



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

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

**TESIS**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RADIACIÓN LASER CO<sub>2</sub> EN  
CONCRETOS AUTO-COMPACTABLES.**

**PRESENTA**

**Ing. Jesús Emmanuel Montantes Pons**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL  
(ESTRUCTURAS)**

**TUTOR:**

**Dr. José Ángel Ortiz Lozano**

**INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL:**

**Dr. Juan José Soto Bernal**

**Dr. Ahiza Martínez Romo**

**Aguascalientes, Ags., 05 de septiembre de 2018**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES  
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN  
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **JESUS EMMANUEL MONTANTES PONS** con ID **218763** quien realizó la tesis titulada: **ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RADIACIÓN LÁSER CO<sub>2</sub> EN CONCRETOS AUTO-COMPACTABLES**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que **él** pueda proceder a imprimirlo, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 15 de agosto de 2018.

Dr. José Ángel Ortiz Lozano  
Tutor de tesis

Dr. Juan José Soto Bernal  
Asesor de tesis

Dra. Arliza Martínez Romo  
Asesor de tesis

- c.c.p.- Interesado
- c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Jefatura del Depto. De Construcción y estructuras
- c.c.p.- Jefatura del Depto. De Geotécnica e Hidráulica
- c.c.p.- Consejero Académico
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico



Centro de Ciencias  
del Diseño y de  
la Construcción

Oficio: CCDC-D-281-2018  
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna  
Dirección General de Investigación y Posgrado  
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RADIACIÓN LÁSER CO2 EN CONCRETOS AUTO-COMPACTABLES". Presentado por el sustentante: Jesús Emmanuel Montantes Pons con ID: 218763, 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.

ATENTAMENTE  
Aguascalientes, Ags., 22 de agosto de 2018  
"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria  
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.  
c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.  
c.c.p.- Dr. José Ángel Ortiz Lozano – Tutor de tesis.  
c.c.p.- Ing. Jesús Emmanuel Montantes Pons – 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

OVG/rbv

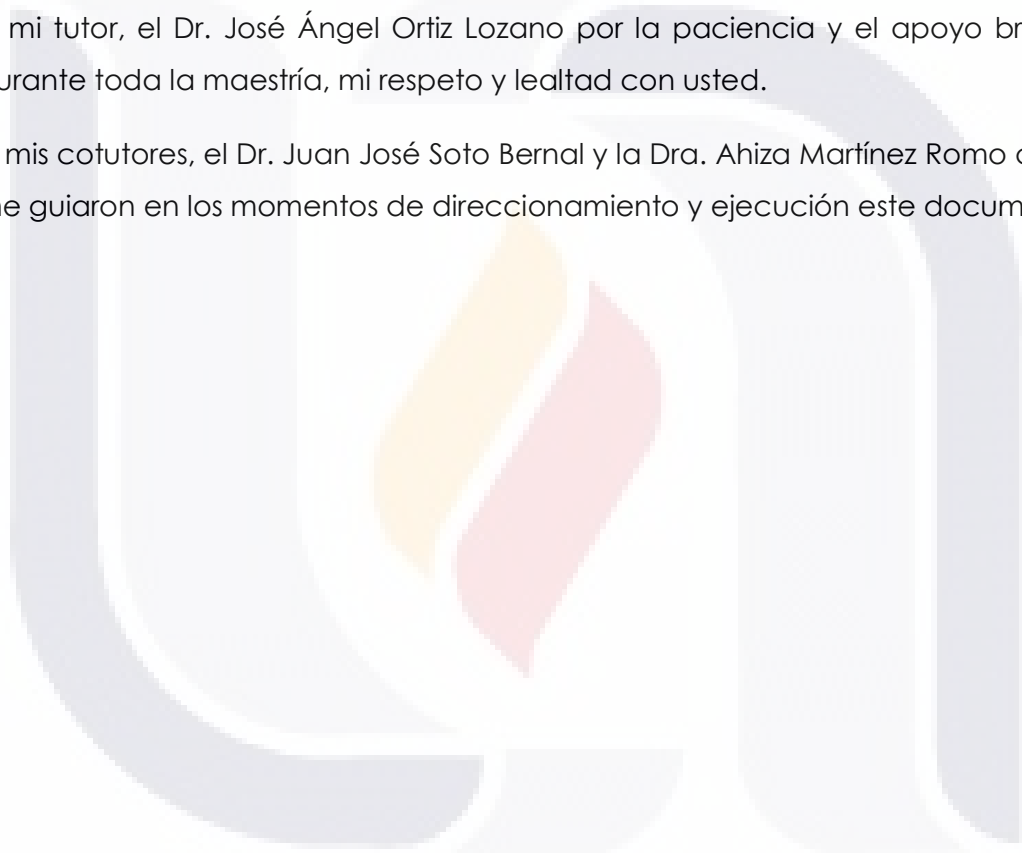
## **AGRADECIMIENTOS**

Al CONACYT porque gracias a que existe este apoyo es que puedo continuar con mis estudios y aprender todo aquello que me apasiona.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por el espacio proporcionado para el desarrollo de mis estudios de posgrado.

A mi tutor, el Dr. José Ángel Ortiz Lozano por la paciencia y el apoyo brindado durante toda la maestría, mi respeto y lealtad con usted.

A mis cotutores, el Dr. Juan José Soto Bernal y la Dra. Ahiza Martínez Romo quienes me guiaron en los momentos de direccionamiento y ejecución este documento.



## DEDICATORIAS

A mi prometida por su apoyo y comprensión durante todo este proceso ya que sin su amor no podría mantener la motivación de seguir adelante día con día.

A mis padres porque siempre han estado conmigo en las buenas y las malas, dándome sus consejos aun cuando se me cerraba el mundo para resolver problemas extremadamente sencillos. Porque siempre han estado para mi ofreciéndome toda su sabiduría aun cuando por inmaduro no he querido comprender. Para ellos todo mi agradecimiento y respeto.

