



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

TESIS

**INFLUENCIA DE LA RIADIACIÓN LÁSER CO₂ EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DEL
CONCRETO HIDRÁULICO.**

PRESENTA

Ing. José de Jesús Velasco González

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA
CIVIL
ÁREA ESTRUCTURAS**

TUTOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

COTUTOR

Dr. Juan José Soto Bernal

Aguascalientes, Ags. 27 de mayo del 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

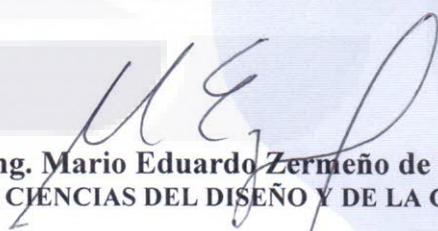
OFICIO No. CCDC-D-151-2016
ASUNTO: Conclusión de Tesis

DRA. GUADALUPE RUIZ CUELLAR
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE.

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: **“Influencia de la radiación láser CO2 en las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto hidráulico”**. Presentado por el sustentante: **ING. JOSÉ DE JESÚS VELASCO** con ID 39426 egresado de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el **voto aprobatorio** correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”
Aguascalientes, Ags., a 24 de mayo de 2016


Dr. en Ing. Mario Eduardo Zermeno de León
DECANO DEL C. DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Dr. José Ángel Ortiz Lozano – Tutor de Tesis.
c.c.p.- Ing. José de Jesús Velasco – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p.- Archivo

MEZL/rbv

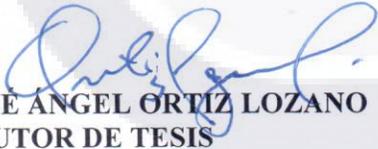
Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

DR. EN ING. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente, como Tutor designado del estudiante **ING. JOSÉ DE JESÚS VELASCO GONZÁLEZ** con ID 39426, quien realizó la tesis titulada: **“Influencia de la radiación láser CO2 en las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto hidráulico”** y con fundamento en el Art. 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO** para que él pueda proceder a imprimirla y así continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su amable consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”
Aguascalientes, Ags., a 17 de mayo de 2016


DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO
TUTOR DE TESIS


DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL
MIEMBRO COMITÉ TUTORAL

c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC
c.c.p.- Ing. José de Jesús Velasco – Alumno
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil
c.c.p.- Dr. José Ángel Ortiz Lozano – Tutor de Tesis
c.c.p.- Archivo
JPM/rbv

V.B.


AGRADECIMIENTOS

A Dios, que tu amor y tu bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda, y cuando caigo y me pones a prueba, aprendo de mis errores y me doy cuenta que todo lo que pones frente a mí es para ser cada día un mejor ser humano.

A mis padres, Alicia González Rodríguez y Gerardo Velasco Martínez, por su apoyo incondicional para lograr mis objetivos y por ser un gran ejemplo de vida que siempre me ha motivado a superarme profesionalmente y también como persona.

A mis hermanos que han sido un ejemplo para mí, aunque en la mayoría de las veces parece que estuviéramos en una batalla, hay momentos en los que la guerra cesa y juntos nos apoyamos para lograr nuestros objetivos. Gracias por no solo ayudarme a cumplir este sueño y alcanzar esta meta, sino por los bellos momentos que me han regalado a lo largo de toda mi vida.

A mi tutor, mi “Sensei” el Dr. José Ángel Ortiz Lozano, que me apoyó en todo momento y me motivó a realizar la estancia en Barcelona, una experiencia que nutrió muchos ámbitos de mi vida. Gracias por su paciencia, por su dedicación y por su transmisión de conocimiento, que han sido fundamentales para desarrollar en mí, un gran interés por la investigación.

A mi co-tutor el Dr. Juan José Soto Bernal, quien me guio con paciencia en temas nuevos para mí. Por el gran interés que mostró al surgir complicaciones con las pruebas, y con su tutoría obtener buenos resultados. Gracias por ese gran apoyo al facilitarnos el laboratorio de optoelectrónica en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

Al Dr. Antonio Aguado de Cea, por abrirme las puertas de la Universidad Politécnica de Cataluña y permitirme colaborar en una investigación durante una estancia corta en Barcelona, España.

A la empresa CEMEX S.A. de C.V., por proporcionarnos aditivo auto-curante “Hidratium” del cual cuenta con la patente, para la realización de las muestras de concreto hidráulico.

Al Ing. Héctor Asael de León Martínez, que me apoyó en todo momento durante la experimentación.

Al Posgrado de la maestría en Ingeniería Civil de la UAA.

A CONACYT, por su apoyo económico durante el transcurso de la maestría y poder solventar los gastos de la campaña experimental.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos.....	15
1.4 Organización del documento.....	16
1.5 Metodología experimental.....	17
1.5.1 Materiales.....	17
1.5.1.1 Cemento.....	17
1.5.1.2 Grava.....	17
1.5.1.3 Arena.....	18
1.5.2 Diseño de mezcla de concreto hidráulico.....	18
1.5.2.1 Aditivos.....	18
1.5.3 Fabricación de las muestras de concreto hidráulico y condiciones ambientales.....	19
1.5.4 Generalidades y potencias de radiación con láser.....	19
1.5.5 Ensayos de caracterización de las muestras de concreto hidráulico en estado endurecido.....	20
1.5.5.1 Determinación de la resistencia a la compresión de las muestras de concreto hidráulico.....	20
1.5.5.2 Espectroscopia Raman.....	21



CAPÍTULO II ARTÍCULO	22
2. ARTÍCULO “INFLUENCIA DE LA RIADIACIÓN LÁSER CO₂ EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DEL CONCRETO HIDRÁULICO”	23
2.1 Resumen	23
2.2 Introducción	24
2.3 Metodología experimental	25
2.3.1 Materiales utilizados.....	25
2.3.1.1 Cemento.....	25
2.3.1.2 Grava.....	26
2.3.1.3 Arena.....	26
2.3.2 Diseño de mezcla de concreto hidráulico.....	27
2.3.2.1 Aditivos.....	27
2.3.3 Fabricación de las muestras de concreto hidráulico y condiciones ambientales.....	28
2.3.4 Generalidades y potencias de radiación con láser.....	28
2.3.5 Ensayos de caracterización de las muestras de concreto hidráulico en estado endurecido.....	31
2.3.5.1 Determinación de la resistencia a la compresión de las muestras de concreto hidráulico.....	31
2.3.5.2 Espectroscopia Raman.....	31
2.4 Resultados	32
2.4.1 Resultados de resistencia a la compresión de las muestras de concreto hidráulico.....	32
2.4.2 Resultados de la espectroscopia Raman de las muestras de concreto hidráulico.....	34
2.4.3 Resultados de la temperatura al término de la radiación.....	37
2.5 Discusión	40
2.6 Conclusiones	42
2.7 Agradecimientos	43



CAPÍTULO III ARTICLE	44
3. ARTÍCULO “EFFECT OF CO₂ LASER RADIATION ON THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF HYDRAULIC CONCRETE”	45
3.1 Abstract	45
3.2 Introduction	46
3.3 Experimental methodology	47
3.3.1 Materials used.....	47
3.3.1.1 Cement.....	47
3.3.1.2 Gravel.....	48
3.3.1.3 Sand.....	48
3.3.2 Hydraulic concrete mix design.....	49
3.3.2.1 Admixtures.....	49
3.3.3 Manufacturing of the concrete samples and environmental conditions.....	50
3.3.4 Overview and power of laser radiation.....	50
3.3.5 Characterization test of hardened hydraulic concrete samples.....	53
3.3.5.1 Establishment of hydraulic concrete samples compressive strength.....	53
3.3.5.2 Raman spectrosopy.....	54
3.4 Results	54
3.4.1 Compressive strength results of hydraulic concrete samples.....	54
3.4.2 Results of the Raman spectroscopy of the hydraulic concrete samples.....	56
3.4.3 Results of temperature after radiation.....	59
3.5 Discussion	62
3.6 Conclusions	64
3.7 Acknowledgement	65



CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	66
4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	67
4.1 Conclusiones generales.....	67
4.2 Conclusiones particulares.....	68
4.3 Perspectivas.....	70
REFERENCIAS.....	71
ANEXOS	
ANEXO A	
ANEXO B	





LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del cemento utilizado (Soto Bernal et al., 2015).

Tabla 2. Tabla de potencias con la cual se calibró la experimentación.

Tabla 3. Tabla para control de elaboración de muestras y resultados.

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Fisuras en superficie inferior de cilindro de concreto hidráulico irradiado con potencia de 6.5 Watts.

Figura 2. Fisuras en superficie superior de cilindro de concreto hidráulico irradiado con potencia de 6.5 Watts.

Figura 3. Superficie superior de cilindro de concreto hidráulico sin fisuras, irradiado con potencia de 3.5 Watts.

Figura 4. Superficie inferior de cilindro de concreto hidráulico sin fisuras, irradiado con potencia de 3.5 Watts.

Figura 5. Arreglo óptico donde se muestra que la radiación láser fue aplicada mediante un sistema óptico a todo el volumen incidiendo en la superficie superior del cilindro.

Figura 6a. Evolución de la resistencia a compresión de las muestras de concreto irradiadas contra no irradiadas bajo la misma condición de radiación láser ($10.6 \mu\text{m}$) con una potencia de 3.5 Watts. Resistencia de diseño de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ (izquierda sin aditivo, derecha con aditivo).

Figura 6b. Evolución de la resistencia a compresión de las muestras de concreto irradiadas contra no irradiadas bajo la misma condición de radiación láser ($10.6 \mu\text{m}$) con una potencia de 3.5 Watts. Resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ (izquierda sin aditivo, derecha con aditivo).

Figura 6c. Evolución de la resistencia a compresión de las muestras de concreto irradiadas contra no irradiadas bajo la misma condición de radiación láser ($10.6 \mu\text{m}$) con una potencia de 3.5 Watts. Resistencia de diseño de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (izquierda sin aditivo, derecha con aditivo).



Figura 7a. Espectro Raman de probeta de concreto sin aditivo de auto-curado irradiado contra no irradiado después de 28 días de elaboración.

Figura 7b. Espectro Raman de probeta de concreto con aditivo de auto-curado irradiado contra no irradiado después de 28 días de elaboración.

Figura 7c. Espectro Raman de probeta de pasta de cemento sometido a campos magnetoestáticos (Soto Bernal et al., 2015).

Figura 7d. Espectro Raman de grava de una probeta irradiada contra grava de una probeta no irradiada.

Figura 8a. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo a una edad de 28 días.

Figura 8b. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta no irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo a una edad de 28 días.

Figura 8c. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.

Figura 8d. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta no irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.

Figura 9a. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, sin aditivo.

Figura 9b. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, con aditivo.

Figura 9c. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, sin aditivo.

Figura 9d. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, con aditivo.

Figura 9e. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, sin aditivo.



Figura 9f. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, con aditivo.

Figura 10. Espectro Raman de grava de una probeta irradiada en comparación con grava de una probeta no irradiada.

Figura 11. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

Figura 12. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

Figura 13. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

Figura 14. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

Figura 15. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

Figura 16. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

Figura 17. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

Figura 18. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.



Figura 19. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

Figura 20. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

Figura 21. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

Figura 22. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

Figura 23. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

Figura 24. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

Figura 25. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

Figura 26. Polvo de cemento de las muestras de concreto hidráulico irradiado para espectroscopia Raman.

Figura 27. Polvo de cemento de muestra sin irradiar de concreto hidráulico para espectroscopia Raman.

Figura 28. Sellado individual de muestras después de ensayo a la compresión, para evitar contaminación.

Figura 29. Muestra en proceso de sellado para evitar contaminación, previo a la obtención de polvo de cemento.



Figura 30. Muestra en proceso de sellado para evitar contaminación, previo a la obtención de polvo de cemento.

Figura 31. Muestras cabeceadas con azufre listas para ser ensayadas a la compresión.

Figura 32. Resultados de resistencia a la compresión, en pantalla de prensa hidráulica.

Figura 33. Pantalla en prensa hidráulica para introducir datos de la muestra a ensayar.

Figura 34. Muestra colocada en prensa hidráulica lista para ensayar.

Figura 35. Cabeceado de muestra de concreto hidráulico.

Figura 36. Medición de muestras de concreto hidráulico con Vernier digital.

Figura 37. Pesaje en báscula de precisión de las muestras de concreto hidráulico.

Figura 38. Ensaye en proceso en microscopio Raman para obtención de espectro de polvo de cemento.

Figura 39. Espectro Raman obtenido en pantalla.

Figura 40. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta no irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.

Figura 41. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.



RESUMEN

En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos en el tratamiento de cilindros de concreto hidráulico irradiados con láser CO_2 ($10.6\mu\text{m}$) a una potencia óptica de radiación 3.5 Watts, con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas, además de obtener tiempos de fraguado menores a los del fraguado en forma natural (sin radiación). Se registró la temperatura final en la superficie superior e inferior de las muestras, se midió la resistencia a la compresión y se obtuvieron espectros del cemento en muestras de concreto hidráulico irradiadas y no irradiadas. La espectroscopia Raman nos demuestra que hay un cambio en la microestructura del cemento de la superficie superior de la muestra, debido a la propagación del campo eléctrico sobre las moléculas de agua que están dispuestas alrededor de los grupos funcionales del aglutinante y que al rotar producen un efecto equivalente a micro vibraciones, dando como resultado un material más compacto y con menos poros, sin embargo, con resultados negativos en la resistencia a la compresión. Se demostró mediante espectroscopia Raman y medición de temperaturas, que la radiación con láser de CO_2 a una potencia de 3.5 Watts, influye negativamente en las propiedades mecánicas de los cilindros de concreto hidráulico, por el calentamiento producido durante la irradiación, por la pérdida repentina de agua debido a dicho incremento de temperatura y por la falta de propagación del campo eléctrico en el volumen total de la muestra, pues este solo se propaga en la superficie superior.



ABSTRACT

This thesis presents the results of the exposure of hydraulic concrete cylinders irradiated with a CO₂ laser (10.6 μm) with 3.5 Watts of optic power. The purpose of the experiment was to improve the concrete's mechanical properties in addition to obtaining lower setting times than those of a natural setting (without radiation). The final temperature of the top and bottom of the sample, the compression strength of the concrete cylinder, and the cement spectres were obtained for both irradiated and non-irradiated samples. Raman spectroscopy shows a change in the microstructure of the cement on the top face of the sample due to the electric field propagating over water molecules arranged around the binder functional groups, which, when rotated produce an effect equivalent to microvibrations, resulting in a more compact material with less pores, but, with negative results in compression strength. With the help of Raman spectroscopy and temperature readings, it was proven that the CO₂ laser radiation at 3.5 Watts of power, has a negative influence on the mechanical properties of the hydraulic concrete cylinders due to the heat produced during irradiation, the sudden loss of water this rise of temperature causes and the lack of propagation of the electric field over the whole volume of the sample as the electric field spreads only over the top face of the cylinder.



CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN



1 INTRODUCCIÓN

Se han tratado materiales base cemento con rayo láser CO₂ para distintas aplicaciones. Por ejemplo, el láser de CO₂ ha sido utilizado para remover material del concreto, por el desconchado y acristalamiento de la superficie (Rao, Kumar, & Nath, 2005). La radiación con láser también se ha utilizado para el estudio en edificios patrimoniales, pues simula el “quemado” de los materiales con los que fueron construidos, ya que ofrece una física de calentamiento similar al fuego. El uso de la radiación láser CO₂ permite repetibilidad de los experimentos y, sobre todo, utilizar menos cantidad de muestras. También permite concentrar una alta energía en un área pequeña, con lo que se pueden realizar ensayos a escala en muestras pequeñas de concreto (Gómez-Heras, Molpereces, Ocaña, Morcillo Linares, & Fort, 2008).

Una alta potencia incidente del haz láser sobre una superficie de concreto puede producir desprendimiento, acristalamiento o vaporización, dependiendo de la densidad de potencia del láser (Rao et al., 2005), es por ello que se debe tener especial cuidado para que el láser no influya negativamente en las propiedades mecánicas del concreto hidráulico.

La radiación electromagnética emitida por el láser de CO₂ utilizado en estos experimentos tiene una longitud de onda de 10.6µm ubicada en la región del infrarrojo medio del espectro electromagnético. Es una radiación no ionizante, pero que causa efectos fotofísicos y foto-químicos como el calentamiento y la disociación molecular respectivamente, además de rotaciones y vibraciones moleculares (M. R. Moreno Virgen et al., 2011).

Existe una relación muy importante entre la porosidad (la parte de huecos en el volumen) y la resistencia a la compresión. Por consecuencia, en materiales de múltiples fases como el concreto, la porosidad de la estructura de cada uno de los componentes que unificándolos produce la porosidad del concreto son un límite a la resistencia (López Orozco, 2004).



Al irradiar cemento en estado fresco, las moléculas de agua vibran provocando un reacomodo en las moléculas del cemento hidratado, causando que el material tenga una menor cantidad de poros. Por consiguiente el material tiene una mayor resistencia a la compresión.

1.1 Planteamiento del problema

En la industria de la construcción uno de los materiales más importantes y más usado es el concreto hidráulico. En la mayoría de las normas y reglamentos de las distintas instancias de gobierno, el concreto debe cumplir con requisitos o estándares de calidad en sus propiedades mecánicas a la cual fue diseñada la estructura.

Como menciona el artículo de la NRMCA (National Ready Mixed Concrete Association, 2003), una de las principales pruebas mecánicas que se realizan, mide la resistencia a la compresión que adquiere dicho material hasta cierto momento después de su preparación y fraguado. Por lo general, cuando se realizan los ensayos, suele decirse que se “pierde” un tiempo de 28 días antes de tener resultados definitivos para evaluar las propiedades mecánicas del concreto. En el ámbito de la construcción, este tiempo en obra es demasiado largo, de manera que las constructoras han optado por usar un determinado lote de mezcla antes de conocer los resultados definitivos, arriesgándose a que, si las muestras no cumplen las pruebas correspondientes, tendrán que demolerse los elementos realizados con dicho lote.

El área de tecnología del concreto demanda nuevos métodos para poder predecir en menos tiempo el comportamiento del concreto en su resistencia a la compresión, así como implementar métodos para darle una mayor resistencia y mejoras en el tiempo de fraguado. Existen estudios en donde se comprueba que al aplicar radiación láser CO_2 a pastas de cemento, aumenta significativamente la resistencia a la compresión y disminuye su tiempo de fraguado (Moreno-Virgen et al., 2011).



En cambio, con un material como el concreto, que contiene espacios vacíos de varios tamaños, microgrietas en la zona de transición entre la matriz y los agregados gruesos, los modos de falla bajo esfuerzos son muy complejos (López Orozco, 2004), es por eso necesario estudiar la influencia de la radiación láser CO_2 en concreto, pues ya se conoce el efecto en pastas de cemento. La mayoría de los elementos estructurales de concreto, se diseñan para aprovechar la mayor resistencia a la compresión del material.

1.2 Justificación

Debido a que se ha observado que la radiación láser CO_2 tiene efectos positivos en las propiedades mecánicas y microestructurales de pastas de cemento, se llevará a cabo una campaña experimental con el fin de verificar si este mismo efecto se da en muestras de concreto hidráulico. Lo anterior en función de que en la industria de la construcción la pasta de cemento sin agregados, no se usa para elementos estructurales.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es el de analizar la viabilidad de irradiar con láser CO_2 muestras de concreto hidráulico, con el fin de verificar si es posible obtener mejoras de las propiedades mecánicas y microestructurales como en el caso de las pastas de cemento.

