz Lozano, C. Frausto Reyes, A. Bonilla Petriciolet, R. González Mota, I. Rosales Candelas, J. Pineda Piñón, Laser Radiation CO2 Effects in Cement Paste at Different Hydration Stages after Preparation, Ingeniería, Investigación y Tecnología, México, 2010.