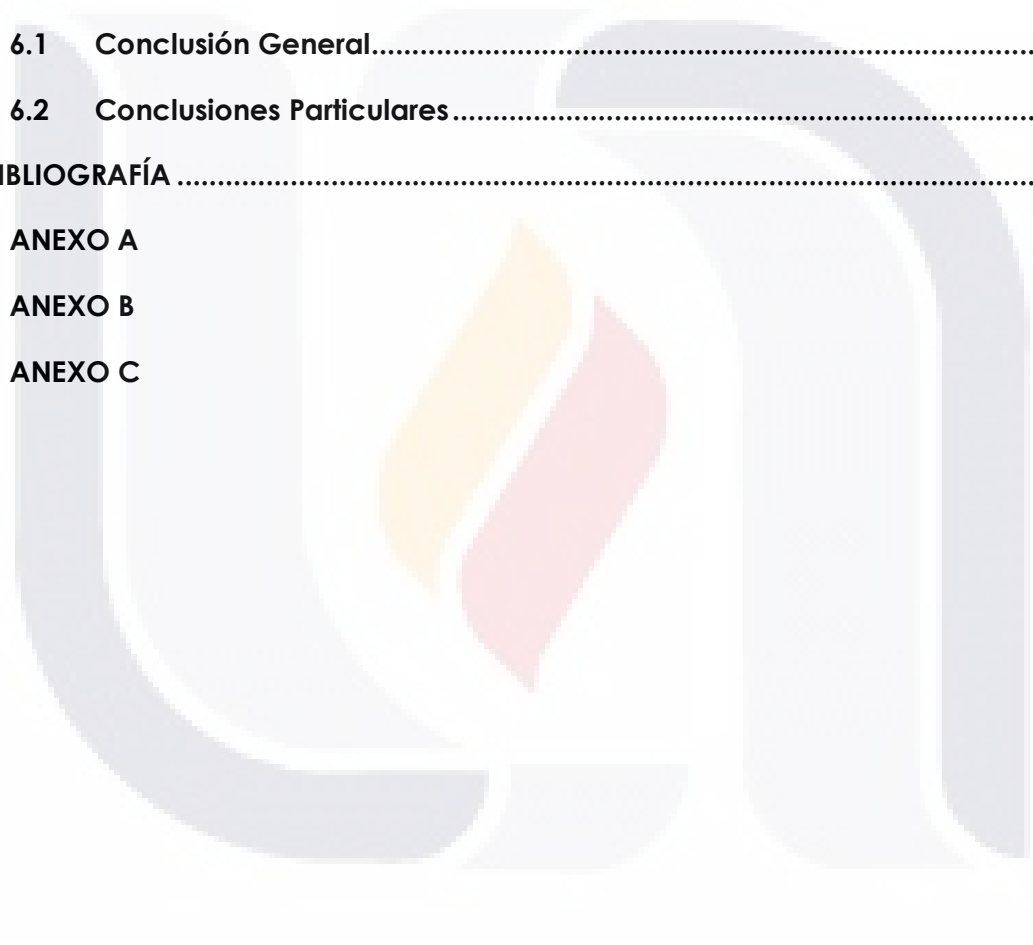
A mi hermano porque desde pequeños me enseñó que no existen barreras para lo que una persona puede lograr, por el que me recuerda que tengo que competir conmigo mismo día con día y jamás decir que no puedo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
RESUMEN .....	8
ABSTRACT.....	9
CAPITULO I: Introducción .....	11
1.1 Antecedentes .....	11
1.2 Definición del problema de investigación .....	12
1.3 Objetivo General .....	12
1.4 Objetivos Particulares.....	12
1.5 Alcances .....	13
1.6 Justificación .....	13
1.7 Hipótesis.....	14
1.8 Metodología.....	14
1.9 Narrativa por capítulos.....	15
CAPITULO II: Revisión del estado del arte .....	18
2.1 El concreto y la radiación láser CO <sub>2</sub> .....	18
CAPITULO III: Marco teórico .....	25
3.1 Interacción Radiación-materia.....	25
3.1.1 Conceptos básicos de la teoría cuántica.....	25
3.1.2 Teoría cuántica de Planck.....	25
3.1.3 Espectros de emisión.....	26
3.1.4 El láser CO <sub>2</sub> .....	26

3.2	El concreto auto-compactable.....	27
3.2.1	Cemento.....	27
3.2.2	Cemento portland y agua.....	30
3.2.3	Concreto .....	31
3.2.4	Agregados .....	32
3.2.5	El superplastificante.....	33
3.2.6	El concreto de alto desempeño.....	35
CAPITULO IV: Desarrollo experimental.....		39
4.1	Metodología experimental.....	39
4.2	Elección de los materiales.....	41
4.2.1	Elección del cemento.....	41
4.2.2	Elección del superplastificante .....	42
4.2.3	Selección de los agregados.....	44
4.3	Diseño de concreto auto-compactable.....	44
4.3.1	Relación agua/material ligante .....	45
4.3.2	Dosificación de agua.....	46
4.3.3	Dosificación de súper plastificante .....	46
4.3.4	Contenido de agregado grueso.....	47
4.3.5	Contenido de aire.....	47
4.3.6	Procedimiento de cálculo para el diseño del concreto auto-compactable.....	48
4.3.7	Revisión de características auto-compactables.....	50
4.4	Elaboración de muestras.....	51
4.5	Proceso de radiación por láser CO <sub>2</sub> .....	52
4.6	Desarrollo de pruebas en compresión.....	53

4.7	Proceso de análisis por espectroscopía Raman. ....	54
4.8	Proceso de análisis estadístico.....	55
CAPITULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....		60
5.1	Resultados de las pruebas a compresión.....	60
5.2	Resultados del análisis por espectroscopía Raman.....	65
CAPITULO VI: Conclusiones.....		69
6.1	Conclusión General.....	69
6.2	Conclusiones Particulares.....	69
BIBLIOGRAFÍA .....		70
ANEXO A		
ANEXO B		
ANEXO C		





**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Composición química y propiedades físicas del cemento utilizado (M.Moreno-Virgen,2010). ..... 41

Tabla 2 Tabla de cálculo para el concreto auto-compactable..... 50

Tabla 3 Revisión de normalidad para resultados de compresión en muestras sin irradiar. .... 62

Tabla 4 Revisión de normalidad para resultados de compresión en muestras con radiación de 6.5 y 7.5 Watts..... 62

Tabla 5 Revisión de normalidad para resultados de compresión en muestras con radiación de 2.5 a 5.5 Watts. .... 63

Tabla 6 Prueba de hipótesis para muestras relacionadas con radiación de 6.5 y 7.5 Watts..... 63

Tabla 7 Prueba de hipótesis para muestras relacionadas con radiación de 2.5 a 5.5 Watts..... 63

Tabla 8 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 1. .... 74

Tabla 9 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 2. .... 74

Tabla 10 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 3. .... 75

Tabla 11 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 4. .... 75

Tabla 12 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 5. .... 75

Tabla 13 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 6. .... 76

Tabla 14 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 7. .... 76

Tabla 15 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 8. .... 76

Tabla 16 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 9. .... 77

Tabla 17 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 10..... 77

Tabla 18 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 11. .... 77

Tabla 19 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 12. .... 78

Tabla 20 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 13. .... 78

Tabla 21 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 14. .... 78

Tabla 22 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 15. .... 79

Tabla 23 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 16. .... 79

Tabla 24 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 17..... 79  
Tabla 25 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 18..... 80  
Tabla 26 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 19..... 80  
Tabla 27 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 20..... 80  
Tabla 28 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 21..... 81  
Tabla 29 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 22..... 81  
Tabla 30 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 23..... 81