Los objetivos particulares se mencionan a continuación:

- Calibrar hasta que potencia el láser no daña el concreto hidráulico.
- Medir la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto hidráulico irradiados y sin irradiar.
- Medir la temperatura en la superficie superior e inferior de los cilindros de concreto hidráulico irradiados y sin irradiar, con el fin de comparar el incremento de temperatura por la presencia de la radiación láser CO_2 .
- Obtener el espectro Raman del polvo de cemento endurecido de los cilindros de concreto hidráulico irradiado y sin irradiar, para determinar en qué longitudes de



onda se incrementan los picos de los espectros. Lo anterior debido a que en investigaciones anteriores se caracterizaron los cristales que se forman en mayor porcentaje debido a la modificación de la estructura por presencia de campos magnetoestáticos (Soto Bernal, Gonzalez Mota, Rosales Candelas, & Ortiz Lozano, 2015).

- Obtener el espectro Raman del polvo de la grava utilizada en el concreto hidráulico con el cual se elaboraron los cilindros irradiados y sin irradiar, con el fin de determinar si se modifica la microestructura por presencia de la radiación láser CO₂.

1.4 Organización del documento

Capítulo 1

En el capítulo 1 se presenta la introducción general de la tesis. Se presenta el planteamiento del problema, justificación, objetivos principales y particulares y metodología experimental. En la metodología experimental se describen los materiales utilizados, el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, el proceso de fabricación de las muestras de concreto hidráulico y condiciones ambientales, generalidades y potencias de radiación con láser y los ensayos de caracterización de las muestras de concreto hidráulico en estado endurecido. Por último, la estructura que conlleva el documento.

Capítulo 2

Dado que los miembros del comité tutorial de esta investigación consideraron que los resultados obtenidos son de gran impacto, decidieron que se debía elaborar un artículo para una revista indexada. Por lo tanto, en este capítulo se anexa el artículo enviado, así como la evidencia del envío y el impacto de la revista a la cual fue enviado el artículo.



Capítulo 3

En el capítulo 3 se presentan las conclusiones de la tesis y se plantean posibles líneas de investigación futura, determinadas durante la realización de ésta investigación.

1.5 Metodología experimental

La calibración adecuada y el manejo ordenado de la información, fue fundamental en el estudio y entendimiento de los resultados, por lo que la metodología experimental fue la siguiente:

1.5.1 Materiales

1.5.1.1 Cemento

Como aglutinante utilizado para la elaboración de las muestras de concreto hidráulico se utilizó un cemento Portland Compuesto CPC 30 R, clasificación basada en la Norma Mexicana (NMX C-414-ONNCCE 2004, 2004). Las muestras de concreto hidráulico fueron preparadas en cilindros de 38 mm x 76 mm.

1.5.1.2 Grava

Para el agregado grueso se utilizó grava de basalto triturado, el cual fue cribado con un tamiz de laboratorio para granulometría (bajo norma ASTM) de 12" de diámetro, con una abertura de 12.5 ASTM 1/2" para tamaño máximo de agregado (T.M.A.) de 1/2" (ASTM E-11, 2015).



1.5.1.3 Arena

Como agregado fino se usó arena lavada proveniente de canteras aluviales. Se determinó en laboratorio su módulo de finura (MF) = 2.5 basado en la Norma Mexicana (NMX C-111-ONNCCE 2004, 2004).

1.5.2 Diseño de la mezcla de concreto hidráulico

El diseño de la mezcla de concreto se elaboró con el método ACI 211.1 (ACI 211.1-91, 2009), haciendo un ajuste según el contenido de humedad de los agregados al momento de su elaboración, para garantizar la correcta cantidad de agua que requiere la mezcla según la relación Agua/Cemento (A/C). Se diseñó para tres resistencias a la compresión distintas, $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$.

1.5.2.1 Aditivos

Se optó por utilizar un aditivo de auto-curado propiedad de la empresa CEMEX S.A. de C.V., quienes proporcionaron la cantidad exacta de éste para elaborar las 36 probetas de concreto. La finalidad de usar el aditivo fue para evitar la pérdida repentina de agua del concreto en estado fresco, controlando la dosificación del agua en las primeras horas de fraguado y logrando que las moléculas de agua vibren y roten el mayor tiempo posible.

Se elaboraron muestras con y sin aditivo en las 3 distintas resistencias, de igual manera irradiada y sin irradiar.



1.5.3 Fabricación de las muestras de concreto hidráulico y condiciones ambientales

La mezcla de concreto se mezcló de acuerdo con la Norma Mexicana (NMX C-159-ONNCCE 2004, 2004), con una relación A/C de 0.53 ($f^c=250 \text{ kg/cm}^2$), 0.46 ($f^c=300 \text{ kg/cm}^2$) y 0.40 ($f^c=350 \text{ kg/cm}^2$); se tomaron estas relaciones A/C interpolando linealmente en función a la tabla de ACI 211.1 (ACI 211.1-91, 2009), en donde indica el Valor de relación A/C según la resistencia media a la compresión a los 28 días en kg/cm^2 . Los experimentos fueron llevados a cabo en un laboratorio cerrado cuyas condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) fueron controladas y registradas y cuya temperatura ambiental durante los ensayos osciló entre los 15 y los 20 °C.

1.5.4 Generalidades y potencias de radiación con láser

Para definir la potencia a la cual se irradiaron las muestras de concreto hidráulico, se realizó una evaluación elaborando 8 muestras de la misma resistencia, 4 irradiadas y 4 sin irradiar en 4 potencias distintas (6.5, 5.5, 4.5 y 3.5 Watts) (ver tabla 2). Con potencias superiores a 4.5 Watts se observó en las muestras fisuras por retracción térmica y por pérdida repentina de agua, así como temperaturas más altas en comparación a las muestras irradiadas con 3.5 Watts de potencia. En las muestras irradiadas con 3.5 Watts se dejaron de observar fisuras y la temperatura en el concreto disminuyó considerablemente en comparación con las muestras irradiadas a 6.5, 5.5 y 4.5 Watts. (ver figuras 1, 2, 3 y 4)

Como parte de la caracterización de las propiedades mecánicas se evaluó la resistencia a la compresión a los, 3, 7 y 28 días, a las muestras de concreto hidráulico.

Para la caracterización microestructural se obtuvo espectro Raman de las muestras de concreto hidráulico irradiadas y sin irradiar. Las muestras irradiadas fueron expuestas a un tratamiento con radiación láser de CO_2 a $10.6 \mu\text{m}$ (a una potencia óptica de radiación 3.5



Watts) inmediatamente después de haber sido fabricadas. El tiempo de radiación fue de 3.5, 4.5, y 5.8 horas, para las relaciones de A/C de 0.4, 0.46 y 0.53 respectivamente.

Posteriormente, las muestras se almacenaron en condiciones de curado húmedo a una temperatura cercana a los 20 °C y una humedad relativa mayor a 95%.

La radiación con láser a las muestras de concreto se llevó a cabo mediante un láser de CO₂ modelo Synrad 60 W y la potencia empleada fue de: 3.5 Watts de potencia óptica medida con un medidor de potencia óptica modelo 12PDC001 y un cabezal PDH007 con un rango de potencia de 100 mW- 50 mW y una resolución de 10 mW. La radiación láser fue aplicada mediante un arreglo óptico en la cara superior del cilindro (Ver figura 5).

La temperatura de las muestras fue tomada por medio de un termómetro infrarrojo modelo Fluke 63 al final de la aplicación de la radiación, tanto en la superficie superior como en la inferior de la probeta.

1.5.5 Ensayos de caracterización de las muestras de concreto en estado endurecido

1.5.5.1 Determinación de la resistencia a la compresión de las muestras de concreto

Se fabricaron 36 probetas cilíndricas de 38 mm x 76 mm de concreto hidráulico para cada potencia de radiación con láser, para ser ensayadas a compresión a 3, 7 y 28 días. Como se mencionó anteriormente se ensayaron bajo 3 resistencias de diseño distintas, $f'_c=250$ kg/cm², $f'_c=300$ kg/cm² y $f'_c=350$ kg/cm². De las 36 probetas 18 fueron con aditivo autocurante y 18 sin aditivo. Las probetas fueron ensayadas en una prensa hidráulica marca CONTROLS modelo PILOT 4.



1.5.5.2 Espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman es una herramienta bastante confiable para investigar y caracterizar el cemento y sus fases (tanto del cemento blanco como el cemento gris) (Bogue, 1948) (Nambiar & Krishnamurthy, 1984). La espectroscopia Micro-Raman también es empleada en la identificación de las distintas fases del cemento (Ortiz, Aguado, Agulló, & García, 2005) (Almusallam, 2001).

La finalidad de emplear la espectroscopia Raman a las muestras de concreto en estado endurecido fue para identificar la formación de cristales en mayor cantidad en el cemento irradiado contra el no irradiado (Moreno Virgen et al., 2011).

Una vez ensayados los cilindros de concreto hidráulico a compresión, se separó cada probeta en una bolsa independiente previamente identificada para no contaminar la muestra, y así obtener polvo de cemento de la superficie superior de la muestra y ensayarlo en el microscopio Raman.

Para obtener los espectros se utilizó un microscopio Raman marca THERMO SCIENTIFIC modelo DXR 2.



CAPÍTULO II ARTÍCULO



2 ARTÍCULO “INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN LÁSER CO₂ EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DEL CONCRETO HIDRÁULICO”.

J. J. Velasco-González (*), J. A. Ortiz-Lozano (*), J. J. Soto-Bernal (**) (***)

2.1 Resumen.

En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos en el tratamiento de cilindros de concreto hidráulico irradiados con láser CO₂ (10.6 μ m) a una potencia óptica de radiación 3.5 Watts, con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas, además de obtener tiempos de fraguado menores a los del fraguado en forma natural (sin radiación). Se registró la temperatura final en la superficie superior e inferior de las muestras, se midió la resistencia a la compresión y se obtuvieron espectros del cemento en muestras de concreto hidráulico irradiadas y no irradiadas. La espectroscopia Raman nos demuestra que hay un cambio en la microestructura del cemento de la superficie superior de la muestra, debido a la propagación del campo eléctrico sobre las moléculas de agua que están dispuestas alrededor de los grupos funcionales del aglutinante y que al rotar producen un efecto equivalente a micro vibraciones, dando como resultado un material más compacto y con menos poros, sin embargo, con resultados negativos en la resistencia a la compresión. Se demostró mediante espectroscopia Raman y medición de temperaturas, que la radiación con láser de CO₂ a una potencia de 3.5 Watts, influye negativamente en las propiedades mecánicas de los cilindros de concreto hidráulico, por el calentamiento producido durante la irradiación, por la pérdida repentina de agua debido a dicho incremento de temperatura y por la falta de propagación del campo eléctrico en el volumen total de la muestra, pues este solo se propaga en la superficie superior.

Palabras clave: Cemento Portland, Propiedades mecánicas, resistencia a la compresión, espectroscopia Raman, radiación láser CO₂.



(*) Departamento de construcción y estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Avenida Universidad 940, Edificio 108, C.P. 20131 Aguascalientes, AGS, México.

(**) Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Avenida A. López Mateos 1801 Ote., C.P. 20256 Aguascalientes, AGS, México.

(***) Centro de Investigaciones en Óptica, Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, C.P. 20200 Aguascalientes, AGS, México.

2.2 Introducción.

Se han tratado materiales base cemento con rayo láser CO_2 para distintas aplicaciones. Por ejemplo, el láser de CO_2 ha sido utilizado para remover material del concreto, por el desconchado y acristalamiento de la superficie (Rao, Kumar, & Nath, 2005). La radiación con láser también se ha utilizado para el estudio en edificios patrimoniales, pues simula el “quemado” de los materiales con los que fueron construidos, ya que ofrece una física de calentamiento similar al fuego. El uso de la radiación láser CO_2 permite repetibilidad de los experimentos y, sobre todo, utilizar menos cantidad de muestras. También permite concentrar una alta energía en un área pequeña, con lo que se pueden realizar ensayos a escala en muestras pequeñas de concreto (Gómez-Heras, Molpereces, Ocaña, Morcillo Linares, & Fort, 2008).

Una alta potencia incidente del haz láser sobre una superficie de concreto puede producir desprendimiento, acristalamiento o vaporización, dependiendo de la densidad de potencia del láser (Rao et al., 2005), es por ello que se debe tener especial cuidado para que el láser no influya negativamente en las propiedades mecánicas del concreto hidráulico.

La radiación electromagnética emitida por el láser de CO_2 utilizado en estos experimentos tiene una longitud de onda de $10.6\mu\text{m}$ ubicada en la región del infrarrojo medio del espectro electromagnético. Es una radiación no ionizante, pero que causa efectos fotofísicos y foto-químicos como el calentamiento y la disociación molecular respectivamente, además de rotaciones y vibraciones moleculares (M. R. Moreno Virgen et al., 2011).



Existe una relación muy importante entre la porosidad (la parte de huecos en el volumen) y la resistencia a la compresión. Por consecuencia, en materiales de múltiples fases como el concreto, la porosidad de la estructura de cada uno de los componentes que unificándolos produce la porosidad del concreto son un límite a la resistencia (López Orozco, 2004).

Al irradiar cemento en estado fresco, las moléculas de agua vibran provocando un reacomodo en las moléculas del cemento hidratado, causando que el material tenga una menor cantidad de poros. Por consecuente el material tiene una mayor resistencia a la compresión.

2.3 Metodología experimental

2.3.1 Materiales utilizados

2.3.1.1 Cemento

Como aglutinante utilizado para la elaboración de las muestras de concreto hidráulico se utilizó un cemento Portland Compuesto CPC 30 R, clasificación basada en la Norma Mexicana (NMX C-414-ONNCCE 2004, 2004), de 30 MPa de resistencia a compresión a los 28 días, tiempo de fraguado inicial de 45 minutos (mínimo) y fraguado final de 600 minutos (máximo), el cual es uno de los cementos más utilizados comercialmente en México. En la Tabla 1 se muestra la composición química de este cemento. Las muestras de concreto hidráulico fueron preparadas en cilindros de 38 mm x 76 mm.



Análisis químico	Especificación NMX-C-414-ONNCCE 2004	Valor
SiO ₂	-	22.97 %
Al ₂ O ₃	-	4.53 %
Fe ₂ O ₃	-	2.72 %
CaOt	-	61.38 %
CaOl	-	0.47 %
MgO	-	1.46 %
SO ₃	4.0% máx.	2.61 %
Na ₂ O	-	0.65 %
K ₂ O	-	1.1 %

Tabla 1. Composición química del cemento utilizado (Soto Bernal et al., 2015).

2.3.1.2 Grava

Para el agregado grueso se utilizó grava de basalto triturado, el cual fue cribado con un tamiz de laboratorio para granulometría (bajo norma ASTM) de 12” de diámetro, con una abertura de 12.5 ASTM ½” para tamaño máximo de agregado (T.M.A.) de ½” (ASTM E-11, 2015).

El limitante para usar grava de T.M.A. ½” fue el diámetro del cilindro para probeta, y la limitación para usar probetas de un mayor diámetro es por el arreglo óptico dentro del láser CO₂ que no permitió una altura mayor a 8.5cm, por lo que para guardar una relación altura/diámetro= 2 se usaron probetas de 1.5” de diámetro por 3” de altura y se definió el tamaño máximo de agregado como D/3 (diámetro entre tres), todo lo anterior basado en la Norma Mexicana (NMX C-169-ONNCCE 2009, 2004).

2.3.1.3 Arena

Como agregado fino se usó arena lavada proveniente de canteras aluviales. Se determinó en laboratorio su módulo de finura (MF) = 2.5 basado en la Norma Mexicana (NMX C-111-ONNCCE 2004, 2004).



2.3.2 Diseño de la mezcla de concreto hidráulico

El diseño de la mezcla de concreto se elaboró con el método ACI 211.1 (ACI 211.1-91, 2009), haciendo un ajuste según el contenido de humedad de los agregados al momento de su elaboración, para garantizar la correcta cantidad de agua que requiere la mezcla según la relación Agua/Cemento (A/C). Se diseñó para tres resistencias distintas, $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$.

2.3.2.1 Aditivos

“La radiación láser origina que las moléculas del agua vibren y roten de manera uniforme y en una dirección perpendicular a como se propaga la radiación láser” (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

“Las moléculas al rotar de manera uniforme, producen un campo eléctrico a la misma frecuencia del campo que provocó dicha vibración o rotación, el cual se propagará a las moléculas de agua vecinas; si bien es cierto que el campo eléctrico (E) producido o generado por las moléculas es de menor intensidad que la intensidad que las hizo vibrar, también es cierto que la fuente de excitación es constante, esto hará que el campo eléctrico se propague por todo el volumen y por lo tanto, las moléculas del agua se polaricen en la misma dirección” (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

Para que la pasta de cemento tenga el anterior efecto al irradiarse con el láser, ésta deberá de estar fresca porque en una pasta endurecida, el acomodo de las moléculas ya está definido y la radiación en ese momento deja de producir efectos (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

Debido a lo anterior, se optó por utilizar un aditivo de auto-curado propiedad de la empresa CEMEX S.A. de C.V., quienes proporcionaron la cantidad exacta de éste para elaborar las



36 probetas de concreto. La finalidad de usar el aditivo fue para evitar la pérdida repentina de agua del concreto en estado fresco, controlando la dosificación del agua en las primeras horas de fraguado y logrando que las moléculas de agua vibren y roten el mayor tiempo posible.

Se elaboraron muestras con y sin aditivo en las 3 distintas resistencias, de igual manera irradiada y sin irradiar.

2.3.3 Fabricación de las muestras de concreto hidráulico y condiciones ambientales

La mezcla de concreto se mezcló de acuerdo con la Norma Mexicana (NMX C-159-ONNCCE 2004, 2004), con una relación A/C de 0.53 ($f'c=250 \text{ kg/cm}^2$), 0.46 ($f'c=300 \text{ kg/cm}^2$) y 0.40 ($f'c=350 \text{ kg/cm}^2$); se tomaron estas relaciones agua/cemento interpolando linealmente en función a la tabla de ACI 211.1 (ACI 211.1-91, 2009), en donde indica el Valor de relación A/C según la resistencia media a la compresión a los 28 días en kg/cm^2 . Los experimentos fueron llevados a cabo en un laboratorio cerrado cuyas condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) fueron controladas y registradas y cuya temperatura ambiental durante los ensayos oscilo entre los 15 y los 20 °C.

2.3.4 Generalidades y potencias de radiación láser

Para definir la potencia a la cual se irradiaron las muestras de concreto hidráulico, se realizó una evaluación elaborando 8 muestras de la misma resistencia, 4 irradiadas y 4 sin irradiar en 4 potencias distintas (6.5, 5.5, 4.5 y 3.5 Watts) (ver tabla 2). Con potencias superiores a 4.5 Watts se observó en las muestras fisuras por retracción térmica y por pérdida repentina de agua, así como temperaturas más altas en comparación a las muestras irradiadas con 3.5 Watts de potencia. En las muestras irradiadas con 3.5 Watts se dejaron de observar fisuras y la temperatura en el concreto disminuyó considerablemente en comparación con las muestras irradiadas a 6.5, 5.5 y 4.5 Watts. (ver figuras 1, 2, 3 y 4)

Tabla de calibración de potencias láser CO ₂					
Resistencia diseño (kg/cm ²)	Potencia (watts)	Agua/Cemento	Temperatura		Resistencia obtenida (kg/cm ²)
			Superficie superior °C	Superficie inferior °C	
250	6.5	0.5328	38.3	36.5	98.69
250	0	0.5328			125.12
250	5.6	0.5328	36.7	34.5	99.4
250	0	0.5328			124.86
250	4.5	0.5328	33.5	31.1	123.05
250	0	0.5328			138.32
250	3.5	0.5328	30.1	28.2	131.25
250	0	0.5328			135.94

Tabla 2. Tabla de potencias con la cual se calibró la experimentación.