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 Funcionamiento de superplastificantes (Modificado de Pierre-Claude, 2008). ..... 33

Figura 2 Comparación de las proporciones de mezcla del concreto auto-compactable con otro tipo de concretos convencionales (Okamura & Ouchi, 2003). ..... 36

Figura 3 Mecanismo para lograr auto-compactación (Modificado de Okamura & Ouchi, 2013). ..... 37

Figura 4 Resultados de la prueba del cono de Marsh. .... 43

Figura 5 Relación A/ML propuesta frente a la relación de resistencia a la compresión (Pierre-Claude, 2008). ..... 45

Figura 6 Relación entre el punto de saturación y la dosificación de agua (Pierre-Claude, 2008). ..... 46

Figura 7 Relación entre la dosis de agregado grueso y la forma de la partícula (Pierre-Claude, 2008). ..... 47

Figura 8 Paso 1 para el cálculo del concreto auto-compactable. .... 48

Figura 9 Paso 2 para el cálculo del concreto auto-compactable. .... 49

Figura 10 Paso 3 para el cálculo del concreto auto-compactable. .... 49

Figura 11 Prueba de flujo de revenimiento. .... 51

Figura 12 Sistema para irradiar los cilindros de concreto auto-compactable. .... 52

Figura 13 Fotografía de cilindro inmediatamente después de la falla en compresión. .... 53

Figura 14 Fotografía de cilindro para extracción de muestras para análisis por espectroscopía Raman. .... 54

Figura 15 Imagen a 50X de la muestra irradiada con 6.5 Watts. .... 55

Figura 16 Imagen a 50X de la muestra irradiada con 2.5 Watts. .... 55

Figura 17 Histograma de resistencia en cilindros no irradiados. .... 57

Figura 18 Histograma de resistencia en cilindros irradiados con potencias de 7.5 y 6.5 Watts. .... 57

Figura 19 Histograma de resistencia en cilindros irradiados con potencias de 2.5 hasta 5.5 Watts..... 58

Figura 20 Grafica de resistencias por historial de tandas..... 60

Figura 21 Tanda con cilindro irradiado a 6.5 Watts..... 61

Figura 22 Gráfica comparativa de campana de Gauss suponiendo una distribución normal en todos los grupos de estudio..... 64

Figura 23 Espectros Raman para las muestras irradiadas a 2.5 Watts y sin irradiar. 65

Figura 24 Espectros Raman para las muestras irradiadas a 6.5 Watts y sin irradiar. 65

Figura 25 Resultados de prueba en compresión para R27.5IR, en pantalla de prensa hidráulica..... 82

Figura 26 Resultados de prueba en compresión para cilindro 1 sin irradiar R27.5, en pantalla de prensa hidráulica..... 82

Figura 27 Resultados de prueba en compresión para cilindro 2 sin irradiar R27.5, en pantalla de prensa hidráulica..... 83

Figura 28 Láser CO2 utilizado para irradiar las muestras de concreto auto-compactable..... 84

Figura 29 Muestra de concreto auto-compactable en proceso de radiación..... 84

Figura 30 Muestra de concreto auto-compactable después del proceso de radiación visto desde la parte superior del sistema..... 85

Figura 31 Dispositivo de medición de potencia WISARD 250..... 85

Figura 32 microscopio Raman de marca “ThermoFisher Scientific” utilizado para el análisis..... 86

Figura 33 Tanda elaborada para análisis por espectroscopía Raman..... 86

Figura 34 Descimbrado de cilindro de concreto auto-compactable irradiado a una potencia de 6.5 Watts..... 87

## RESUMEN

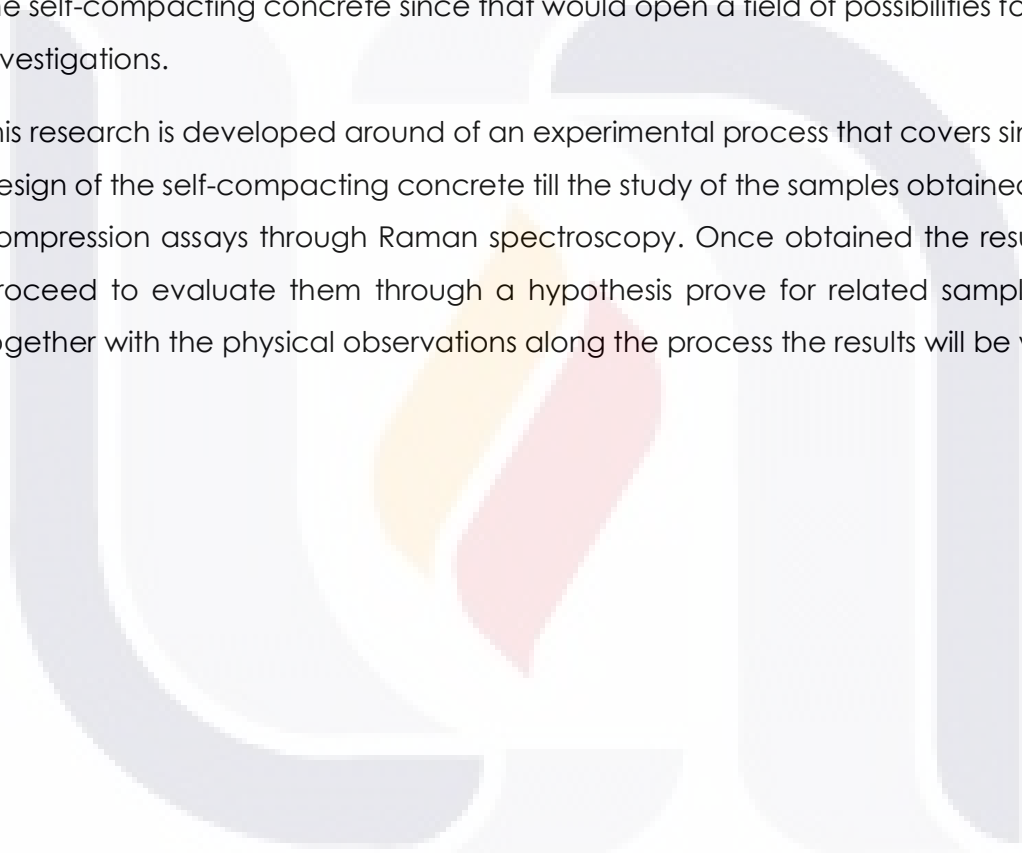
En el presente documento se muestran las bases y procedimientos para la experimentación y estudio del fenómeno del efecto de la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto auto-compactable. El propósito de la investigación es comprobar que existe una interacción entre la radiación láser CO<sub>2</sub> y la pasta de cemento contenida en el concreto auto-compactable ya que esto abriría un campo de posibilidades para futuros estudios.