Figura 1 (izquierda). Se observa en la superficie inferior del cilindro de concreto hidráulico las fisuras por pérdida repentina de agua y por retracción térmica cuando la muestra es sometida a una radiación con potencia de 6.5 Watts.

Figura 2 (derecha). Se observa en la superficie superior del cilindro de concreto hidráulico las fisuras por pérdida repentina de agua y por retracción térmica cuando la muestra es sometida a una radiación con potencia de 6.5 Watts.



Figura 3 (izquierda). Las fisuras en la superficie superior del cilindro de concreto hidráulico desaparecen cuando la muestra es sometida a una radiación con potencia de 3.5 Watts.



Figura 4 (derecha). Las fisuras en la superficie inferior del cilindro de concreto hidráulico desaparecen cuando la muestra es sometida a una radiación con potencia de 3.5 Watts.

Como parte de la caracterización de las propiedades mecánicas se evaluó la resistencia a la compresión a los, 3, 7 y 28 días, a las muestras de concreto hidráulico.

Para la caracterización microestructural se obtuvo espectro Raman de las muestras de concreto hidráulico irradiadas y sin irradiar. Las muestras irradiadas fueron expuestas a un tratamiento con radiación láser de CO_2 a $10.6 \mu\text{m}$ (a una potencia óptica de radiación 3.5 Watts) inmediatamente después de haber sido fabricadas. El tiempo de radiación fue de 3.5, 4.5, y 5.8 horas, para las relaciones de A/C de 0.4, 0.46 y 0.53 respectivamente.

Posteriormente, las muestras se almacenaron en condiciones de curado húmedo a una temperatura cercana a los 20°C y una humedad relativa mayor a 95%.

La radiación con láser a las muestras de concreto se llevó a cabo mediante un láser de CO_2 modelo Synrad 60 W y la potencia empleada fue de: 3.5 Watts de potencia óptica medida con un medidor de potencia óptica modelo 12PDC001 y un cabezal PDH007 con un rango de potencia de 100 mW- 50 mW y una resolución de 10 mW. La radiación láser fue aplicada mediante un arreglo óptico en la cara superior del cilindro (Ver figura 5).

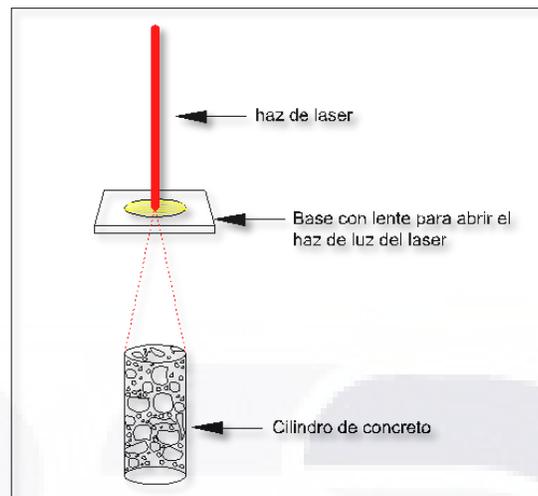


Figura 5. Arreglo óptico donde se muestra que la radiación láser fue aplicada mediante un sistema óptico a todo el volumen incidiendo en la superficie superior del cilindro.

La temperatura de las muestras fue tomada por medio de un termómetro infrarrojo modelo Fluke 63 al final de la aplicación de la radiación, tanto en la superficie superior como en la inferior de la probeta.

2.3.5 Ensayos de caracterización de las muestras de concreto hidráulico en estado endurecido

2.3.5.1 Determinación de la resistencia a la compresión de las muestras de concreto hidráulico

Se fabricaron 36 probetas cilíndricas de 38 mm x 76 mm de concreto hidráulico para cada potencia de radiación con láser, para ser ensayadas a compresión a 3, 7 y 28 días. Como se mencionó anteriormente se ensayaron bajo 3 resistencias de diseño distintas, $f'c=250$ kg/cm², $f'c=300$ kg/cm² y $f'c=350$ kg/cm². De las 36 probetas 18 fueron con aditivo autocurante y 18 sin aditivo. Las probetas fueron ensayadas en una prensa hidráulica marca CONTROLS modelo PILOT 4.

2.3.5.2 Espectroscopia Raman



La espectroscopia Raman es una herramienta bastante confiable para investigar y caracterizar el cemento y sus fases (tanto del cemento blanco como el cemento gris) (Bogue, 1948) (Nambiar & Krishnamurthy, 1984). La espectroscopia Micro-Raman también es empleada en la identificación de las distintas fases del cemento (Ortiz, Aguado, Agulló, & García, 2005) (Almusallam, 2001).

La finalidad de emplear la espectroscopia Raman a las muestras de concreto en estado endurecido fue para identificar la formación de cristales en mayor cantidad en el cemento irradiado contra el no irradiado (Moreno Virgen et al., 2011).

Una vez ensayados los cilindros de concreto hidráulico a compresión, se separó cada probeta en una bolsa independiente previamente identificada para no contaminar la muestra, y así obtener polvo de cemento de la superficie superior de la muestra y ensayarlo en el microscopio Raman. Para obtener los espectros se utilizó un microscopio Raman marca THERMO SCIENTIFIC modelo DXR 2.

2.4 Resultados

2.4.1 Resultados de resistencia a la compresión de las muestras de concreto hidráulico

En las figuras 6a, 6b y 6c se identifica una relación directa entre el tiempo de curado y la resistencia a la compresión de las muestras de concreto hidráulico, encontrando una disminución en la resistencia a la compresión de las muestras irradiadas contra las no irradiadas. Por ejemplo, en la figura 6a izquierda, la resistencia a la compresión a los 28 días de una muestra de concreto sometida a radiación láser a 3.5 Watts, disminuyó en un 24% con respecto a la que fraguó en forma natural.

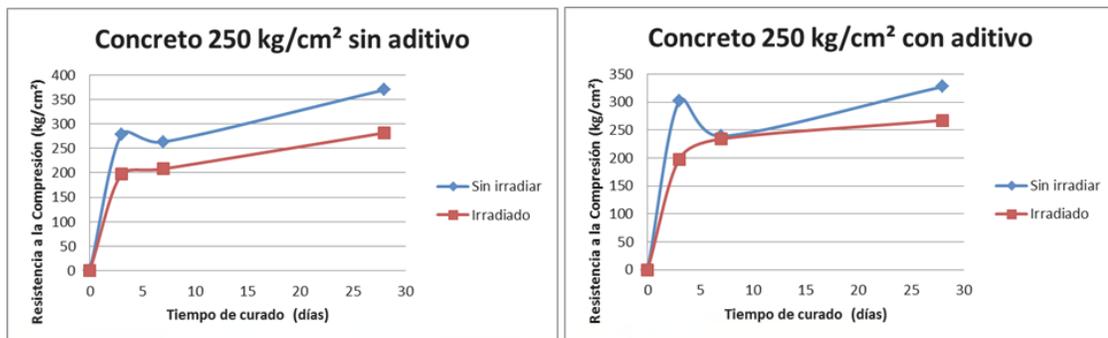


Figura 6a. Evolución de la resistencia a compresión de las muestras de concreto irradiadas contra no irradiadas bajo la misma condición de radiación láser (10.6 μm) con una potencia de 3.5 Watts. Resistencia de diseño de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ (izquierda sin aditivo, derecha con aditivo).

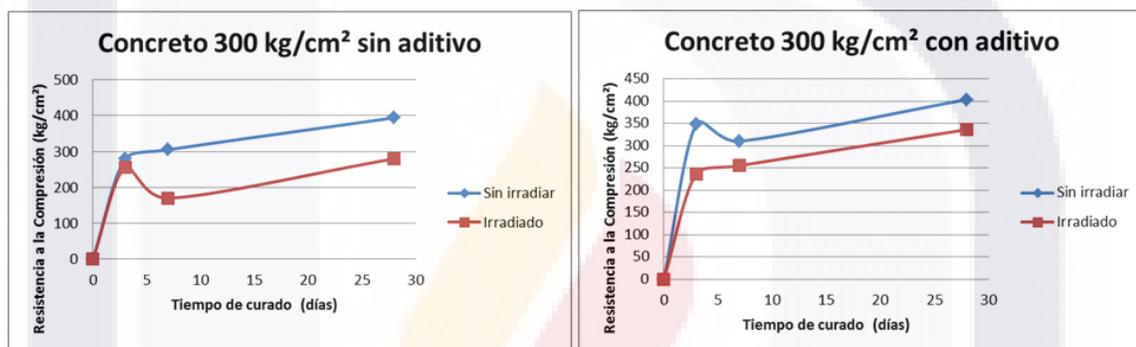


Figura 6b. Evolución de la resistencia a compresión de las muestras de concreto irradiadas contra no irradiadas bajo la misma condición de radiación láser (10.6 μm) con una potencia de 3.5 Watts. Resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ (izquierda sin aditivo, derecha con aditivo).

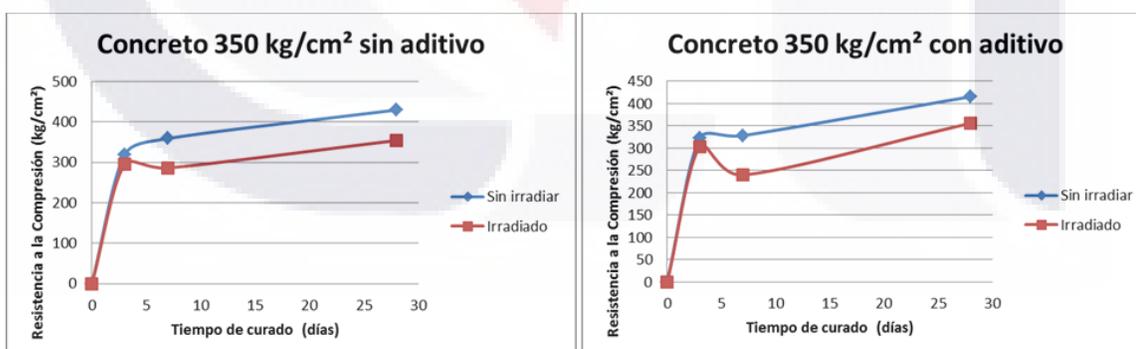


Figura 6c. Evolución de la resistencia a compresión de las muestras de concreto irradiadas contra no irradiadas bajo la misma condición de radiación láser (10.6 μm) con una potencia de 3.5 Watts. Resistencia de diseño de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (izquierda sin aditivo, derecha con aditivo).

2.4.2 Resultados de la espectroscopia Raman de las muestras de concreto hidráulico

En la figura 7a se muestra el gráfico del espectro obtenido con el microscopio Raman de dos probetas de resistencia a la compresión de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante, en donde se muestran los espectros tanto de la probeta irradiada como de la no irradiada.

En la figura 7b se muestra el gráfico del espectro obtenido con el microscopio Raman de dos probetas de resistencia a la compresión de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante, en donde aparecen los espectros tanto de la probeta irradiada como de la no irradiada.

Los cambios pueden ser observados en los principales componentes tal como aparece en el gráfico de las pastas de cemento (ver figura 7c). En el número de onda de 1078 cm^{-1} podemos identificar el silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) el cual es conocido como belita, que es un constituyente principal del cemento portland y es responsable de la resistencia mecánica a largo plazo, así como el yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que se encuentra localizado en el pico de 1279 cm^{-1} (Soto Bernal et al., 2015).

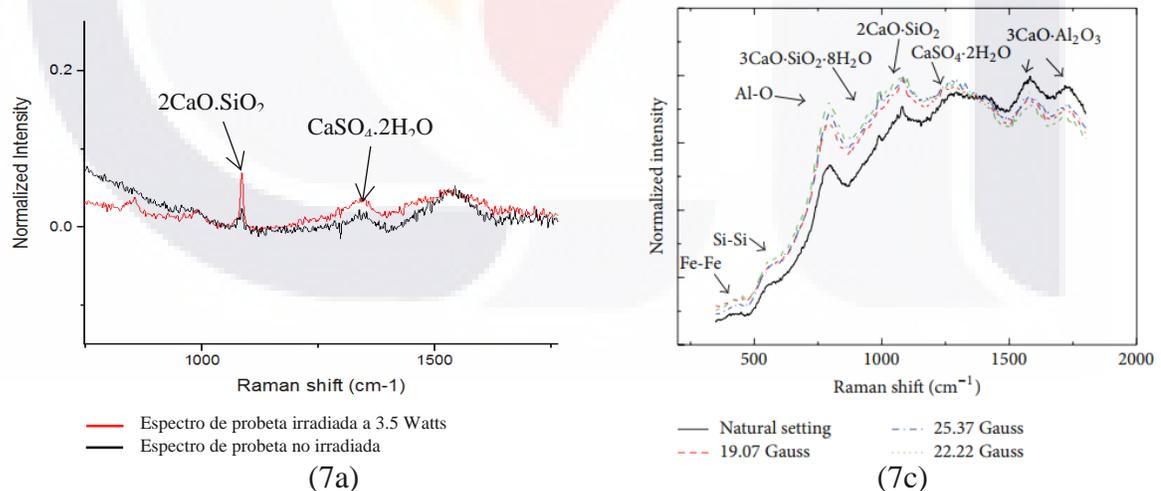


Figura 7a. Espectro Raman de probeta de concreto sin aditivo auto-curante irradiado contra no irradiado después de 28 días de elaboración.

Figura 7c. Espectro Raman de probeta de pasta de cemento sometido a campos magnetoestáticos (Soto Bernal et al., 2015).

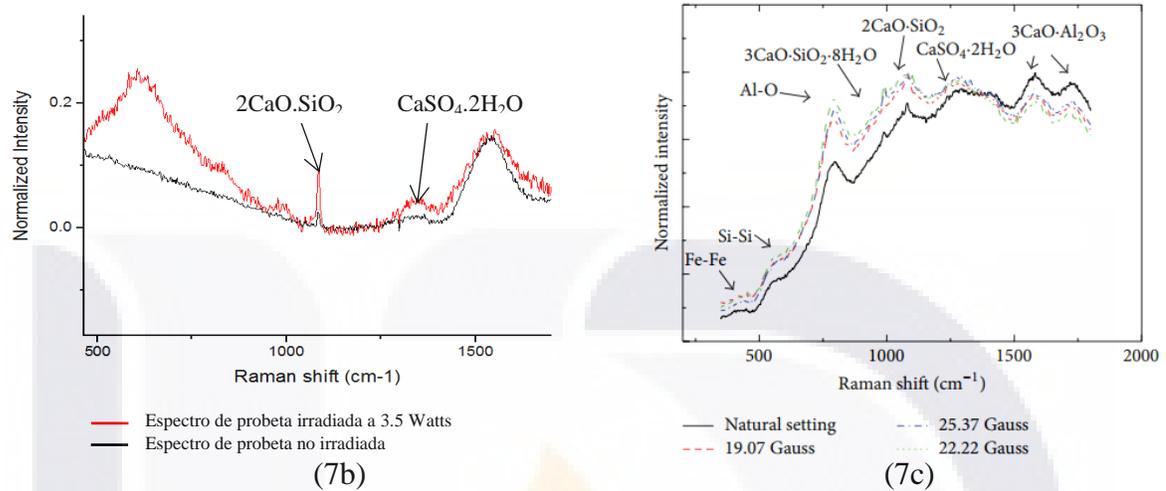


Figura 7b. Espectro Raman de probeta de concreto con aditivo auto-curante irradiado contra no irradiado después de 28 días de elaboración.

Figura 7c. Espectro Raman de probeta de pasta de cemento sometido a campos magnetoestáticos (Soto Bernal et al., 2015).

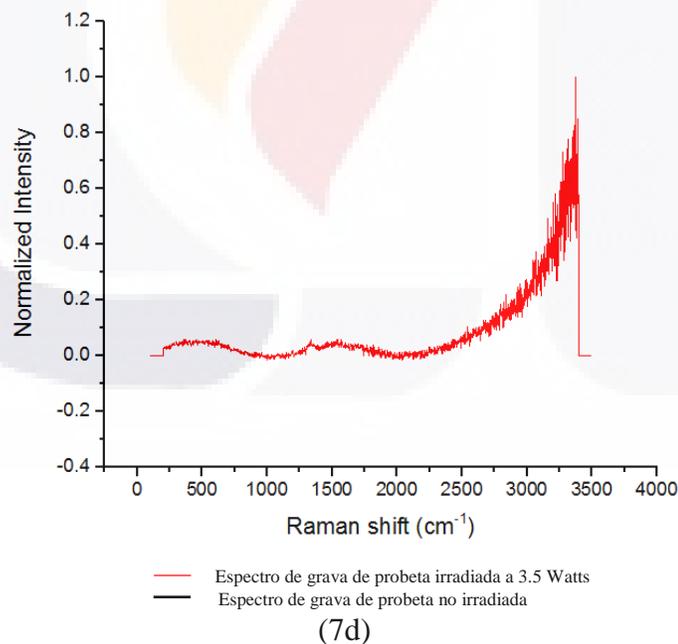


Figura 7d. Espectro Raman de grava de una probeta irradiada contra grava de una probeta no irradiada.

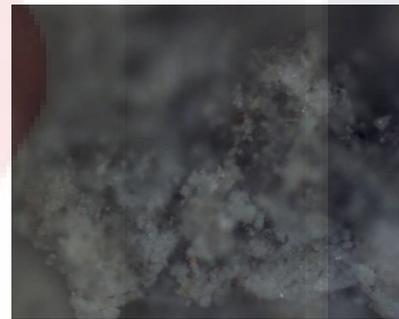


En la figura 7d se observa que la grava no sufre cambios en la formación de cristales ya que los cristales ya están formados y definidos. Los picos entre grava irradiada contra grava no irradiada no se aprecian por lo que se determina que los componentes constituyentes de la grava no se alteran bajo efecto de la radiación láser CO₂ con potencia de 3.5 Watts.

Las moléculas al rotar de manera uniforme, producen un campo eléctrico a la misma frecuencia del campo que provocó dicha vibración o rotación, el cual se propagará a las moléculas de agua vecinas (M. del R. Moreno Virgen, 2010). En las figuras 8a y 8c se observa como por efecto de la vibración hay un mejor acomodo en la microestructura del cemento influyendo en una menor cantidad de poros, a diferencia de las figuras 8b y 8d.



(8a)



(8b)

Figura 8a. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo a una edad de 28 días.

Figura 8b. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta no irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo a una edad de 28 días.



(8c)



(8d)

Figura 8c. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.

Figura 8d. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta no irradiada de resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.

2.4.3 Resultados de la temperatura al término de la radiación

Se tomó la temperatura al final de la radiación de cada probeta tanto en la superficie superior como en la inferior. En las figuras 9a, 9b, 9c, 9d, 9e y 9f, se muestra como las probetas no irradiadas tienen mayor temperatura en la parte inferior que en la parte superior, por el contrario, en las probetas irradiadas se genera una mayor temperatura en la superficie superior que en la parte inferior, así como un aumento considerable en la temperatura por efecto del láser sobre la muestra.

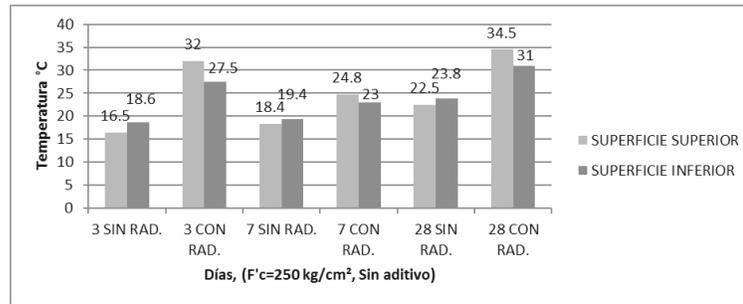


Figura 9a. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, sin aditivo.

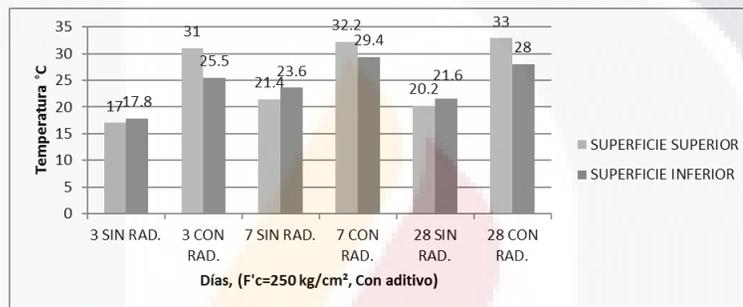


Figura 9b. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, con aditivo.

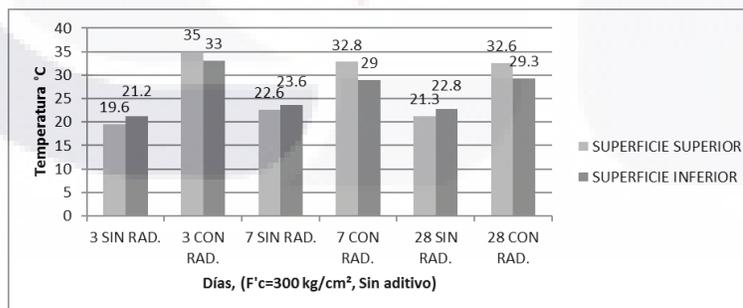


Figura 9c. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, sin aditivo.

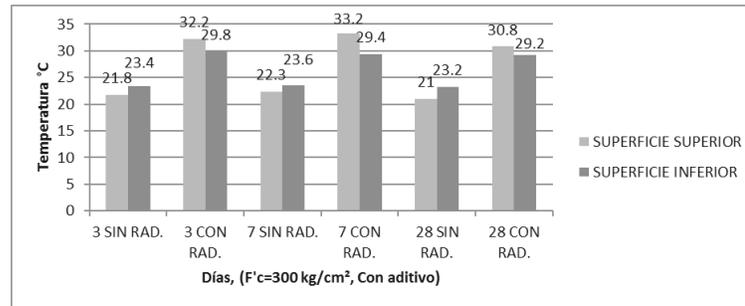


Figura 9d. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, con aditivo.

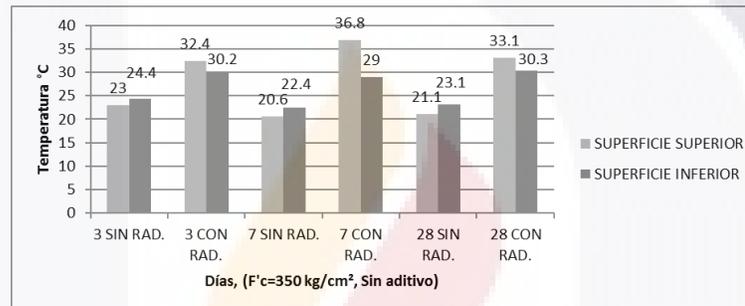


Figura 9e. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, sin aditivo.

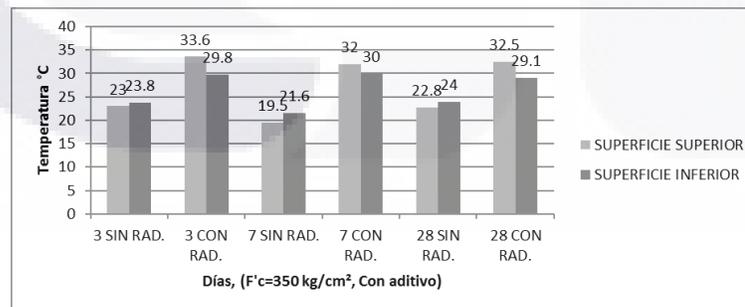


Figura 9f. Temperaturas de las probetas de 3, 7 y 28 días, tomadas inmediatamente al término de la radiación. Resistencia de diseño de $350 f'c=kg/cm^2$, con aditivo.



La temperatura máxima del concreto producido con materiales calentados para compensar las bajas temperaturas, no debe de exceder de treinta y dos 32°C en el momento de la producción y colocación (N·CMT·2·02·005/04, 2004). La temperatura en la superficie superior de las probetas irradiadas en su mayoría excede los 32°C .

2.5 Discusión

En las figuras 6a, 6b y 6c se identifica una relación directa entre el tiempo de curado y la resistencia a la compresión de las muestras de concreto, encontrando una disminución en la resistencia a la compresión de las muestras irradiadas contra las no irradiadas. Por ejemplo, en la figura 6a izquierda, la resistencia a la compresión a los 28 días de una muestra de concreto sometida a radiación láser a 3.5 Watts, disminuyó en un 24% con respecto a la que fraguó en forma natural.

Los tiempos de fraguado para las muestras de materiales base cemento sufren una reducción considerable por efecto de la radiación en comparación a las muestras que fraguaron en forma natural (M. del R. Moreno Virgen, 2010). Tal es el caso de las muestras de concreto hidráulico de este estudio, las cuales se irradiaron hasta alcanzar su fraguado y hasta el tiempo en donde la radiación ya no influye sobre el cemento, ya que este se encuentra cristalizado y en estado endurecido. Desde la apreciación personal la muestra irradiada justo en el instante después de extraerla del láser mostraba una consistencia más dura que la no irradiada la cual aún seguía fraguando y tenía una consistencia pastosa.

La mayor parte de la radiación infrarroja (IR) emitida por el láser es absorbida en la superficie por las moléculas de la pasta de cemento, produciendo reacciones foto-físicas y foto-químicas, originando el aumento de temperatura y la disociación molecular solamente en la región que recibe de manera directa la radiación láser (M. del R. Moreno Virgen, 2010).



La radiación láser sobre las muestras de concreto en estado fresco aumentó la temperatura en la superficie superior en donde se generaron temperaturas mayores a 32°C que se recomienda por norma no sea excedida para que no se produzcan daños en la microestructura (N·CMT·2·02·005/04, 2004), sin embargo, si es posible que pueda excederse sin generar daños en el concreto. Esta norma recomienda no exceder dicha temperatura para evitar la pérdida repentina de agua. La retracción térmica generada por los cambios a altas temperaturas en el proceso de hidratación del concreto produce tensiones y compresiones que el concreto no es capaz de resistir, generando microfisuras y manifestando una disminución en la resistencia a la compresión (Bažant, 1983).

Como las moléculas de agua se disponen alrededor de los grupos funcionales del aglutinante, al rotar con respecto al campo eléctrico aplicado se tendría un efecto equivalente a micro vibraciones que, en consecuencia, producirán un material más compacto y con una cantidad menor de poros con respecto al fraguado natural, lo que conlleva tener un material con mejores propiedades mecánicas (M. R. Moreno Virgen et al., 2011). Dado que los resultados del estudio presentan disminución en las propiedades mecánicas del concreto irradiado, se analizó por medio de espectroscopia Raman si el cemento de la mezcla de concreto hidráulico estaba teniendo efecto positivo bajo el efecto de la radiación.

Las figuras 8a y 8c que corresponden a las fotografías de la microestructura del polvo de cemento de las muestras de concreto hidráulico irradiado con y sin aditivo respectivamente, dejan ver que efectivamente por efecto de las microvibraciones se obtiene un material más compacto en comparación con la microestructura del polvo de cemento sin irradiar que corresponden a las figuras 8b y 8d.

En las figuras 7a y 7b, se demuestra que el cemento del concreto hidráulico está siendo modificado microestructuralmente a causa de la radiación. Los cambios pueden ser observados en los principales componentes tal como aparece en el gráfico de las pastas de



cemento de investigaciones previas (ver figura 7c). En el número de onda de 1078 cm^{-1} podemos identificar la creación del silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) el cuál es conocido como belita, que es un constituyente principal del cemento portland y es responsable de la resistencia mecánica a largo plazo, así como el yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que se encuentra localizado en el pico de 1279 cm^{-1} (Soto Bernal et al., 2015).

En la figura 7d, el espectro de grava irradiada contra la grava no irradiada no presenta cambios en los componentes. Es decir, la grava no tiene cambios microestructurales por efecto de la radiación, pues sus cristales están bien definidos.

2.6 Conclusiones

La radiación con láser de CO_2 ($10.6\text{ }\mu\text{m}$) con potencia de 3.5 Watts influye negativamente en las propiedades mecánicas del concreto, debido a que el campo eléctrico únicamente se propaga en el cemento hidratado de la superficie superior y no en el volumen total de las muestras, ya que los agregados evitan que se propague dicho campo generado por la radiación. Por lo tanto, la rotación de las moléculas de agua que se disponen alrededor de los grupos funcionales del aglutinante, solo se genera en el cemento expuesto a la radiación hasta un punto en donde el campo eléctrico se encuentra con el agregado e interfiere con la propagación de dicho campo. Dado que los agregados no sufren cambios por efecto de la radiación, al ser alcanzados por el campo eléctrico absorben la energía y la liberan en forma de calor. Este calor sumado a la temperatura generada por el láser provoca un aumento de temperatura en la superficie superior de las muestras de concreto hidráulico.

El aumento de la temperatura generada por el calor que libera el agregado sumada a la temperatura generada por el láser, sobrepasa la temperatura máxima de 32°C recomendada por la Norma (N·CMT·2·02·005/04, 2004) para evitar pérdida repentina de agua y



microfisuras por retracción térmica, que afectan las propiedades mecánicas del concreto hidráulico.

El concreto hidráulico no muestra mejoras en sus propiedades mecánicas cuando se somete a radiación láser. Dado que la temperatura sobrepasa los 32°C , esto explica la disminución de la resistencia a la compresión de las muestras irradiadas contra las no irradiadas.

Los tiempos de fraguado para las muestras de concreto sufrieron una reducción considerable por efecto radiación láser con potencia de 3.5 Watts, con la cual se irradiaron las muestras.

2.7 Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones y personas involucradas en este estudio. A CONACYT, por su apoyo económico durante el transcurso de la maestría y poder solventar los gastos de la campaña experimental.



CAPÍTULO III ARTICLE



3 ARTÍCULO “EFFECT OF CO₂ LASER RADIATION ON THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF HYDRAULIC CONCRETE”.

J. J. Velasco-González (*), J. A. Ortiz-Lozano (*), J. J. Soto-Bernal (**) (***)

3.1 Abstract.

This article presents the results of the exposure of hydraulic concrete cylinders irradiated with a CO₂ laser (10.6 μm) with 3.5 Watts of optic power. The purpose of the experiment was to improve the concrete's mechanical properties in addition to obtaining lower setting times than those of a natural setting (without radiation). The final temperature of the top and bottom of the sample, the compression strength of the concrete cylinder, and the cement spectres were obtained for both irradiated and non-irradiated samples. Raman spectroscopy shows a change in the microstructure of the cement on the top face of the sample due to the electric field propagating over water molecules arranged around the binder functional groups, which, when rotated produce an effect equivalent to microvibrations, resulting in a more compact material with less pores, but, with negative results in compression strength. With the help of Raman spectroscopy and temperature readings, it was proven that the CO₂ laser radiation at 3.5 Watts of power, has a negative influence on the mechanical properties of the hydraulic concrete cylinders due to the heat produced during irradiation, the sudden loss of water this rise of temperature causes and the lack of propagation of the electric field over the whole volume of the sample as the electric field spreads only over the top face of the cylinder.

Keywords: Portland Cement, Mechanical Properties, Compressive Strength, Raman Spectroscopy, CO₂ Laser Radiation.



(*) Departamento de construcción y estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Avenida Universidad 940, Edificio 108, C.P. 20131 Aguascalientes, AGS, México.

(**) Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Avenida A. López Mateos 1801 Ote., C.P. 20256 Aguascalientes, AGS, México.

(***) Centro de Investigaciones en Óptica, Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, C.P. 20200 Aguascalientes, AGS, México.

3.2 Introduction.

Cement-based materials have been treated with laser beam CO₂ for different applications. For example, the CO₂ laser beam has been used to remove material from concrete, due to Spalling and Crystallization of the surface (Rao, Kumar, & Nath, 2005). Laser radiation has also been used for the study on patrimonial buildings, because it simulates the “burning” of the materials utilized to build them, since it provides a heating behavior similar to fire. The use of laser beams CO₂ allows repeatability of the experiments and, moreover, a reduction of the amount of samples used. It also allows to concentrate high energy on a small area, so it is possible to perform scale experiments on small samples of concrete (Gómez-Heras, Molperces, Ocaña, Morcillo Linares, & Fort, 2008).

A high-power laser beam, acting on a concrete surface may cause spalling, crystallization or vaporization, depending on the power density of the laser beam (Rao et al., 2005). Thus, special care should be taken to avoid a negative influence of the laser on the mechanical properties of the concrete.

The electromagnetic radiation emitted by the CO₂ laser used for these experiments has a wave length of 10.6 μm, located at the region of the medium infrared of the electromagnetic spectrum. It is a non-ionizing radiation, able to cause photo-physical and photo-chemical effects as heating and molecular dissociation, respectively, as well as molecular rotations and vibrations (M. R. Moreno Virgen et al., 2011).



There is a very important relationship between porosity (the void ratio) and the compression strength. Therefore, in materials with multiple phases as the concrete, the sum of the porosity of the structure of each component is a limit for the resistance (López Orozco, 2004).

When fresh cement is irradiated, the water molecules vibrate producing a reset of the molecules of the hydrated cement, causing a reduction in the number of pores. Due this the material has a higher compressive strength.

3.3 Experimental methodology

3.3.1 Materials used

3.3.1.1 Cement

The binder used in the elaboration of hydraulic concrete mixes had the following specifications: Portland Concrete CPC 30 R based on the classification of the Mexican norm (NMX C-414-ONNCCE 2004, 2004); 30 MPa of compression strength at 28 days, 45 minutes (minimum) of initial setting time, and 600 minutes (maximum) of final setting time. This is one of the most commercially used types of cement in México. Table 1 shows the chemical composition of this cement. Hydraulic Concrete mix samples were prepared in 38mm x 76mm cylinders.



Chemical analysis	NMX-C-414-ONNCCE 2004 Specification	Value
SiO ₂	-	22.97 %
Al ₂ O ₃	-	4.53 %
Fe ₂ O ₃	-	2.72 %
CaOt	-	61.38 %
CaOl	-	0.47 %
MgO	-	1.46 %
SO ₃	4.0% máx.	2.61 %
Na ₂ O	-	0.65 %
K ₂ O	-	1.1 %

Table 1. Chemical composition of cement used (Soto Bernal et al., 2015).

3.3.1.2 Gravel

The coarse aggregate used was crushed basalt screened through a 12” granulometry sieve with ½” openings under the ASTM norm in order to get ½” maximum aggregate (ASTM E-11, 2015).

The ½” aggregate size limitation was made because of the test cylinder diameter, and the test cylinder diameter was limited by the optical arrangement inside the CO₂ laser which didn’t allow cylinders over 8.5 cm tall. In order to keep a height/diameter=2 relation, probes 3” tall with 1.5” diameter were adapted and the maximum aggregate size was defined by D/3 (one third of the diameter), all of this according to the Mexican norm (NMX C-169-ONNCCE 2009, 2004).

3.3.1.3 Sand

The fine aggregate used, was washed sand from alluvial quarries. Its fineness modulus (MF) = 2.5 based on the Mexican norm (NMX C-111-ONNCCE 2004, 2004) was determined in the laboratory.



3.3.2 Hydraulic concrete mix design

The concrete mix design was estimated based on ACI 211.1 (ACI 211.1-91, 2009) method, adjusting according to the humidity content of the aggregate to insure the correct Water/Cement (W/C) ratio. The mix was designed for three different compressive strengths: $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ and $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$.

3.3.2.1 Admixtures

“Laser radiation causes water molecules to vibrate and rotate uniformly and in a perpendicular direction to the propagation of the laser radiation” (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

“When molecules uniformly rotate, they produce an electric field in the same frequency as the field that caused said vibrations or rotations, which will spread to neighboring water molecules; It is true that the electric field produced or generated by the molecules is of less intensity than which made them vibrate, but it is also true that the stimulation source is constant. This will cause the electric field to spread over the volume and therefore polarize the water molecules in the same direction” (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

In order for the cement paste to have the effect described previously when irradiated with the laser, the paste must be fresh because in a hard paste the arrangement of particles is already defined and radiation at that moment stops having effects (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

Due to this effect, self-curing admixture was used. This admixture is patented by CEMEX S.A. de C.V. who provided the exact amount needed to produce 36 concrete cylinders. The goal of this admixture was to prevent the sudden loss of water in the fresh concrete,



controlling the dosage of water during the first hours of setting and accomplishing that water molecules vibrate and rotate the most time possible.

Samples were made both with and without admixture for all three different strengths, the same criteria was applied with radiated and non-radiated samples.

3.3.3 Manufacturing of the concrete samples and environmental conditions

The concrete was mixed accordingly to the (NMX C-159-ONNCCE 2004, 2004) norm, with a water/cement ratio of 0.53 ($f'c=250 \text{ kg/cm}^2$), 0.46 ($f'c=300 \text{ kg/cm}^2$) and 0.40 ($f'c=350 \text{ kg/cm}^2$); These ratios were obtained interpolating linearly the values of table ACI 211.1 (ACI 211.1-91, 2009), where the value of the water cement ratio is shown according to its compressive strength at 28 days in kg/cm^2 . The experiments took place in a closed laboratory where the environmental conditions (temperature and relative humidity) were controlled and registered. The environmental temperature oscillated between 15°C and 20°C .

3.3.4 Overview and power of laser radiation.

To define the amount of power to which the concrete samples would be exposed to, an evaluation took place where eight samples of the same compressive strength, four of which were not irradiated and the other four were irradiated with a different amount of power each (6.5, 5.5, 4.5 and 3.5 Watts). With power over 4.5 Watts the samples showed cracks caused by thermal shrinkage and sudden loss of water content as well as higher temperatures observed when compared to samples irradiated with 3.5 Watts of power. Samples irradiated with 3.5 Watts did not present cracks and concrete temperature was significantly lower than the rest of the samples. (See figures 1, 2, 3 and 4).

Calibration table of CO ₂ laser power					
Compressive strength design (kg/cm ²)	Power (watts)	Water/Cement	Temperature		compressive strength obtained(kg/cm ²)
			Top surface °C	Bottom surface °C	
250	6.5	0.5328	38.3	36.5	98.69
250	0	0.5328			125.12
250	5.6	0.5328	36.7	34.5	99.4
250	0	0.5328			124.86
250	4.5	0.5328	33.5	31.1	123.05
250	0	0.5328			138.32
250	3.5	0.5328	30.1	28.2	131.25
250	0	0.5328			135.94

Table 2. Table of powers with which experimentation was calibrated.