La investigación se desarrolla en torno a un proceso experimental que abarca desde el diseño del concreto hasta el estudio de muestras obtenidas de los ensayos en compresión por espectroscopía Raman. Una vez obtenidos los resultados, se procede a realizar una evaluación estadística por medio de pruebas de hipótesis para muestras relacionadas y en conjunto con las observaciones físicas durante el proceso, se redactan las conclusiones.

## **ABSTRACT**

This document content the investigation and bases that are been taken to develop the research and study of the phenomena of the effect of the CO<sub>2</sub> laser radiation over the self-compacting concrete. The purpose of this research is to prove that there is a relation between the CO<sub>2</sub> laser radiation and the cement paste contained the self-compacting concrete since that would open a field of possibilities for future investigations.

This research is developed around of an experimental process that covers since the design of the self-compacting concrete till the study of the samples obtained of the compression assays through Raman spectroscopy. Once obtained the results, we proceed to evaluate them through a hypothesis prove for related samples and together with the physical observations along the process the results will be written.





# CAPÍTULO

# I

## INTRODUCCIÓN

## CAPITULO I: Introducción

### 1.1 Antecedentes

El efecto que provoca la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto, ha motivado su uso tanto para eliminar capas contaminadas (Rao, Kumar, & Nath, 2005), así como para simular el efecto del fuego en los materiales pétreos de construcción (Gómez-Heras, Fort, Morcillo, Molpeceres, & Ocaña, 2008), sin embargo, el efecto que provoca en las pastas de cemento y en el concreto, ha sido poco estudiado.

Dentro de las investigaciones recientes acerca del uso de la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto, se ha planteado, la posibilidad de acelerar el proceso de fraguado y el mejoramiento de las características mecánicas del mismo (Velasco-González, 2016). Utilizando pastas de cemento para comprobar su efectividad, se ha demostrado que las pastas de cemento absorben la radiación láser CO<sub>2</sub>, incrementando la temperatura local lo suficientemente alto para recristalizar la superficie del material acelerando la producción de cristales de Portlandita (M. R. Moreno-Virgen et al., 2011). Mientras que por el enfoque de las características mecánicas tenemos que, al irradiar pastas de 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 (Velasco-González, 2016).

Hasta la fecha se ha descubierto que la radiación laser CO<sub>2</sub> (10.6  $\mu$ 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 y no en el volumen total de las muestras, lo anterior debido a que los agregados pétreos evitan que se propague dicho campo generado por la radiación(Velasco-González, 2016).

Sin embargo, con los planteamientos anteriormente mencionados surge la idea de estudiar el efecto de la influencia de la radiación laser CO<sub>2</sub> en concretos auto-



compactables, ya que se desconoce el fenómeno que se presenta al añadir aditivos de diversos tipos. Los cuales podrían permitir que el efecto de la radiación se transmita por todo el espécimen, generando así, un concreto más compacto que tenga una respuesta mecánica superior a los no irradiados.

## **1.2 Definición del problema de investigación**

En la industria de la construcción el concreto es uno de los materiales más utilizados para la edificación de todo tipo. El avance en la tecnología del concreto y más específicamente, el uso del concreto auto-compactable permite lograr acabados, figuras y en general realizar obras que de otra manera sería imposibles. Sin embargo, los tiempos de fraguado limitan la producción y el control de calidad con respecto a las características mecánicas podría mejorar.

Al analizar los estudios que se han realizado acerca del efecto de la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto, se ha descubierto que no se cuentan con estudios del efecto de la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto auto-compactable. Es por lo que la presente investigación se propone conocer el efecto de este tipo de radiación ya sea en su parte electromagnética como de calor en el concreto auto-compactable.

## **1.3 Objetivo General**

Analizar si existe un efecto provocado por la radiación laser CO<sub>2</sub> en la pasta de cemento de los concretos auto-compactables.

## **1.4 Objetivos Particulares**

- a) Diseñar mezclas para concreto auto-compactable.
- b) Analizar la influencia de la radiación sobre la resistencia a compresión.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- c) Evaluar el efecto de la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto auto-compactable mediante espectroscopía Raman.

## 1.5 Alcances

- a) Realizar un estudio del estado del arte para conocer las características generales de la radiación laser CO<sub>2</sub>, y así, plantear una manera efectiva de abordar la experimentación.
- b) Diseñar un proceso experimental que permita extraer datos confiables.
- c) Analizar las características físicas, mecánicas y químicas que presenten por efecto de la radiación láser CO<sub>2</sub> en los especímenes de concreto auto-compactable.
- d) Realizar gráficas comparativas para presentar los resultados obtenidos.

## 1.6 Justificación

El descubrimiento de los concretos auto-compactables ha logrado proporcionar un concreto con características de trabajabilidad y acabado alto. A su vez, el concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción, por lo que, la investigación de técnicas que puedan mejorar tanto su comportamiento mecánico como trabajabilidad en cualquier aspecto son importantes.

Por otra parte, las investigaciones han demostrado que existe un efecto generado por la radiación CO<sub>2</sub> en las propiedades de las pastas de cemento que proporciona una mejora en las características tanto mecánicas como microestructurales. Sin embargo, los investigadores se han encontrado con el problema de que las partículas de agregados pétreos inhiben el efecto de la radiación generada por el láser CO<sub>2</sub>. Tomando en consideración dicha conclusión, una posible solución es el uso de concretos con mayor cantidad de

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

pasta de cemento sobre la cual se pueda transmitir de manera eficiente el efecto de la radiación.

## **1.7 Hipótesis**

La radiación laser CO<sub>2</sub> tiene un efecto con relación a las características mecánicas del concreto auto-compactable gracias a que la radiación electromagnética es capaz de transmitirse a través de la pasta de cemento.

## **1.8 Metodología**

El tipo de investigación a realizar en el presente documento es en general exploratorio y de carácter cuantitativo, ya que el tema no ha sido abordado con anterioridad con el enfoque que aquí se plantea. Sin embargo, en algunos aspectos necesitará ser de tipo descriptivo, esto debido a que el efecto que provoca la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto auto-compactable se comparará con los de especímenes de concreto sin irradiar, los cuales deberán servir de punto de referencia con respecto a la teoría.

La metodología planteada para lograr los objetivos propuestos será la siguiente:

1. Elaboración del protocolo de investigación con la finalidad de puntualizar el tema y direccionar la experimentación con respecto a los objetivos.
2. Desarrollo del estudio del estado del arte para recopilar información acerca de experimentos relacionados y utilizarlos de guía para el diseño experimental.
3. Construcción de un marco teórico basado en los conocimientos de las ciencias relacionadas con el fenómeno de estudio.

4. Se llevará a cabo el proceso experimental con su correspondiente recopilación de datos los cuales servirán para la publicación de resultados.
5. Exponer los resultados describiendo el fenómeno relacionado con la irradiación láser CO<sub>2</sub> de las muestras, comparándolo con el concreto sin irradiar.

## **1.9 Narrativa por capítulos**

### **CAPITULO I**

En el capítulo primero, se presenta la introducción a al tema de investigación, en donde describen los antecedentes de la investigación, se plantea y justifica el problema de investigación, se establecen los objetivos, se propone una hipótesis general, se presenta una descripción de la metodología de la elaboración de la tesis y por último se describe el contenido de los capítulos presentados.

### **CAPITULO II**

En el segundo capítulo se desarrolla una revisión del estado del arte con la finalidad de mostrar un panorama de los trabajos realizados que presentan una relación directa con el tema.

### **CAPITULO III**

En el tercer capítulo se describe la teoría sobre la que se fundamenta el estudio del fenómeno.

### **CAPITULO IV**

En el capítulo cuarto se describe el proceso experimental que se llevó a cabo para el análisis del fenómeno y se muestran los resultados obtenidos.

#### CAPITULO V

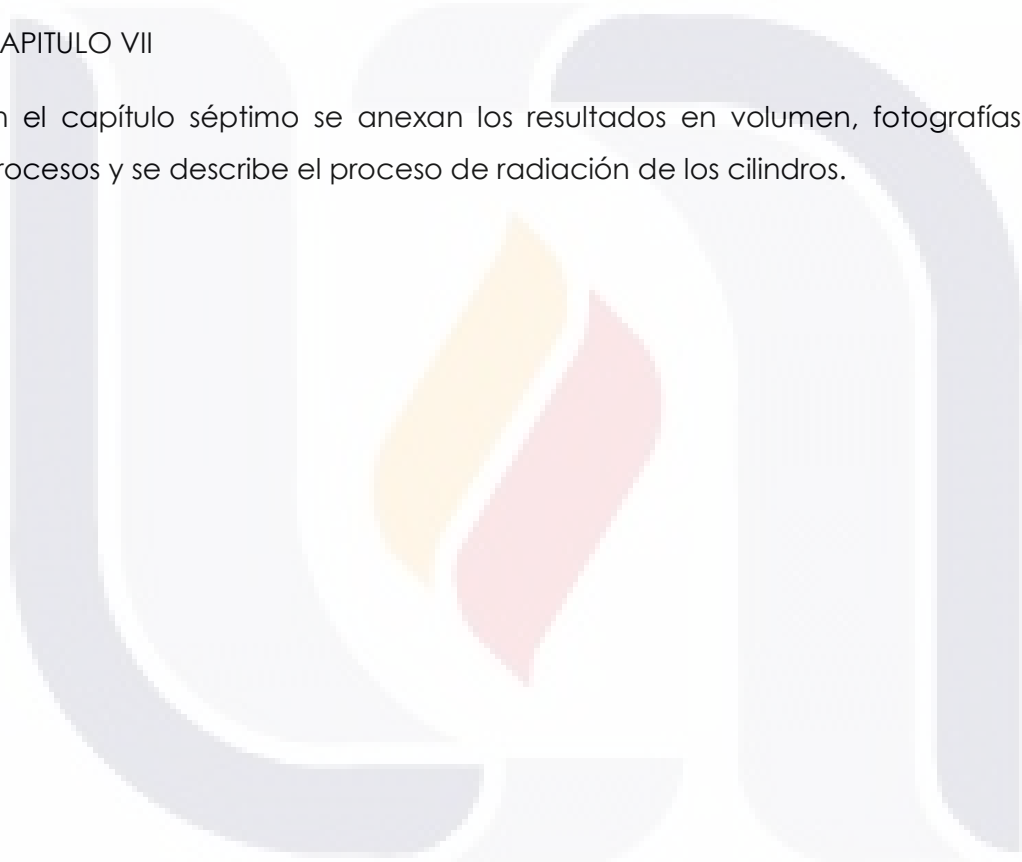
En el capítulo quinto se muestra la discusión de resultados producto del proceso experimental.

#### CAPITULO VI

En el capítulo sexto se muestran tanto las conclusiones generales como particulares de la investigación.

#### CAPITULO VII

En el capítulo séptimo se anexan los resultados en volumen, fotografías de los procesos y se describe el proceso de radiación de los cilindros.





# CAPÍTULO

## II

Revisión del estado del arte

## CAPITULO II: Revisión del estado del arte

### 2.1 El concreto y la radiación láser CO<sub>2</sub>

En el año 2000 J. Lawrence y L. Li, presentaron un artículo en la revista; Materials Science and Engineering: A, titulado: "A comparative study of the Surface glaze characteristics of concrete treated with CO<sub>2</sub> and high power diode lasers" (Lawrence & Li, 2000). Dentro del estudio se mencionan aspectos importantes a considerar los cuales son:

- a) La superficie generada después de la interacción del concreto con el láser CO<sub>2</sub> tiene una estructura semi amorfa, con áreas considerables, aleatoriamente localizadas y mostradas de alguna manera como estructuras de columnas regulares.
- b) Con respecto a la profundidad de interacción, a medida que aumenta la velocidad de desplazamiento del láser, la profundidad de interacción y fusión de ambos generalmente decrece.
- c) Comparando los láseres con respecto a la velocidad de desplazamiento se demuestra que la profundidad de interacción y fusión obtenida con el láser CO<sub>2</sub> fue consistentemente mayor que con el láser de diodo de alta potencia.
- d) El uso de la radiación láser CO<sub>2</sub> genera una pérdida de masa aproximadamente linealmente con relación a la densidad de poder debido a los efectos del calentamiento en el proceso hasta aproximadamente 1.8 kW cm<sup>-2</sup>. Sin embargo, con el reposo posterior a el tratamiento la masa se recupera, esto tal vez es debido a la rehidratación a través del contacto de la zona afectada con el aire.
- e) Se ha descubierto que el esmalte generado produce una cierta cristalinidad formando de alguna forma una estructura de columnas, mientras que, en relación con la morfología, se puede observar que la formación de grietas y poros es una característica común en las zonas irradiadas.