Figure 1 (left). Bottom side of concrete cylinder shows cracks due to sudden loss of water content and thermal shrinkage when simple is irradiated with 6.5 Watts.



Figure 2 (right). Top side of concrete cylinder shows cracks due to sudden loss of water content and thermal shrinkage when simple is irradiated with 6.5 Watts.



Figure 3 (left). No cracks appear at the top side of the concrete cylinder when the sample is irradiated with 3.5 Watts.

Figure 4 (right). No cracks appear at the bottom side of the concrete cylinder when the sample is irradiated with 3.5 Watts.

As part of the characterization of the mechanical properties, compressive strength was evaluated at 3, 7 and 28 days.

Microstructural characterization for Raman spectrum of hydraulic concrete samples irradiated and non-irradiated was obtained. The irradiated samples were exposed to a treatment CO₂ laser radiation at 10.6 μm (at an optical radiation power 3.5 Watts) immediately after being manufactured. The irradiation time was 3.5, 4.5, and 5.8 hours for relations of W/C 0.4, 0.46 and 0.53 respectively.

Samples are stored in humid conditions cured at a temperature close to 20 °C and a relative humidity greater than 95%.

The laser radiation of the concrete samples was done with a model Synrad 60W CO₂; and the power employed was 3.5 Watts of optical power measured with a model 12PDC001 optical power meter, and a PDH007 head with a power range from 100mW – 50mW and a resolution of 10 mW. Laser radiation was applied with an optical arrangement at the top face of the cylinder. (See Figure 5).

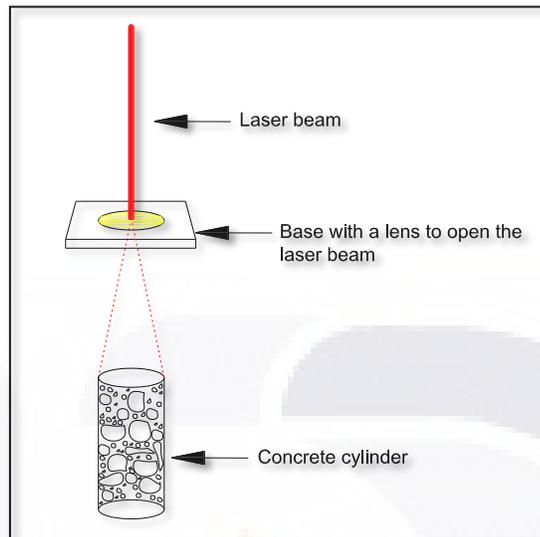


Figure 5. Optical arrangement used. Laser radiation was applied using an optic system on the top face of the cylinder

Temperature of the samples was measured with a Fluke 63 infrared thermometer right after radiation was applied on both the top and bottom surface.

3.3.5 Characterization test of hardened hydraulic concrete samples

3.3.5.1 Establishment of hydraulic concrete samples compressive strength

Thirty-six 38 mm x 76 mm hydraulic concrete cylindrical samples were fabricated for each laser radiation power value. These samples were tested for compression at 3, 7 and 28 days. As mentioned before, the samples were divided into three compressive strength designs: $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$, $f'_c=300 \text{ kg/cm}^2$ y $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$. Out of the 36 samples, admixture was added to 18 of them, no admixtures were added on the rest. Samples were tested on a model PILOT 4 hydraulic press of the CONTROLS brand.



3.3.5.2 Raman spectroscopy

Raman spectroscopy is a reliable tool for research and to characterize cement and its phases (Bogue, 1948) (Nambiar & Krishnamurthy, 1984). Micro-Raman Spectroscopy is also used in the identification of different phases of cement (Ortiz, Aguado, Agulló, & García, 2005) (Almusallam, 2001).

This tool was used in concrete samples in a hard state in order to identify crystal formations in irradiated and non-irradiated cement (Moreno Virgen et al., 2011).

Once the concrete cylinders were tested for compression, each probe was separated independently in a marked bag in order to prevent contamination of the other samples and to obtain cement dust and analyze it on a Raman microscope. A THERMO SCIENTIFIC DXR 2 Raman microscope was used to obtain the specters.

3.4 Results

3.4.1 Compressive strength results of hydraulic concrete samples

Figure 6a, 6b and 6c show a direct relationship between the curing time and the compressive strength of hydraulic concrete samples. A decrease of compressive strength in irradiated samples is found when compared to non-irradiated samples. For example, Figure 6a shows compressive strength after 28 days of a sample exposed to a laser radiation of 3.5 Watts is 24% lower than the non-irradiated sample.

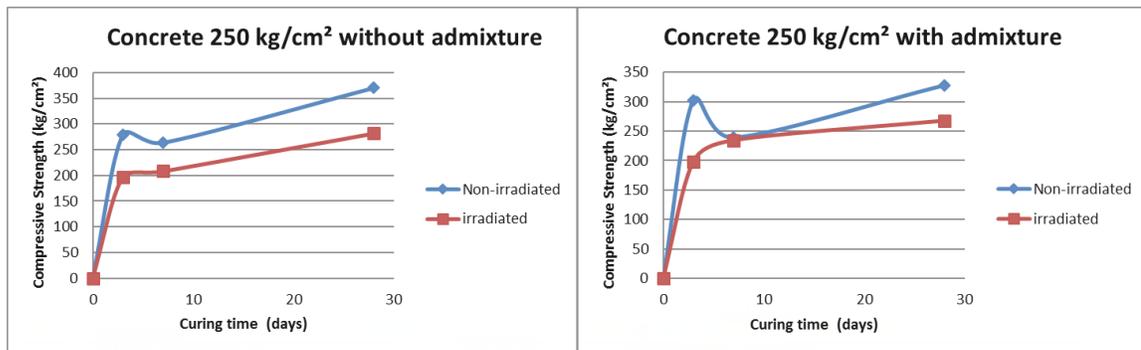


Figure 6a. Evolution of the compressive strength of the irradiated concrete samples against non-irradiated samples under the same condition of laser radiation ($10.6 \mu\text{m}$) with a 3.5 Watts power. Design Resistance $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ (Left without admixture, Right with admixture).

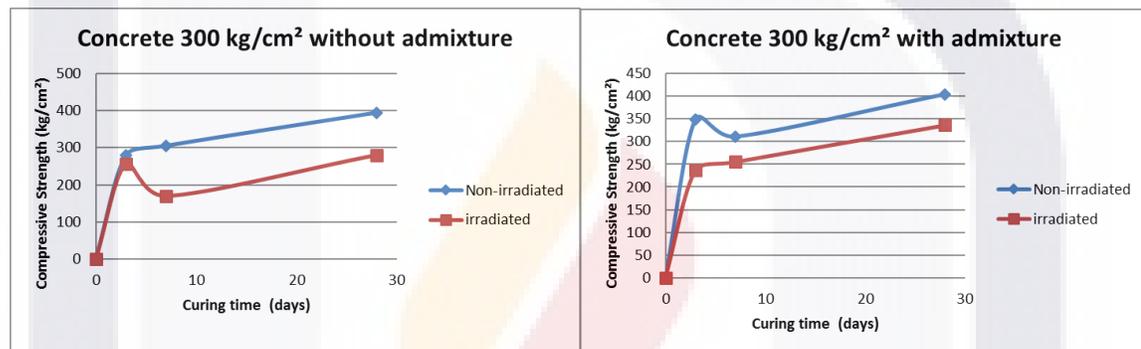


Figure 6b. Evolution of the compressive strength of the irradiated concrete samples against non-irradiated samples under the same condition of laser radiation ($10.6 \mu\text{m}$) with a 3.5 Watts power. Design Resistance $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ (Left without admixture, Right with admixture).

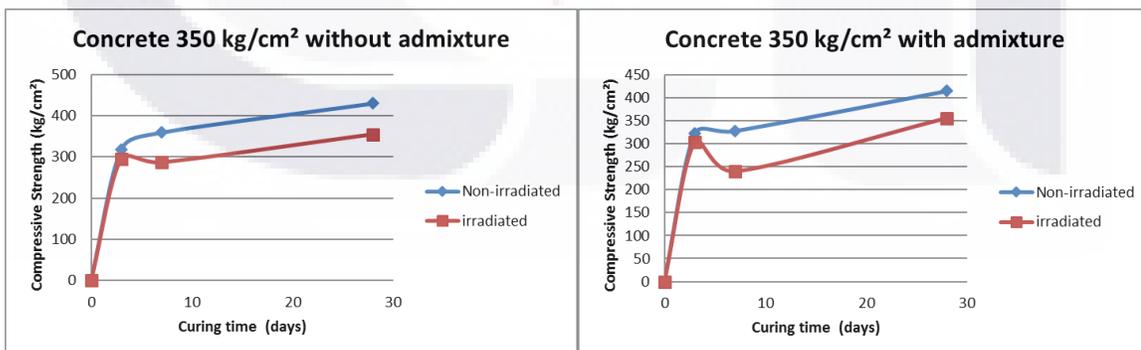


Figure 6c. Evolution of the compressive strength of the irradiated concrete samples against non-irradiated samples under the same condition of laser radiation ($10.6 \mu\text{m}$) with a 3.5 Watts power. Design Resistance $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (Left without admixture, Right with admixture).

3.4.2 Results of the Raman Spectroscopy of the Hydraulic Concrete Samples

The figure 7a shows the graph of the obtained spectrum with the Raman microscope from two samples with compressive strength $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, without self-curing admixture; it is shown, the spectrum of the irradiated sample and the non-irradiated sample.

The figure 7b shows the graph of the obtained spectrum with the Raman microscope from two samples with compression strength $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, with self-curing admixture; it is shown, the spectrum of the irradiated sample and the non-irradiated sample.

Changes can be observed in the main compounds as it is shown in the graph of the cement paste (See figure 7c). In the wave number 1078 cm^{-1} , we can identify the creation of dicalcium silicate ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), which is known as belite, a main constituent of the Portland Cement and it is responsible for the long-term mechanical strength, as well as the Gypsum ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), located at the peak $1,279 \text{ cm}^{-1}$ (Soto Bernal et al., 2015).

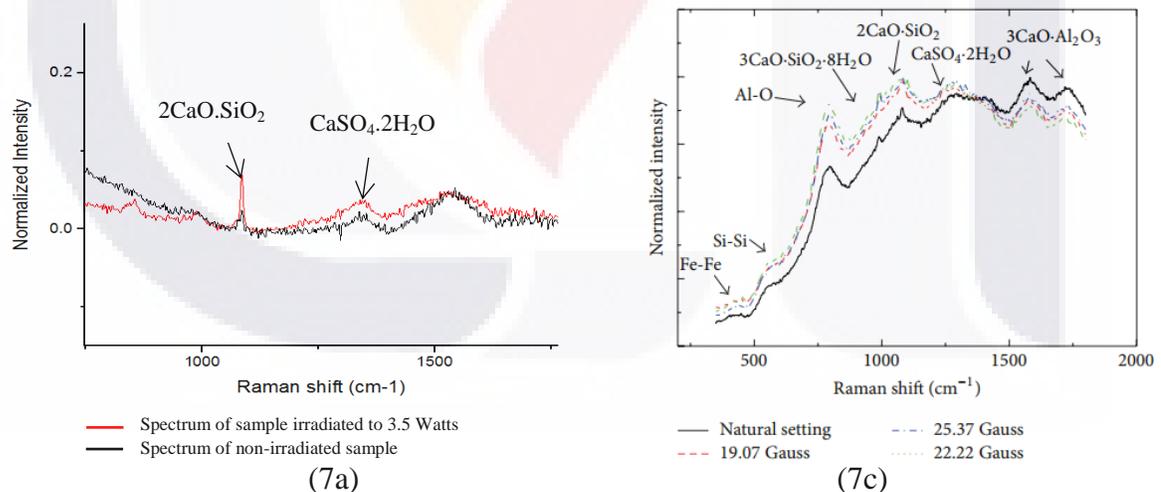


Figure 7a. Raman Spectrum of the concrete sample without self-curing admixture irradiated against non-irradiated, after 28 days.

Figure 7c. Raman Spectrum of the cement paste sample subjected to magnetostatic fields (Soto Bernal et al., 2015).

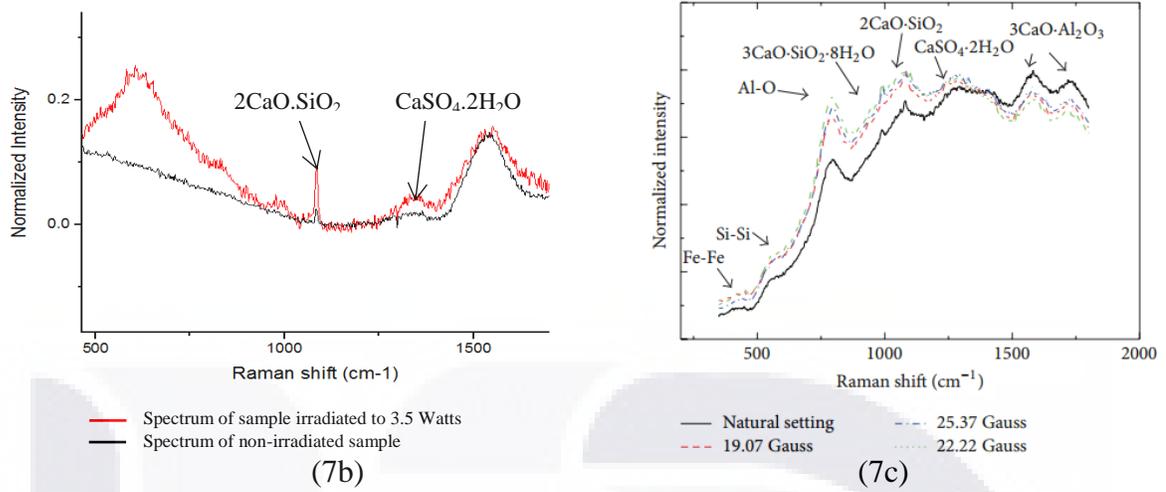


Figure 7b. Raman Spectrum of the concrete sample with self-curing admixture irradiated against non-irradiated, after 28 days.

Figure 7c. Raman Spectrum of the cement paste sample subjected to magnetostatic fields (Soto Bernal et al., 2015).

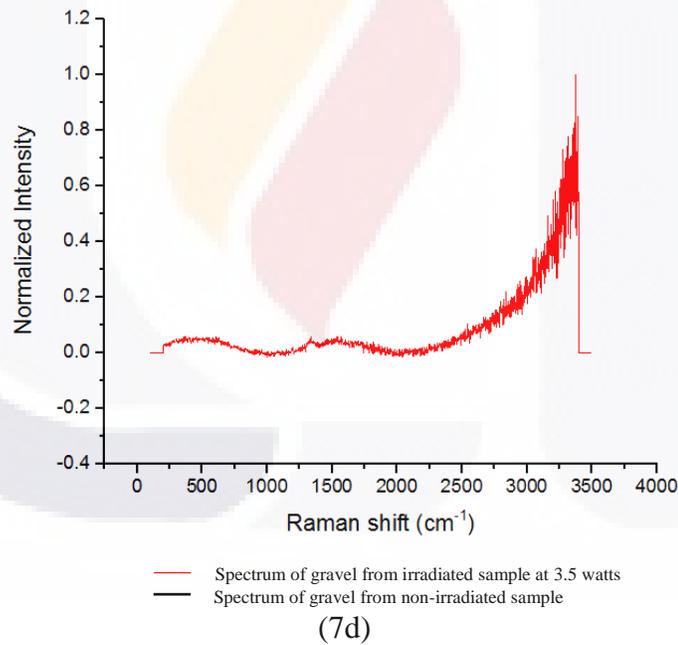


Figure 7d. Raman Spectrum of the gravel from an irradiated sample against gravel from a non-irradiated sample.

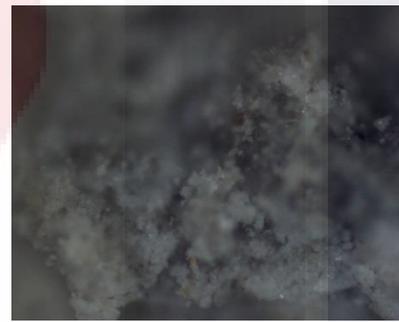


In Figure 7d, it can be observed that the gravel does not suffer changes regarding the crystal formation since the crystals are already formed and defined. The peaks between irradiated gravel against non-irradiated gravel are not observed and we can determine that the gravel components are not modified under the effect of the radiation CO₂ laser beam with a 3.5 Watts power.

When molecules uniformly rotate, they produce an electric field in the same frequency as the field that caused said vibrations or rotations, which will spread to neighboring water molecules (M. del R. Moreno Virgen, 2010). In figures 8a and 8b it is observed how, due to the vibration effect, there is a better reshuffle of the cement microstructure, causing a less number of voids, unlike images 8b and 8d.



(8a)



(8b)

Figure 8a. Photography of the microstructure with Raman microscope of the cement from irradiated sample. Compressive strength design $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, without self-curing admixture at 28 days.

Figure 8b. Photography of the microstructure with Raman microscope of the cement from non-irradiated sample. Compressive strength design $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, without self-curing admixture at 28 days.



(8c)



(8d)

Figure 8a. Photography of the microstructure with Raman microscope of the cement from irradiated sample. Compressive strength design $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$, with self-curing admixture at 28 days.

Figure 8b. Photography of the microstructure with Raman microscope of the cement from non-irradiated sample. Compressive strength design $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$, with self-curing admixture at 28 days.

3.4.3 Results of temperature after radiation

Temperature was taken after the radiation of each sample on the top and bottom surfaces. The next figures 9a, 9b, 9c, 9d, 9e and 9f, it is shown how the non-irradiated samples present a higher temperature on the bottom surface compared with the top one; in contrast, irradiated samples showed a higher temperature on the top surface compared with the bottom one. They also present a considerable rise of temperature by effect of the laser beam on the sample.

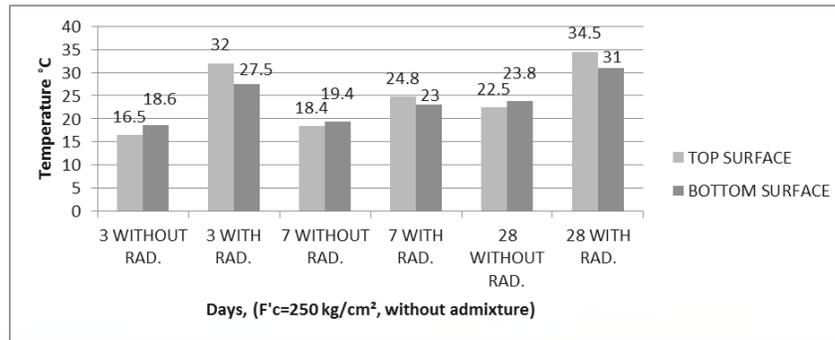


Figure 9a. Temperatures of the samples of 3, 7 and 28 days, taken immediately after radiation. Design Resistance $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, without self-curing admixture.

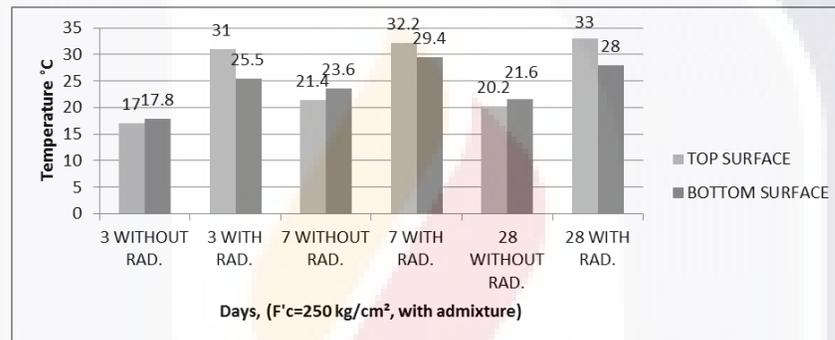


Figure 9b. Temperatures of the samples of 3, 7 and 28 days, taken immediately after radiation. Design Resistance $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, with self-curing admixture.

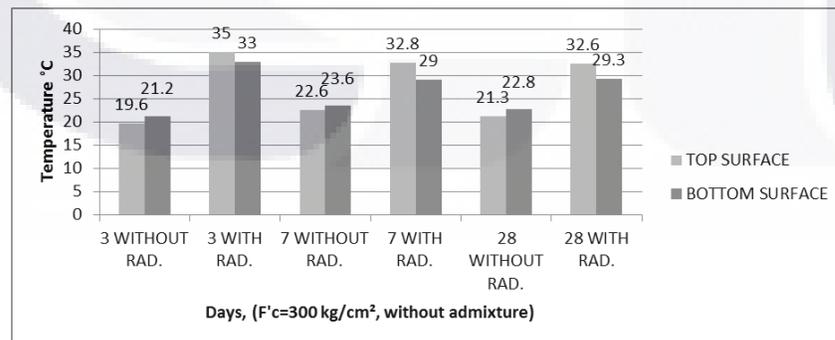


Figure 9c. Temperatures of the samples of 3, 7 and 28 days, taken immediately after radiation. Design Resistance $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, without self-curing admixture.

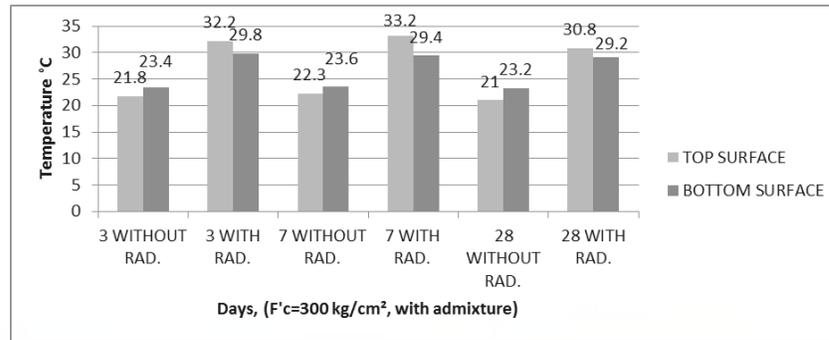


Figure 9d. Temperatures of the samples of 3, 7 and 28 days, taken immediately after radiation. Design Resistance $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, with self-curing admixture.

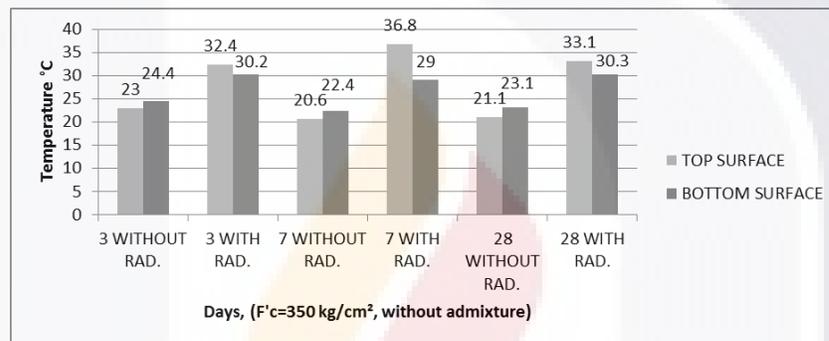


Figure 9e. Temperatures of the samples of 3, 7 and 28 days, taken immediately after radiation. Design Resistance $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, without self-curing admixture.

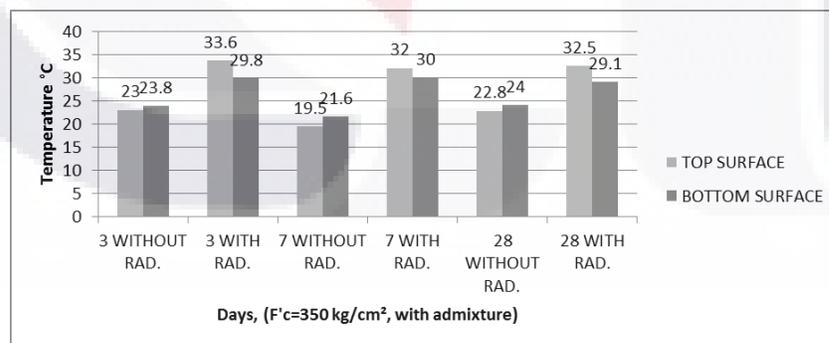


Figure 9f. Temperatures of the samples of 3, 7 and 28 days, taken immediately after radiation. Design Resistance $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, with self-curing admixture.



The maximum temperature of the concrete, produced by heated materials to compensate low temperatures, should not exceed 32°C whether during the manufacturing process and the set of the concrete (N·CMT·2·02·005/04, 2004). The temperature on the top surface of the irradiated samples mostly exceeds the 32°C .

3.5 Discussion

Figures 6a, 6b and 6c show a direct relation between setting time and compression strength in concrete samples, exposing a decrease of compressive strength of the irradiated samples when compared to the non-irradiated. For example, figure 6a shows that compressive strength after 28 days of a sample radiated with a 3.5 Watts laser power, decreased 24% when compared to the sample that set naturally.

Setting time for cement-based materials considerably decreases due to the effect of the radiation when compared to naturally setting samples (M. del R. Moreno Virgen, 2010). This is the case for concrete samples of this study, which were radiated until setting and until radiation no longer affected the cement because it crystallized and hardened. Just after being extracted from the laser the irradiated samples showed a harder consistency than the non-irradiated, which were still setting and had a softer consistency.

Most of the infrared radiation (IR) emitted by the laser is absorbed on the surface by the cement paste molecules, causing photo-physic and photo-chemical reactions. This event causes the rising of temperature and molecular dissociation in the region where the laser contacts the sample directly (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

Laser radiation over fresh concrete samples augmented the temperature in the top side of the sample where temperatures over 32°C were measured. Exceeding the temperature recommended by norm (N·CMT·2·02·005/04, 2004). This norm recommends not to exceed



a certain temperature in order to avoid the sudden loss of water. Thermic retraction, at high temperatures, generated by the changes of the concrete's hydration process produces tension and compressions that the concrete is not capable of bearing, this generates micro cracks which cause a decrease of compressive strength (Bažant, 1983).

Because water molecules arrange around the binder functional groups, when they rotate around the electric field an effect equivalent to micro-vibrations is produced. This effect consequently produces a material that is more compact and has less pores when compared to a naturally setting material causing the first material to have better mechanic properties (M. R. Moreno Virgen et al., 2011). Given that the results of this study show a decrease of mechanic properties on irradiated concrete, Raman spectroscopy was used to analyze if the cement in the hydraulic concrete mix was having a positive effect under radiation.

Figures 8a and 8c, which show photographs of the microstructure of cement dust used in the irradiated hydraulic concrete samples, with and without admixtures respectively, confirm that the samples, because of the micro-vibrations, are indeed more compact than the non-irradiated cement dust. A picture of this non-irradiated cement dust can be seen in figures 8b and 8d.

Figures 7a and 7b, display that the hydraulic concretes cement is microstructurally modified by radiation. Changes can be observed in the main compounds as it is shown in the graph of the cement paste (See figure 7c). In the wave number 1078 cm^{-1} , we can identify the creation of dicalcium silicate ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), which is known as belite, a main constituent of the Portland Cement and it is responsible for the long-term mechanical strength, as well as the Gypsum ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), located at the peak $1,279 \text{ cm}^{-1}$ (Soto Bernal et al., 2015).



Figure 7d, the irradiated gravel spectrum against non-irradiated gravel spectrum, doesn't show changes in the components. This means that gravel doesn't presents microstructural changes caused by radiation, as its crystals are well defined.

3.6 Conclusions

CO₂ (10.6 μm) laser radiation at a 3.5 Watt power, influences negatively on the mechanical properties of concrete, this is due to the electric field propagates only in the hydrated cement of the top surface and not on the total volume of the samples, aggregates preventing the propagation of the electric field generates by radiation. Therefore, water molecules rotation, arranged around the binder functional groups, is only generated in the cement exposed to radiation until the electric field meets the aggregate and breaks the propagation of said field. Because the aggregates don't experience radiation-induced changes, when they are reached by the electric field they absorb energy and release it as heat. This heat added to the temperature generated by the laser, cause a rise of temperature at the top face of the hydraulic concrete samples.

The rise of temperature generated by the heat released by the aggregate, plus the temperature generated by the laser, exceed the temperature recommended by the norm (N·CMT·2·02·005/04, 2004) to avoid the sudden loss of water and micro-cracks caused by thermal retraction, which affect the mechanical properties of concrete.

The hydraulic concrete does not show improvements in its mechanical properties when subjected to laser radiation. Since the temperature exceeds 32 °C, this explains the decrease in compressive strength of the irradiated samples against non-irradiated.



Setting times of concrete samples experienced a considerable decrease due to the 3.5 Watts laser radiation with which the samples were irradiated.

3.7 Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to institutions and individuals involved in this study. Thanks to CONACYT, for its financial support during the course of master and to cover the costs of the experimental campaign.



CAPÍTULO IV CONCLUSIONES **Y PERSPECTIVAS**



4 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

4.1 Conclusiones generales

La radiación con láser de CO₂ (10.6 μm) con potencia de 3.5 Watts influye negativamente en las propiedades mecánicas del concreto, debido a que el campo eléctrico únicamente se propaga en el cemento hidratado de la superficie superior y no en el volumen total de las muestras, ya que los agregados evitan que se propague dicho campo generado por la radiación. Por lo tanto, la rotación de las moléculas de agua que se disponen alrededor de los grupos funcionales del aglutinante, solo se genera en el cemento expuesto a la radiación hasta un punto en donde el campo eléctrico se encuentra con el agregado e interfiere con la propagación de dicho campo. Dado que los agregados no sufren cambios por efecto de la radiación, al ser alcanzados por el campo eléctrico absorben la energía y la liberan en forma de calor. Este calor sumado a la temperatura generada por el láser provoca un aumento de temperatura en la superficie superior de las muestras de concreto hidráulico.

El aumento de la temperatura generada por el calor que libera el agregado sumada a la temperatura generada por el láser, sobrepasa la temperatura máxima de 32°C recomendada por la Norma (N·CMT·2·02·005/04, 2004) para evitar pérdida repentina de agua y microfisuras por retracción térmica, que afectan las propiedades mecánicas del concreto hidráulico.

El concreto hidráulico no muestra mejoras en sus propiedades mecánicas cuando se somete a radiación láser. Dado que la temperatura sobrepasa los 32°C, esto explica la disminución de la resistencia a la compresión de las muestras irradiadas contra las no irradiadas.



Los tiempos de fraguado para las muestras de concreto sufrieron una reducción considerable por efecto radiación láser con potencia de 3.5 Watts, con la cual se irradiaron las muestras.

En base a los resultados obtenidos en este estudio experimental, podría concluirse que la metodología expuesta y aplicada en esta Tesis, no satisface los requerimientos prácticos y de tipo industrial en el área de Tecnología del Concreto, pues se observó que no hay ganancia en cuanto a resistencia mecánica se refiere.

4.2 Conclusiones particulares

En las figuras 6a, 6b y 6c se identifica una relación directa entre el tiempo de curado y la resistencia a la compresión de las muestras de concreto, encontrando una disminución en la resistencia a la compresión de las muestras irradiadas contra las no irradiadas. Por ejemplo, en la figura 6a izquierda, la resistencia a la compresión a los 28 días de una muestra de concreto sometida a radiación láser a 3.5 Watts, disminuyó en un 24% con respecto a la que fraguó en forma natural.

Los tiempos de fraguado para las muestras de materiales base cemento sufren una reducción considerable por efecto de la radiación en comparación a las muestras que fraguaron en forma natural (M. del R. Moreno Virgen, 2010). Tal es el caso de las muestras de concreto hidráulico de este estudio, las cuales se irradiaron hasta alcanzar su fraguado y hasta el tiempo en donde la radiación ya no influye sobre el cemento, ya que este se encuentra cristalizado y en estado endurecido. Desde la apreciación personal la muestra irradiada justo en el instante después de extraerla del láser mostraba una consistencia más dura que la no irradiada la cual aún seguía fraguando y tenía una consistencia pastosa.



La mayor parte de la radiación infrarroja (IR) emitida por el láser es absorbida en la superficie por las moléculas de la pasta de cemento, produciendo reacciones foto-físicas y foto-químicas, originando el aumento de temperatura y la disociación molecular solamente en la región que recibe de manera directa la radiación láser (M. del R. Moreno Virgen, 2010).

La radiación láser sobre las muestras de concreto en estado fresco aumentó la temperatura en la superficie superior en donde se generaron temperaturas mayores a 32°C que se recomienda por norma no sea excedida para que no se produzcan daños en la microestructura (N·CMT·2·02·005/04, 2004), sin embargo, si es posible que pueda excederse sin generar daños en el concreto. Esta norma recomienda no exceder dicha temperatura para evitar la pérdida repentina de agua. La retracción térmica generada por los cambios a altas temperaturas en el proceso de hidratación del concreto produce tensiones y compresiones que el concreto no es capaz de resistir, generando microfisuras y manifestando una disminución en la resistencia a la compresión (Bažant, 1983).

Como las moléculas de agua se disponen alrededor de los grupos funcionales del aglutinante, al rotar con respecto al campo eléctrico aplicado se tendría un efecto equivalente a micro vibraciones que, en consecuencia, producirán un material más compacto y con una cantidad menor de poros con respecto al fraguado natural, lo que conlleva tener un material con mejores propiedades mecánicas (M. R. Moreno Virgen et al., 2011). Dado que los resultados del estudio presentan disminución en las propiedades mecánicas del concreto irradiado, se analizó por medio de espectroscopia Raman si el cemento de la mezcla de concreto hidráulico estaba teniendo efecto positivo bajo el efecto de la radiación.

Las figuras 8a y 8c que corresponden a las fotografías de la microestructura del polvo de cemento de las muestras de concreto hidráulico irradiado con y sin aditivo respectivamente, dejan ver que efectivamente por efecto de las microvibraciones se obtiene un material más



compacto en comparación con la microestructura del polvo de cemento sin irradiar que corresponden a las figuras 8b y 8d.

En las figuras 7a y 7b, se demuestra que el cemento del concreto hidráulico está siendo modificado microestructuralmente a causa de la radiación. Los cambios pueden ser observados en los principales componentes tal como aparece en el gráfico de las pastas de cemento de investigaciones previas (ver figura 7c). En el número de onda de 1078 cm^{-1} podemos identificar la creación del silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) el cuál es conocido como belita, que es un constituyente principal del cemento portland y es responsable de la resistencia mecánica a largo plazo, así como el yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que se encuentra localizado en el pico de 1279 cm^{-1} (Soto Bernal et al., 2015).

En la figura 7d, el espectro de grava irradiada contra la grava no irradiada no presenta cambios en los componentes. Es decir, la grava no tiene cambios microestructurales por efecto de la radiación, pues sus cristales están bien definidos.

4.3 Perspectivas

En esta primera campaña de experimentación de concreto hidráulico irradiado con láser CO_2 se determinó que no hubo mejoras en las propiedades mecánicas de los cilindros. Dado que se encontró la razón de porque el concreto hidráulico está teniendo estos efectos negativos, se generaron muchas ideas alternativas para intentar lograr efectos positivos en las propiedades mecánicas de las muestras. En estudios anteriores, se logró el mismo efecto en la microestructura de pastas de cemento, sometiendo muestras a campos magnetoestáticos.



Para estudios posteriores en esta área de investigación se recomienda:

- Estudiar si algún tipo de agregado grueso sufre cambios en su microestructura por efecto de la radiación láser CO₂.
- Irradiar muestras de concreto hidráulico de las mismas dimensiones, pero con potencias menores a 3.5 Watts y valorar los resultados.
- Irradiar muestras de concreto hidráulico de las mismas dimensiones, pero con T.M.A. menores a 1/2”.
- Realizar una campaña experimental de resistencia a la compresión de cilindros más grandes guardando su relación diámetro/altura=0.5, siempre y cuando las dimensiones de la máquina láser lo permitan.
- Realizar la misma campaña experimental del punto anterior, pero sometiendo los cilindros a campos magnetostáticos y eléctricos.

REFERENCIAS

ACI 211.1-91. (2009). Proporcionamiento de materiales para el diseño de mezclas de concreto de peso normal y denso.

Almusallam, A. A. (2001). Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 353-361. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00007-5](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00007-5)

ASTM E-11. (2015). Especificaciones estándar para tela de malla alambre y tamices utilizados para ensayos.

Bazant, Z. P. (1983). Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature. *Nuclear Engineering and Design*, 76(2), 183-191. [http://doi.org/10.1016/0029-5493\(83\)90133-4](http://doi.org/10.1016/0029-5493(83)90133-4)

Bogue, R. H. (1948). The Chemistry of Portland Cement. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 52(2), 434-434. <http://doi.org/10.1021/j150458a021>



Gómez Heras, M., Molpereces, C., Ocaña, J. L., Morcillo Linares, M., & Fort, R. (2008). Calentamiento por láser: una técnica mínimamente invasiva para el estudio del calentamiento producido por el fuego en materiales pétreos de construcción. *Materiales de construcción*, 58, 289–290.

López Orozco, J. O. (2004, enero). *Porosidad del Concreto* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Retrieved from http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2394_C.pdf

Moreno Virgen, M. del R. (2010, June). *Influencia de la radiación láser CO2 en las propiedades mecánicas de la pasta de cemento y su caracterización* (Tesis). Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, Qro. Retrieved from <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6811>

Moreno Virgen, M. del R., Soto Bernal, J. J., Frausto Reyes, C., Bonilla Petriciolet, A., Vega Duran, J. T., Pineda Piñon, J., & Ortíz Lozano, J. A. (2011). Laser radiation CO2 effects in cement paste at different hydration stages. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, 12(3). Retrieved from https://works.bepress.com/adrian_bonilla_petriciolet/223/

Moreno Virgen, M. R., Soto Bernal, J. J., Ortiz Lozano, J. A., Bonilla Petriciolet, A., Vega Duran, J. T., Gonzalez Mota, R., & Pineda Pinon, J. (2011). Influencia de la radiación láser de CO2 en las propiedades mecánicas de pastas de cemento Portland. *Materiales de construcción*, 61(301), 77–91.

N·CMT·2·02·005/04. (2004). Normas de Calidad del Concreto Hidráulico. Retrieved from <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-005-04.pdf>

Nambiar, O. N. N., & Krishnamurthy, V. (1984). Control of temperature in mass concrete pours. *Indian Concrete Journal*, 58(3), 67–73.

National Ready Mixed Concrete Association. (2003). CIP 35-Testing compressive strength of concrete. *Concrete in Practice- What, Why & How?*, 35, 2.