En el año 2004, B. Tirumala Rao, Harish Kumar y A.K. Nath, presentaron un artículo en la revista Optics & Laser Technology titulado: "Processing of concretes with a high power CO<sub>2</sub> laser"(Rao et al., 2005). Aún que dicho artículo no comparte objetivos con la desarrollada en esta investigación, se pueden rescatar los siguientes puntos:

- a) Un rayo láser de alta potencia que incide sobre una superficie de concreto puede producir: desprendimiento, acristalamiento o vaporización, dependiendo de la densidad de la potencia del láser y de la velocidad de escaneado.
- b) El tamaño del rayo láser a fluencia constante o densidad de energía tuvo un efecto significativamente diferente en el proceso de desprendimiento.
- c) En bloques gruesos de concreto, el flujo de material fundido limita la profundidad del corte.
- d) Un área de escaneo mayor produjo mayor profundidad de desprendimiento y mayor rango de remoción de material.
- e) El efecto de desprendimiento fue dominante en concretos ricos en cemento.
- f) La formación de porosidad fue una de las características de las superficies acristaladas por láser.
- g) Los colores del esmalte en las superficies de los concretos tratados son diferentes para distintas relaciones cemento-arena.

En el año 2010, Ma. Del Rosario Moreno Virgen, presentó su tesis doctoral llamada "Influencia de la radiación Láser en las propiedades Mecánicas de la Pasta de cemento y su clasificación"(M. Moreno-Virgen, 2010). Dentro de las conclusiones se rescataron los siguientes puntos:

- a) Existe una relación directa entre la potencia de radiación y la temperatura de la superficie expuesta, es decir, a mayor potencia, mayor temperatura.



- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- b) Cuando un campo eléctrico incide sobre una molécula de agua, se generará un rápido movimiento que alineará las moléculas de acuerdo a la orientación del campo eléctrico incidente.
  - c) Se realizaron pruebas utilizando el aparato de Vicat para medir el tiempo de fraguado en pastas de cemento irradiados a diferentes potencias y se compararon con las muestras no irradiadas; los resultados muestran que efectivamente a mayor potencia mayor rapidez de fraguado disminuyendo el tiempo hasta 125 min a una potencia de 7.84 Watts; y aún que disminuyó el tiempo de fraguado y por lo tanto aumentó la temperatura, los resultados de las pruebas de resistencia a compresión demuestran que a mayor potencia de radiación mayor resistencia.
  - d) Para la caracterización del material en las muestras tratadas en la investigación se utilizó la espectroscopia Raman con una longitud de excitación de onda de 830 nm, difracción por rayos X, y escaneo electrónico por microscopio la cual permite la detección de los cambios ocurridos en los materiales tratados con el láser. Los resultados mostraron un cambio importante en función de la densidad de poder (a mayor densidad de poder los picos mostrados en la gráfica se elevan). El cambio principal se puede observar en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que demuestra una tendencia negativa ya que al parecer la irradiación láser tiene la capacidad para disolver la unión entre el hierro y el oxígeno.
  - e) En las observaciones con el escaneo electrónico por microscopio distingue un incremento de hierro en la muestra, producto de la disociación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
  - f) Los resultados de escaneo electrónico por microscopio muestran que existen 2 fases (alita y belita), una sin morfología definida (belita) y la otra con forma esférica (alita).
  - g) Los resultados del espectro de difracción por rayos X, la composición de elementos proporcionan información en contraste con la potencia del láser y el porcentaje del elemento, sin embargo, no se puede encontrar una descripción detallada del fenómeno, solo una discusión, en donde se describe que existe una eliminación de elementos como el sodio, azufre y

potasio, los cuales están presentes en las muestras originales y se menciona que la densidad de potencia fue suficiente para evaporar esos elementos ya que son catalogados como impurezas en la superficie de la pasta.

En el año 2015, Juan José Soto Bernal, Rosario González Mota, Iliana Rosales Candelas y José Ángel Ortiz Lozano publicaron en la sección "Advances in Materials Science and Engineering" de la revista Hindawi un artículo titulado: "Effects of Static Magnetic Fields on the Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Pastes" (Soto-Bernal, Gonzalez-Mota, Rosales-Candelas, & Ortiz-Lozano, 2015). La publicación presenta los resultados en relación con los cambios físicos, mecánicos y microestructurales de las pastas de cemento en estado fresco sometidos a campos magnéticos estáticos y algunos de los resultados son los siguientes:

- a) El tratamiento magneto estático afecta el rango de hidratación del cemento, acelerándola al igual que el calor de hidratación y la temperatura de la muestra.
- b) Con relación a los tiempos de fraguado; a mayor resistencia a la inducción magnética, más rápido fraguará la pasta. Las tendencias coinciden con las curvas de evolución de calor.
- c) La inducción electromagnética genera efectos favorables para resistencia mecánica de la pasta de cemento.
- d) El incremento en la temperatura no tiene efectos negativos sobre la resistencia a compresión de la pasta de cemento, ya que el campo magneto estático afecta el proceso de hidratación a través de un proceso de reestructuración molecular; reduciendo la porosidad y proporcionando mejor resistencia mecánica.
- e) Los resultados de la caracterización microestructural proporcionados por la espectroscopia Raman; muestran que las bandas atribuidas a los principales componentes de la pasta de cemento hidratado incrementan o disminuyen debido al efecto de la inducción magneto estática. Lo que significa que a

mayor resistencia a la inducción magneto estática, mayor será el incremento en la creación de esos compuestos.

- f) El efecto del tratamiento magnético no tiene ningún efecto sobre la pasta de cemento endurecida después de 7 días, ya que no es posible modificar su microestructura morfológicamente.
- g) Las imágenes del microscopio de escaneo electrónico evidencian ciertas diferencias en la morfología y cantidad de Silicato de calcio hidratado ya que a mayores intensidades de inducción magneto estática la cantidad de este compuesto es mayor y su morfología se vuelve más densa.

En el año 2016 José de Jesús Velasco González presentó su tesis de maestría titulada "Influencia de la radiación láser CO<sub>2</sub> en las propiedades mecánicas y micro estructurales del concreto hidráulico" (Velasco-González, 2016). Dentro del cual se destacan los siguientes puntos:

- a) Los efectos de la temperatura han sido bastante estudiados y demuestran que en general, la resistencia a compresión del concreto decrece mientras la temperatura incrementa.
- b) Se evaluó de una manera visual muestras irradiadas de concreto con diferentes potencias de radiación (6.5, 5.5, 4.5, 3.5 Watts). Los resultados mostraron que desde potencias de 4.5 Watts se presentan fisuras por retracción térmica y por pérdida repentina de agua.
- c) En base a los resultados obtenidos se observa que no existe mejora de la resistencia mecánica.

En el año 2018, Sagrario Martínez Ramírez, Luís Díaz, Moisés Martín Garrido, Lucía Fernández Carrasco y David Torrens publicaron en la revista "Materials and Structures" un artículo titulado: " In situ chemical modification of C-S-H induced by CO<sub>2</sub> laser radiation" (Martínez-Ramírez, Díaz, Martín-Garrido, Fernández-Carrasco, & Torrens, 2018). La publicación presenta resultados con relación a los cambios químicos generados por la simulación del fuego con láser CO<sub>2</sub> a potencias de 14, 20, 30, 50, 70, 78 y 80 Watts en muestras de mortero de 1 x 1 x 6 cm, una relación

agua/cemento de 0.25 y con una edad de 50 días. Los sistemas utilizados para el análisis de los cambios químicos fueron: Difracción por Rayos X y Espectroscopía Raman, algunos de los resultados son los siguientes:

- a) Se demostró que la composición del silicato de calcio anhidro resultante del silicato de calcio hidratado depende de la potencia de radiación.
- b) Se identificó silicato tricálcico en el núcleo central de los puntos de aplicación del láser en donde las temperaturas fueron mayores.
- c) Se identificó silicato di cálcico en las zonas aledañas al núcleo de aplicación del láser donde las temperaturas fueron más bajas.
- d) También se identificó sulfato de calcio y otras fases anhidras en las muestras irradiadas con láser CO<sub>2</sub>. Para esto se observó que una potencia de radiación como 14 Watts induce la formación de anhidrita II en contraste con la formación de anhidrita I formada a potencias mayores como a 80 Watts.
- e) Se asumió que el silicato tricálcico se convertía en silicato di cálcico y viceversa con respecto al incremento de poder.



## **CAPITULO III: Marco teórico**

### **3.1 Interacción Radiación-materia.**

#### **3.1.1 Conceptos básicos de la teoría cuántica**

Establecer los conceptos básicos acerca del comportamiento de las ondas es necesario para comprender como es que la radiación electromagnética puede provocar un efecto en los materiales receptores.

Tal como se explica en (Chang & College, 2007); podemos pensar en una onda como una alteración vibrátil mediante la cual se transmite energía y a su vez, las ondas tienen características que las diferencian unas de otras como: longitud de onda, frecuencia, la amplitud y la rapidez que no es más que el producto de la longitud y la frecuencia.

Una vez que se conocen las características de las ondas es necesario comprender la diferencia entre los distintos tipos de ondas. Ya que el tipo de onda utilizada en el presente estudio es electromagnética, es necesario aclarar que según (Chang & College, 2007); una onda electromagnética es aquella que tiene un componente de campo eléctrico y un componente de campo magnético; ambos tienen la misma longitud de onda y frecuencia pero viajan en planos perpendiculares.

#### **3.1.2 Teoría cuántica de Planck**

De acuerdo con la teoría cuántica de Planck los átomos y las moléculas emiten o absorben energía únicamente de manera discreta; a la cantidad mínima de energía ( $E$ ) se le llama cuanto y está dada por la ecuación 3.1 donde  $h$  representa

la constante de Planck con un valor de  $6.63 \times 10^{-34}$  J-s y  $\nu$  representa la frecuencia de radiación.

$$E = h\nu \quad (3.1)$$

### 3.1.3 Espectros de emisión

Con la ayuda de (Chang & College, 2007) podemos definir que los espectros de emisión se refieren a las líneas de radiación emitida por las sustancias y que estas líneas corresponden a ciertas longitudes de onda generadas a partir de la liberación de energía en forma de fotones con frecuencia  $\nu$  y energía dada por la ecuación 3.1. Su origen se explica como la variación de un estado energético mayor a uno menor del electrón con respecto al núcleo.

### 3.1.4 El láser CO<sub>2</sub>

La palabra láser es el acrónimo del término en inglés light amplification by stimulated emission of radiation (amplificación de la luz mediante la emisión estimulada de radiación). Los láseres son sistemas que tienen la capacidad de emitir radiación con longitudes de onda que varían desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

El láser de dióxido de carbono es uno de los más utilizados y fue inventado por Kuman Patel en los laboratorios Bell en 1964; es uno de los láser de onda continua con mayor potencia disponibles, además es bastante eficiente ya que la relación entre la potencia de bombeo y de salida llega a ser del 20%.

El principio de un láser CO<sub>2</sub> es la transición entre los estados de vibración de los mismos estados electrónicos para lograr una inversión poblacional. Dado que los modos vibratorios y rotacionales del CO<sub>2</sub> no pueden excitarse por fotones, el tubo de descarga se llena con una mezcla de dióxido de carbono, nitrógeno y helio en proporciones de 15%,15%,70% respectivamente. Cuando el voltaje pasa a través

del gas; los electrones colisionan con las moléculas de N<sub>2</sub> y las excitan a su nivel vibratorio más bajo. A su vez estos niveles vibratorios tienden a estar bastante cerca de la energía del estado vibratorio asimétrico del CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, las moléculas excitadas de N<sub>2</sub> provocan a través de colisiones, la vibración asimétrica en el CO<sub>2</sub> la cual posteriormente decae a vibración simétrica y flexión para emitir fotones con longitud de onda de 10.6 y 9.6 μm respectivamente.

## **3.2 El concreto auto-compactable**

### **3.2.1 Cemento**

Tal como se menciona en "Cement and concrete terminology. (ACI 116R-00)" (ACI Committee 116, 2000); El cemento es un conglomerante hidráulico producido por la calcinación de una caliza arcillosa a una temperatura por debajo de su punto de sinterización y luego molido hasta obtener un polvo fino.