NMX C-111-ONNCCE 2004. (2004). Industria de la construcción - agregados para concreto hidráulico - especificaciones y métodos de prueba.

NMX C-159-ONNCCE 2004. (2004). Industria de la construcción-Concreto -Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.

NMX C-169-ONNCCE 2009. (2004). Industria de la construcción-concreto-extracción de especímenes cilíndricos o prismáticos de concreto hidráulico endurecido.

NMX C-414-ONNCCE 2004. (2004). Industria de la construcción-Cementos hidráulicos-Especificaciones y Métodos de prueba.



Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., & García, T. (2005). Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1970–1979. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.01.004>

Rao, B. T., Kumar, H., & Nath, A. K. (2005). Processing of concretes with a high power CO₂ laser. *Optics & Laser Technology*, 37(5), 348–356. <http://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.05.001>

Soto Bernal, J. J., Gonzalez Mota, R., Rosales Candelas, I., & Ortiz Lozano, J. A. (2015). Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, e934195. <http://doi.org/10.1155/2015/934195>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES



ANEXOS



ANEXO A

A continuación, se anexan las imágenes de los espectros de las muestras analizadas.

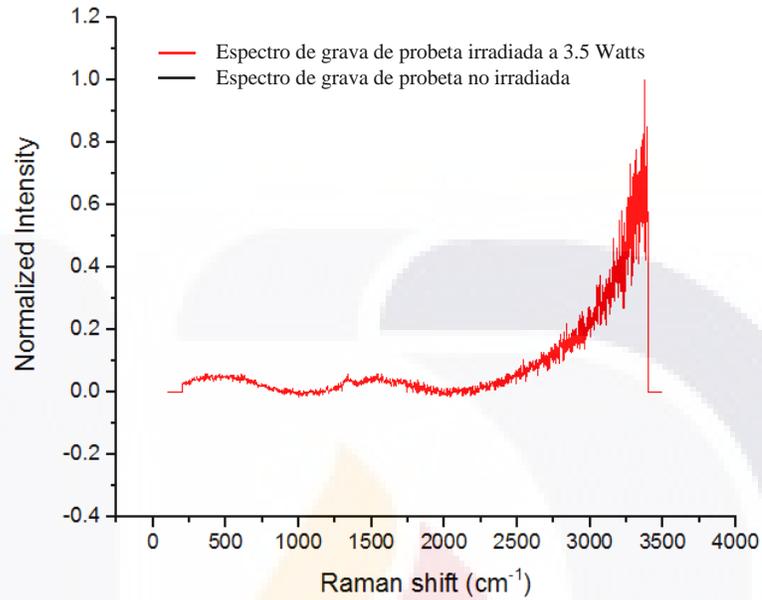


Figura 10. Espectro Raman de grava de una probeta irradiada en comparación con grava de una probeta no irradiada.

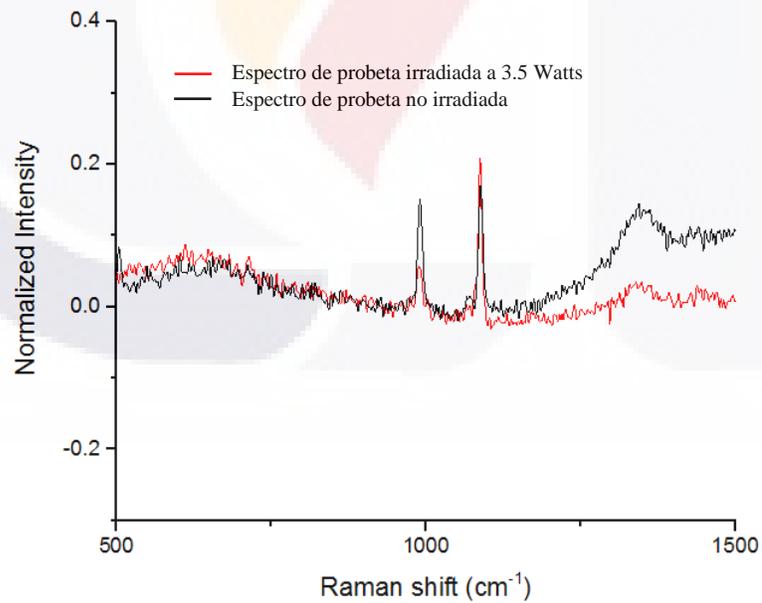


Figura 11. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

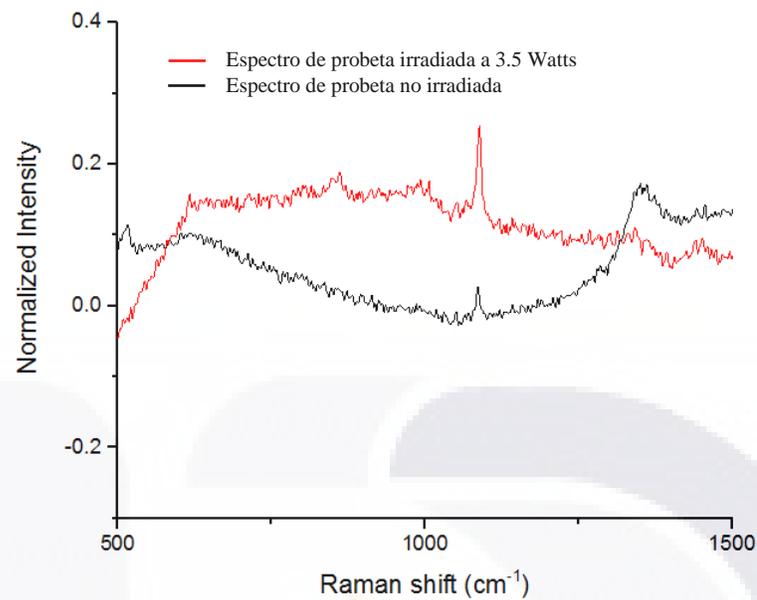


Figura 12. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

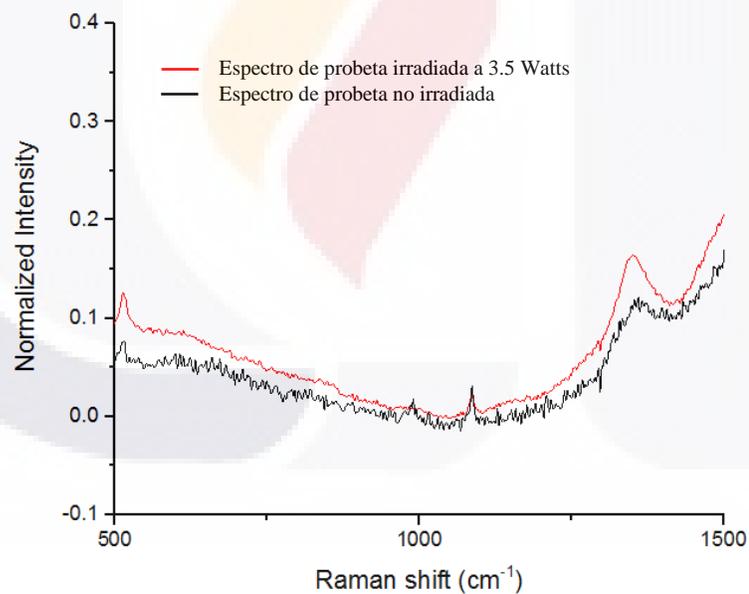


Figura 13. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

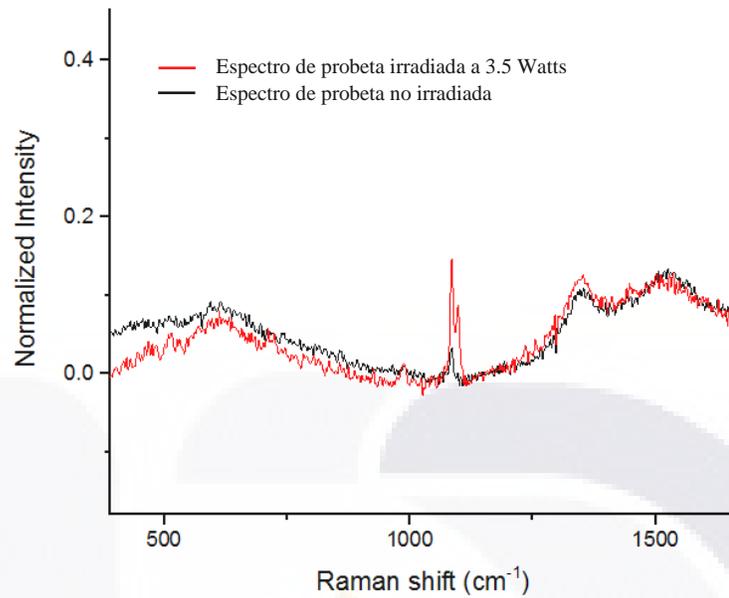


Figura 14. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 28 días de elaboración.

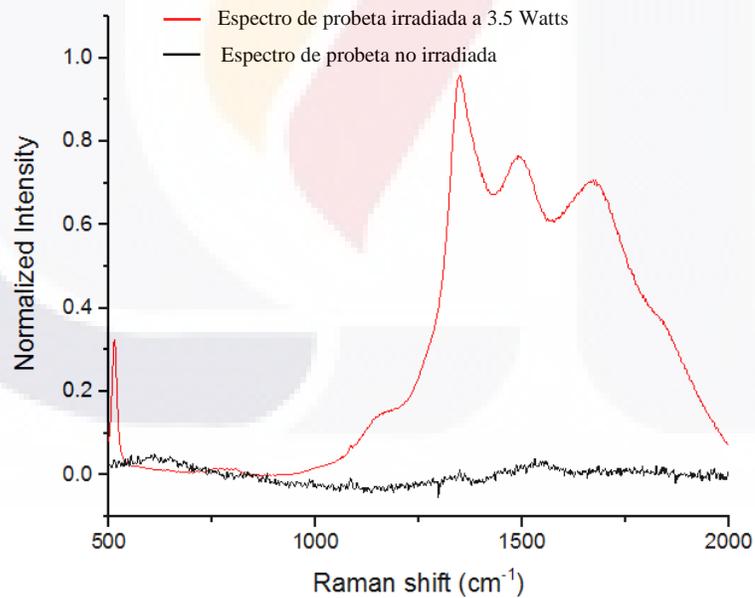


Figura 15. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

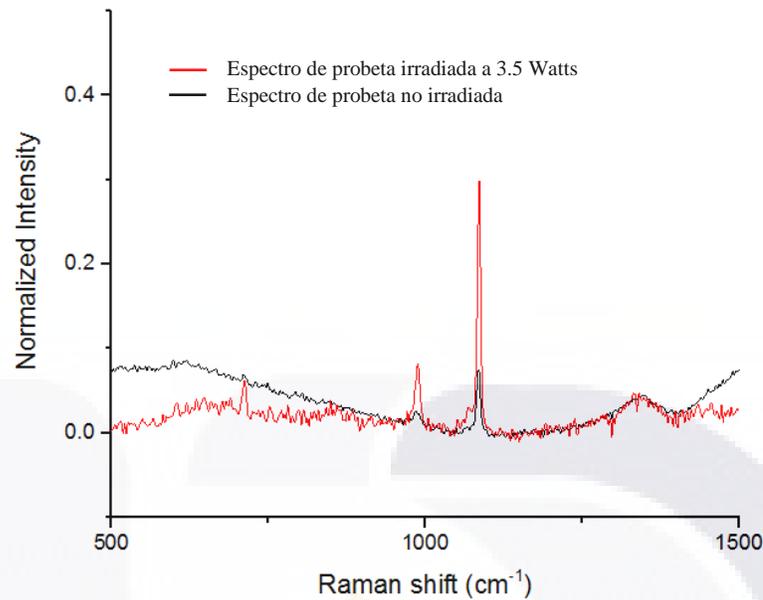


Figura 16. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f^c=250 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

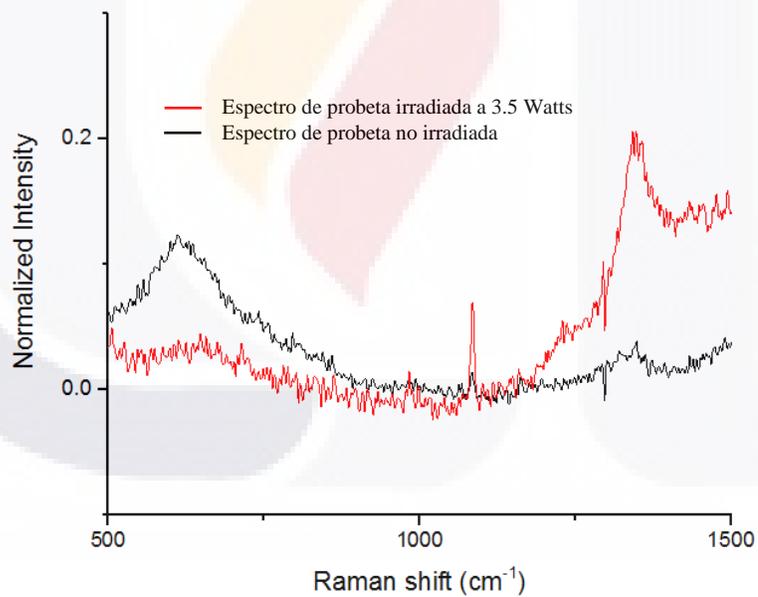


Figura 17. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f^c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

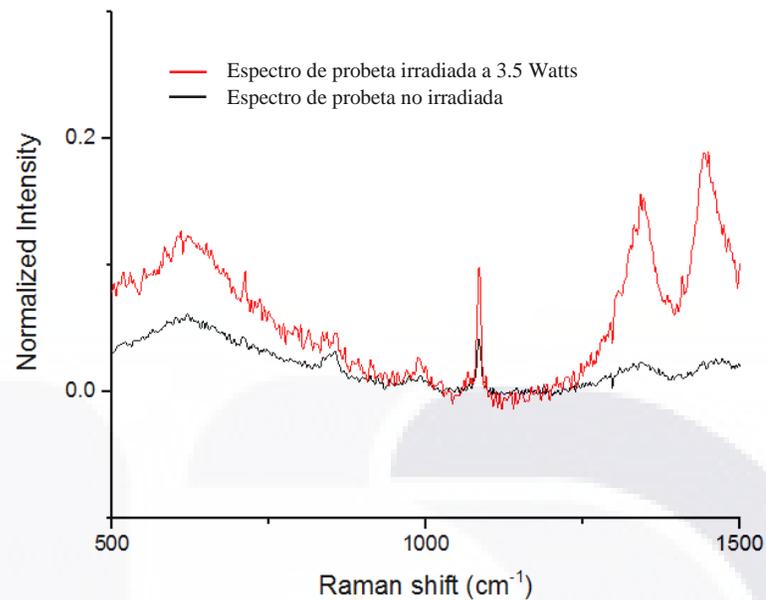


Figura 18. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

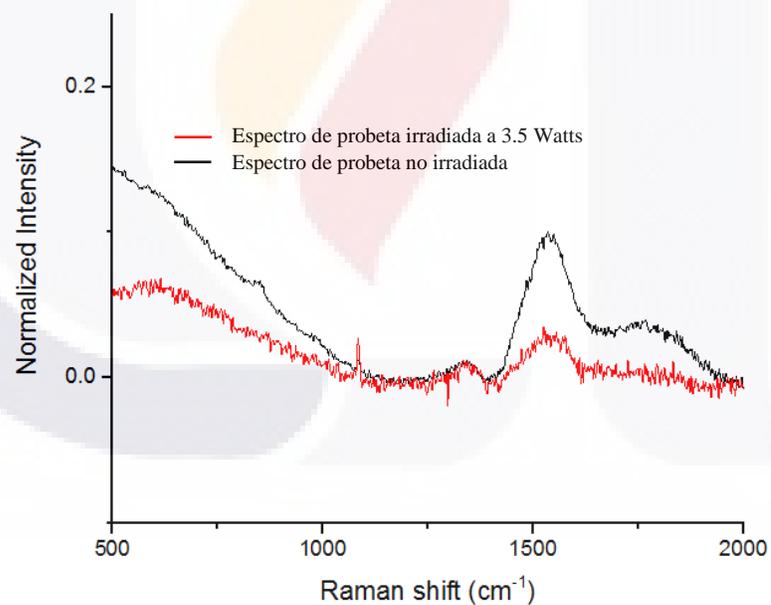


Figura 19. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

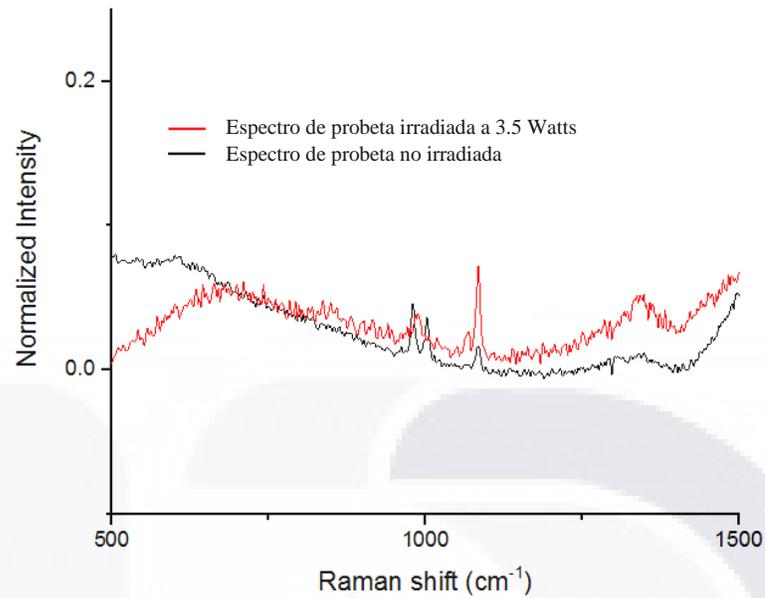


Figura 20. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 7 días de elaboración.

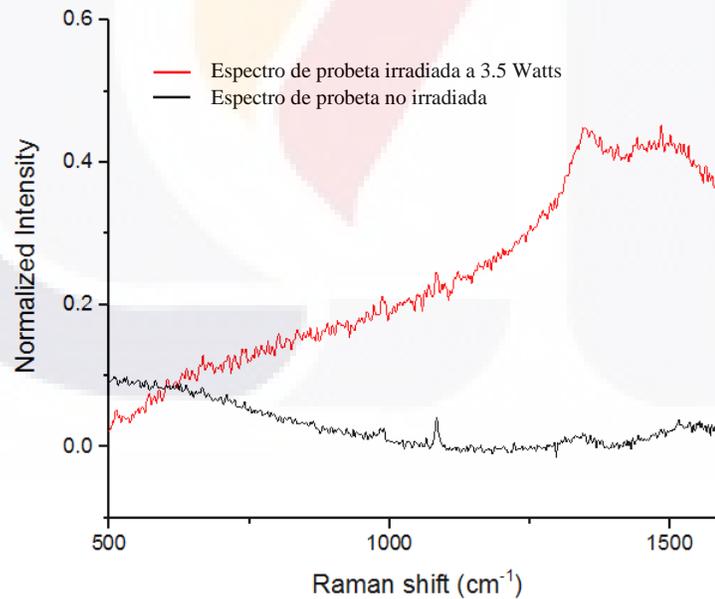


Figura 21. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

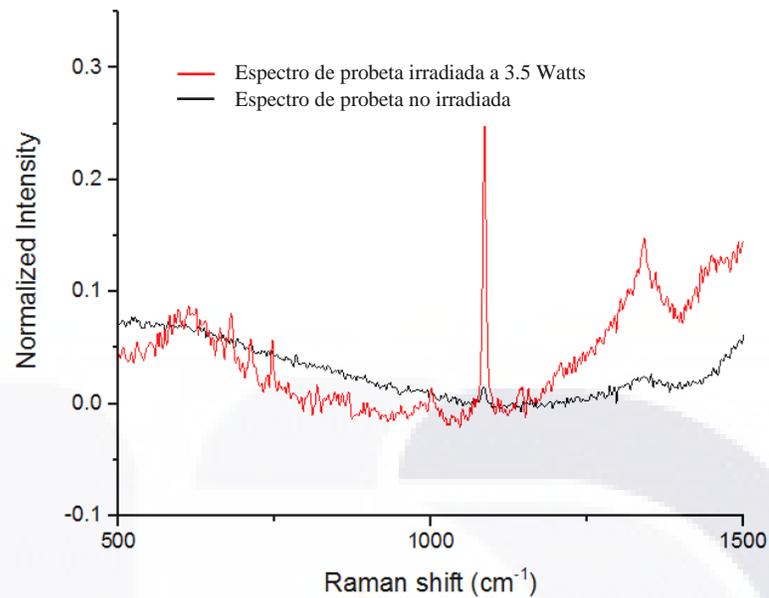


Figura 22. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

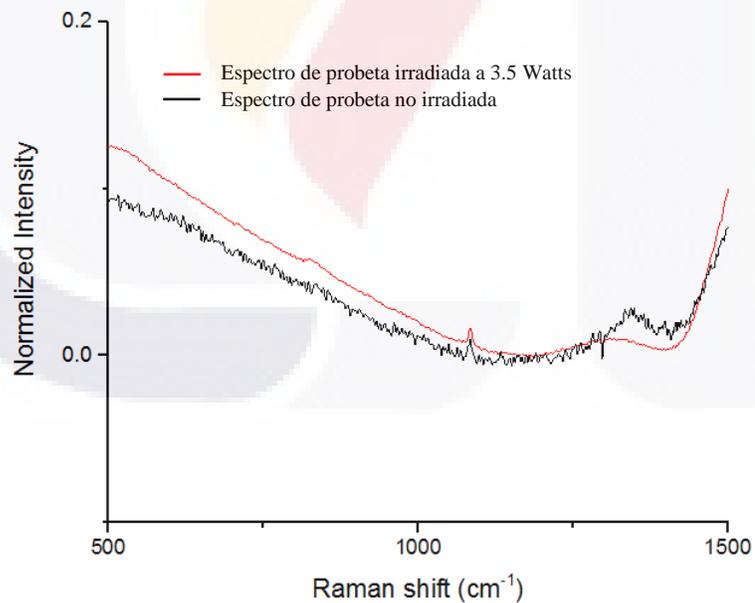


Figura 23. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

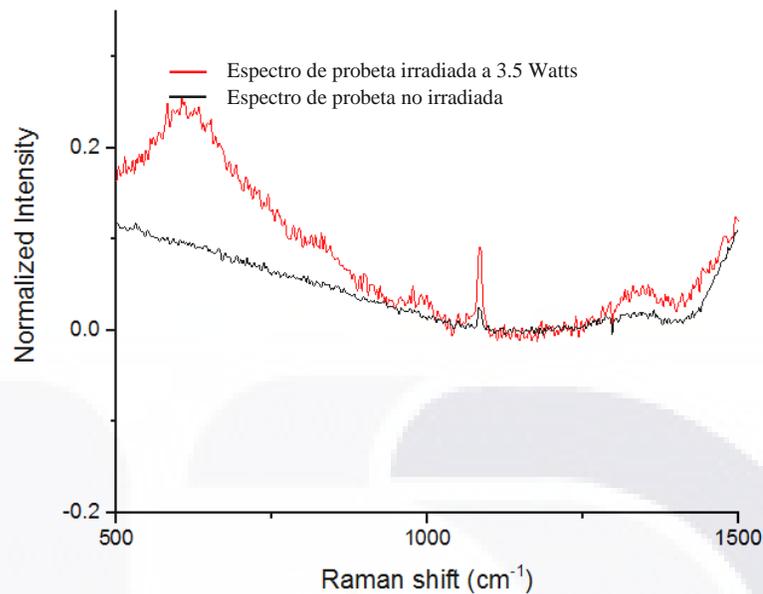


Figura 24. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f^c=350 \text{ kg/cm}^2$ sin aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.

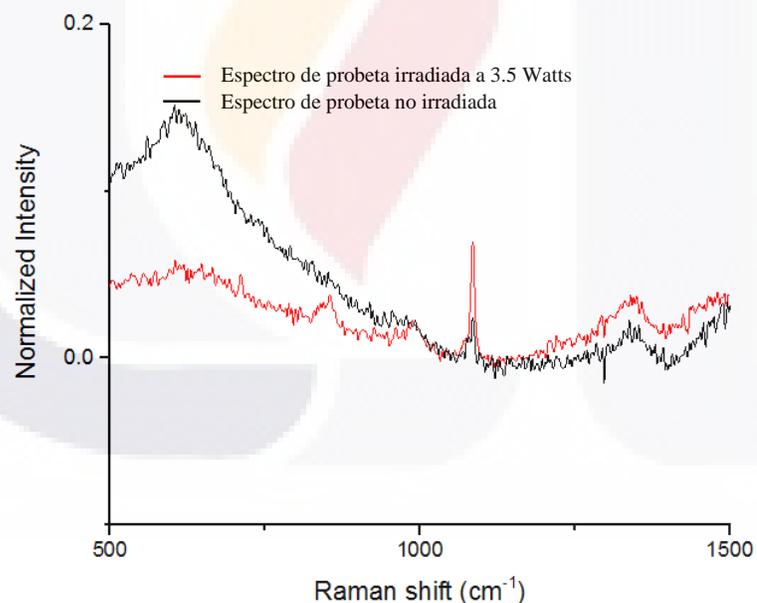


Figura 25. Espectro Raman de probeta irradiada comparada con probeta no irradiada, de concreto hidráulico $f^c=350 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo auto-curante después de 3 días de elaboración.



No. de muestra	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Aditivo (hidratium)	Radiación	Potencia (watts)	Edad (Días)	Temperatura superficie superior (°C)	Temperatura superficie inferior (°C)	Resistencia experimental (kg/cm ²)
1	250	NO	NO	3.5	3	16.5	18.6	278.81
2	250	NO	SI	3.5	3	32	27.5	197.04
3	250	NO	NO	3.5	7	18.4	19.4	263.39
4	250	NO	SI	3.5	7	24.8	23	208.16
5	250	NO	NO	3.5	28	22.5	23.8	370
6	250	NO	SI	3.5	28	34.5	31	281.84
7	250	SI	NO	3.5	3	17	17.8	302.02
8	250	SI	SI	3.5	3	31	25.5	198.11
9	250	SI	NO	3.5	7	21.4	23.6	239.19
10	250	SI	SI	3.5	7	32.2	29.4	234.33
11	250	SI	NO	3.5	28	20.2	21.6	327.79
12	250	SI	SI	3.5	28	33	28	267.62
13	300	NO	NO	3.5	3	19.6	21.2	279.15
14	300	NO	SI	3.5	3	35	33	256.01
15	300	NO	NO	3.5	7	22.6	23.6	304.98
16	300	NO	SI	3.5	7	32.8	29	170.14
17	300	NO	NO	3.5	28	21.3	22.8	393.96
18	300	NO	SI	3.5	28	32.6	29.3	279.81
19	300	SI	NO	3.5	3	21.8	23.4	348.22
20	300	SI	SI	3.5	3	32.2	29.8	236.85
21	300	SI	NO	3.5	7	22.3	23.6	310.38
22	300	SI	SI	3.5	7	33.2	29.4	255.27
23	300	SI	NO	3.5	28	21	23.2	403.77
24	300	SI	SI	3.5	28	30.8	29.2	336.21
25	350	NO	NO	3.5	3	23	24.4	318.37
26	350	NO	SI	3.5	3	32.4	30.2	295.19
27	350	NO	NO	3.5	7	20.6	22.4	359.25
28	350	NO	SI	3.5	7	36.8	29	286.51
29	350	NO	NO	3.5	28	21.1	23.1	429.99
30	350	NO	SI	3.5	28	33.1	30.3	354.3
31	350	SI	NO	3.5	3	23	23.8	321.81
32	350	SI	SI	3.5	3	33.6	29.8	303.1
33	350	SI	NO	3.5	7	19.5	21.6	327.96
34	350	SI	SI	3.5	7	32	30	239.81
35	350	SI	NO	3.5	28	22.8	24	415
36	350	SI	SI	3.5	28	32.5	29.1	355.55

Tabla 3. Tabla para control de elaboración de muestras y resultados.



ANEXO B

En este Anexo B se incluyen fotografías de los trabajos en laboratorio.



Figura 26. Polvo de cemento de las muestras de concreto hidráulico irradiado para espectroscopia Raman.



Figura 27. Polvo de cemento de muestra sin irradiar de concreto hidráulico para espectroscopia Raman.

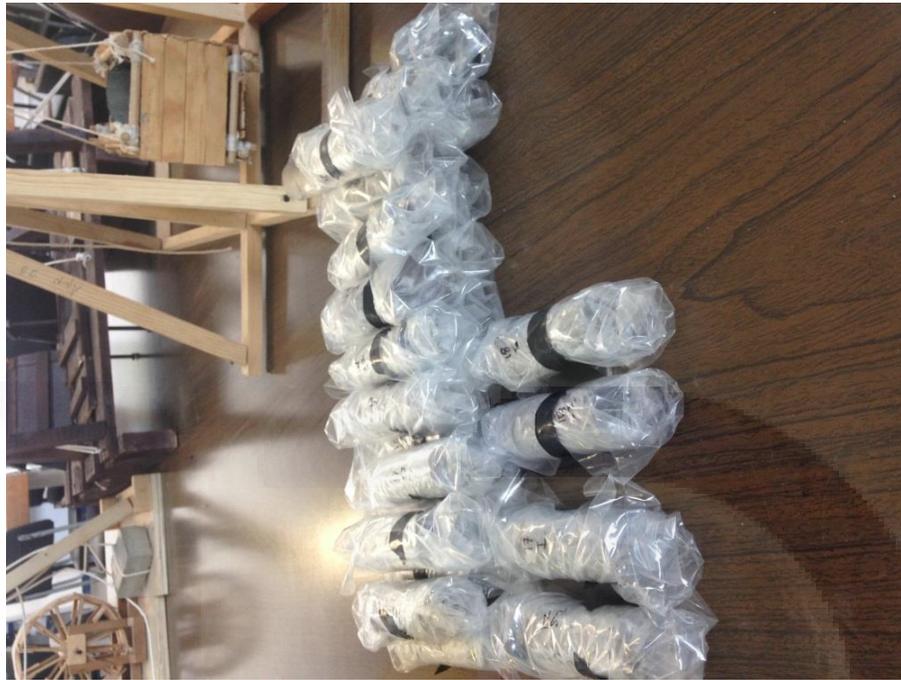


Figura 28. Sellado individual de muestras después de ensayo a la compresión, para evitar contaminación.

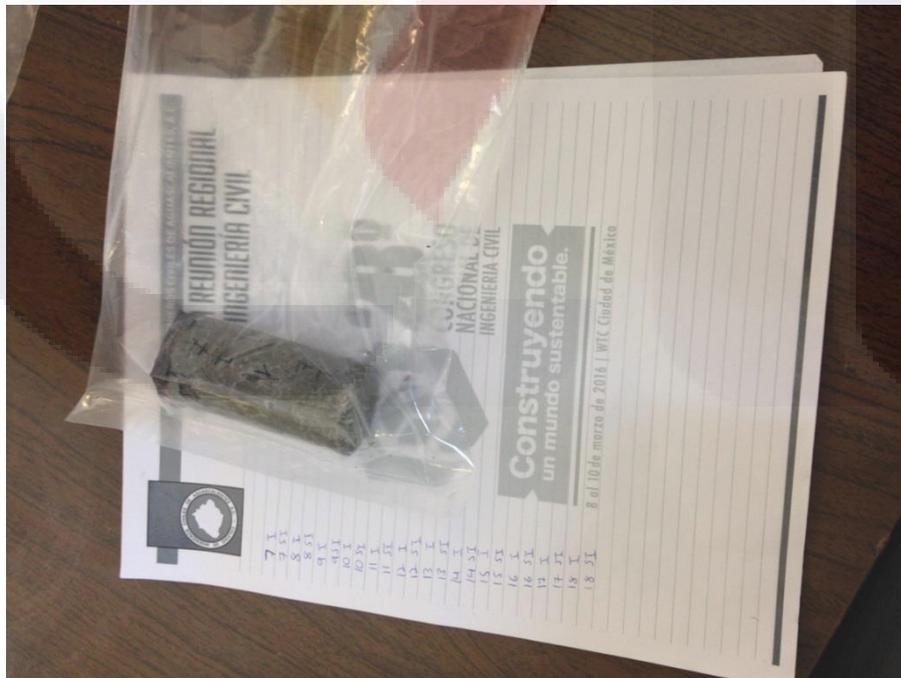


Figura 29. Muestra en proceso de sellado para evitar contaminación, previo a la obtención de polvo de cemento.



Figura 30. Muestra en proceso de sellado para evitar contaminación, previo a la obtención de polvo de cemento.



Figura 31. Muestras cabeceadas con azufre listas para ser ensayadas a la compresión.



Figura 32. Resultados de resistencia a la compresión, en pantalla de prensa hidráulica.



Figura 33. Pantalla en prensa hidráulica para introducir datos de la muestra a ensayar.



Figura 34. Muestra colocada en prensa hidráulica lista para ensayar.



Figura 35. Cabeceado de muestra de concreto hidráulico.



Figura 36. Medición de muestras de concreto hidráulico con Vernier digital.



Figura 37. Pesaje en báscula de precisión de las muestras de concreto hidráulico.



Figura 38. Ensaye en proceso en microscopio Raman para obtención de espectro de polvo de cemento.

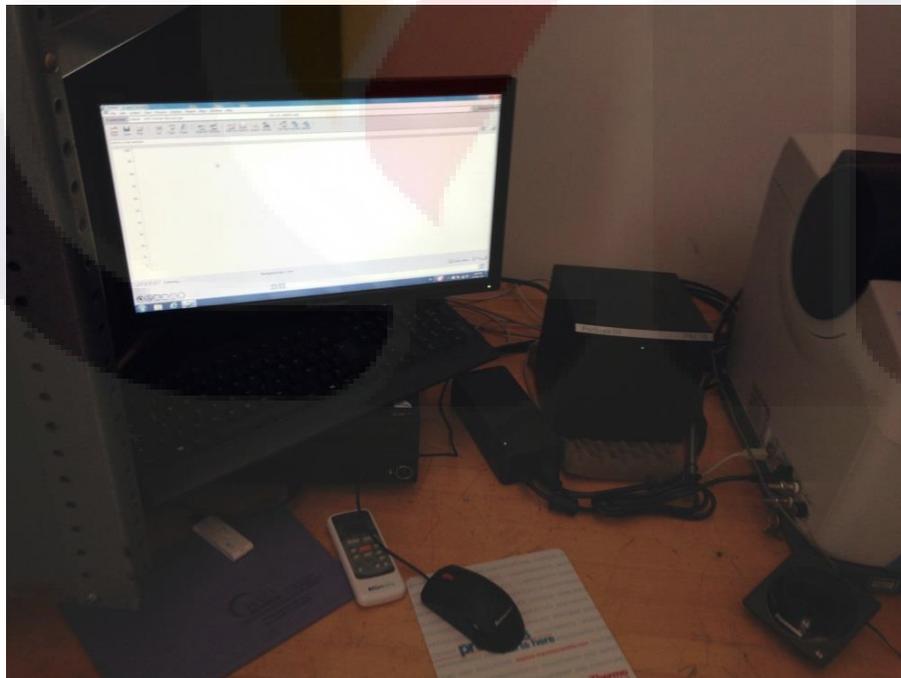


Figura 39. Espectro Raman obtenido en pantalla.

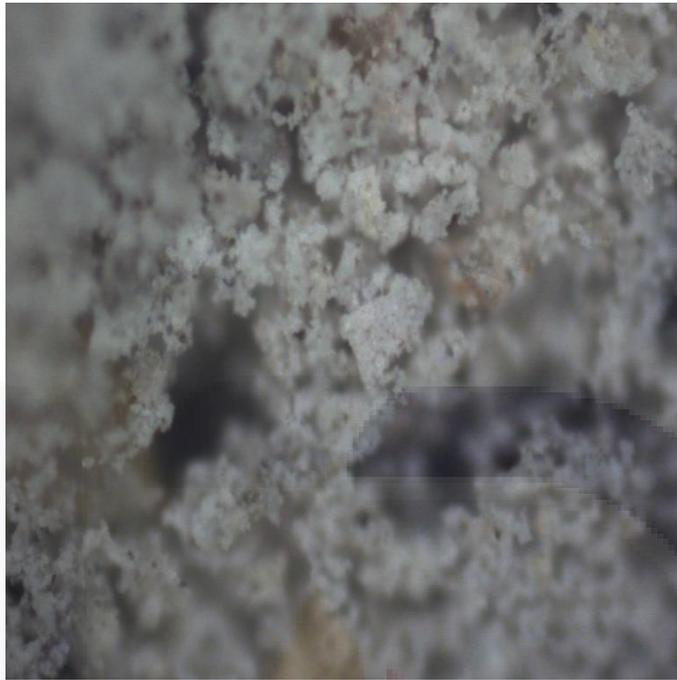


Figura 40. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta no irradiada de resistencia de diseño de $f^{\prime}c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.

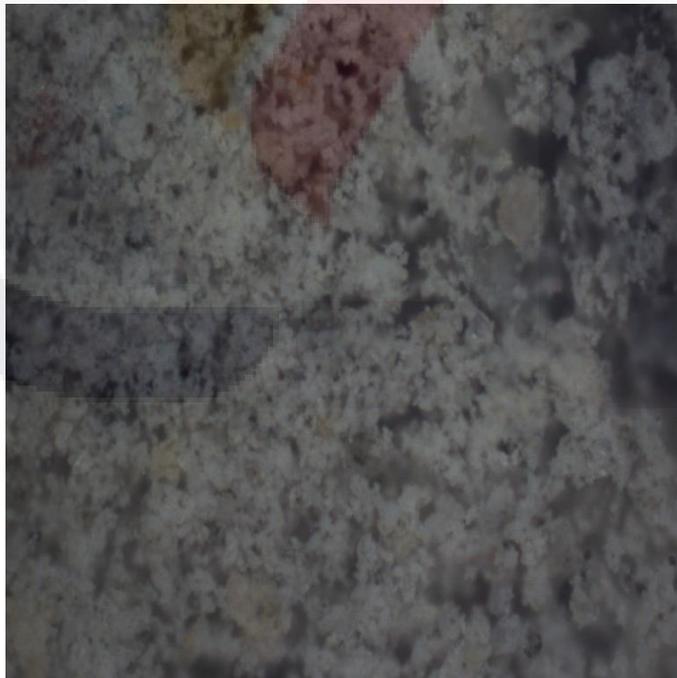


Figura 41. Fotografía de la microestructura con microscopio Raman, del cemento de probeta irradiada de resistencia de diseño de $f^{\prime}c=300 \text{ kg/cm}^2$ con aditivo a una edad de 28 días.