Existen varios tipos de cemento, sin embargo, para los fines de la presente investigación se incluye el estudio de los siguientes tipos:

- Cemento Portland
- Cemento compuesto

#### **Cemento portland**

Citando lo mencionado en la norma "Standard specification for Portland Cement (ASTM C150)" (ASTM Committee C01, 2000), el cemento portland es un cemento producido por la pulverización de Clinker que esencialmente contiene silicato de calcio hidráulico, normalmente contiene una o más de las formas de sulfato de calcio como una adición intermedia, y con la cual se ha integrado una adición de aire. En la misma normativa, se establecen que existen 8 tipos diferentes de cemento portland los cuales son:



- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Tipo I: Para usar cuando las propiedades especiales de algún otro tipo no son requeridas.
  - Tipo IA: Cemento con aire incluido para los mismos usos del tipo I. Donde el aire inducido es deseado.
  - Tipo II: Para uso general, más especialmente cuando se desea una resistencia moderada a los sulfatos o un calor de hidratación moderado.
  - Tipo IIA: Cemento con aire incluido para los mismos usos del tipo II. Donde el aire inducido es deseado.
  - Tipo III: Para usarse cuando se desea una resistencia temprana.
  - Tipo IIIA: Cemento con aire incluido para los mismos usos del tipo III. Donde el aire inducido es deseado.
  - Tipo IV: Para usarse cuando se desea un bajo calor de hidratación.
  - Tipo V: Para usar cuando se desea una alta resistencia a los sulfatos.

### **Cemento compuesto**

Citando lo mencionado en la norma "Standard terminology relating to hydraulic cement (ASTM C219-1)" (ASTM Committee C01, 2001), el cemento compuesto consiste esencialmente de dos o más constituyentes inorgánicos (al menos uno de ellos no es cemento portland o Clinker de cemento portland) los cuales ya sea por separado o en combinación contribuyen a las propiedades mecánicas del cemento.

Algunos de los componentes inorgánicos que comúnmente se añaden son:

- **Humo de sílice**, el cuál según "Cement and concrete terminology. (ACI 116R-00)" (ACI Committee 116, 2000); es un tipo de sílice no cristalino muy fino producido en hornos de arco eléctrico como subproducto de la producción de silicio elemental o de aleaciones que contienen silicio.
- **Ceniza volante**, el cuál según "Cement and concrete terminology. (ACI 116R-00)" (ACI Committee 116, 2000); es un residuo finamente dividido que resulta de la combustión del carbón molido o en polvo y que es transportado por los gases de combustión de la zona de combustión al sistema de eliminación de partículas.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- **Escoria**, el cuál según “Cement and concrete terminology. (ACI 116R-00)” (ACI Committee 116, 2000); es un producto no metálico que consiste esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases que son desarrolladas en condiciones de fundición simultáneamente con hierro en un alto horno.
  - **Puzolana**, es un material silíceo o silíceo y aluminoso, el cual posee un poco o nada de valor cementante pero que siendo finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio en temperaturas ordinarias para formar hidratos cemento.

De acuerdo con la norma “Standard Specification for blended hydraulic Cements (ASTM C595)” (ASTM Committee C01, 2010); se clasifican en 5 diferentes tipos de cemento compuesto, ya sea para uso general o especial usando escoria o puzolana, o ambos en combinación con cemento portland o Clinker de cemento portland o escoria con cal; la norma mencionada aplica para los siguientes tipos de cementos compuestos:

- Tipo IS: Cemento portland con escoria de alto horno.
- Tipo IP: Cemento portland con puzolana.
- Tipo P: Cemento portland con puzolana para uso cuando no se requieren resistencias tempranas altas.
- Tipo I(PM): Cemento portland modificado con puzolanas.
- Tipo I(SM): Cemento portland modificado con escoria.
- Tipo S: Cemento de escoria para usar en combinación con cemento portland al hacer concreto y en combinación con cal hidratada al hacer mortero de albañilería.

### 3.2.2 Cemento portland y agua

El agua cumple tanto funciones físicas como químicas en el cemento, físicamente es la responsable de las propiedades reológicas, mientras que químicamente se encarga de la hidratación.

A su vez es bien sabido que la relación agua-cemento cumple un papel importante con relación a la resistencia del producto endurecido (a menor relación agua cemento, mayor resistencia). Por lo tanto, si se desea elaborar un concreto con una resistencia importante, deberá tenerse en consideración utilizar una relación agua cemento baja. Esto generará un concreto con una densidad mayor y un producto de hidratación preferentemente interno.

Citando lo mencionado en (Pierre-Claude, 2008); La resistencia de la pasta de cemento hidratada puede mejorarse prestando mucha atención a los siguientes parámetros:

1. Porosidad: un alto número de poros grandes o de vacíos (diam>50 nm), en especial cuando se concentran en un lugar son perjudiciales para la resistencia.
2. Tamaño del grano: En general, la resistencia de una fase cristalina aumenta con la disminución del tamaño de grano.
3. Heterogeneidades: Con materiales de fases múltiples, las heterogeneidades microestructurales son una fuente de pérdida de resistencia.

Tal como se menciona en (Pierre-Claude, 2008), (Féret, 1892) presentó un documento en el que relaciona algunas variables con la resistencia a compresión del concreto y planteaba su conocida ecuación:

$$f'c = k\left(\frac{c}{c+w+a}\right)^2 \quad (3.2)$$

Donde  $f'c$  es la capacidad a compresión,  $c$ ,  $w$  y  $a$  son los volúmenes correspondientes a cemento, agua y aire respectivamente y  $k$  es una constante que depende del tipo de cemento. Realizando algunas operaciones algebraicas

y considerando que el volumen de aire atrapado en el concreto es menor al 1 o 2% del volumen total se presenta la ecuación:

$$f'c = k\left(\frac{1}{1+\frac{w}{c}}\right)^2 \quad (3.3)$$

Con la ecuación anterior, queda planteado que la resistencia a compresión es directamente proporcional a un factor dado por el cemento e inversamente proporcional a la relación agua cemento. Esto se debe a que siempre que se reduzca la relación agua cemento tendiendo a la óptima para una hidratación correcta y a su vez las características del cemento tiendan a generar productos de hidratación compactos, se obtendrá una menor porosidad en el concreto, lo cual tenderá a hacerlo un material con menor cantidad de heterogeneidades y por lo tanto mayor resistencia a compresión.

### 3.2.3 Concreto

De acuerdo con lo mencionado en "Cement and concrete terminology. (ACI 116R-00)" (ACI Committee 116, 2000) , se le nombra concreto a un material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante en el que se encuentran incrustadas partículas o fragmentos de agregado, usualmente una combinación de agregados finos y gruesos; en el concreto elaborado con cemento portland el aglutinante es una mezcla de cemento portland y agua, con o sin aditamentos.

De una manera práctica se puede decir que el concreto es una mezcla de: Cemento, Agua, Arena, Grava y aditivos. La finalidad de la elaboración del concreto es generar a partir de dicha mezcla un material que pueda cumplir con los requerimientos mecánicos a las cuales estará sometido, que se adapte a la forma deseada y que tenga una durabilidad adecuada.

### 3.2.4 Agregados

Los agregados dentro del concreto convencional desarrollan un papel principalmente volumétrico y reológico, ya que, tal como se menciona en (Pierre-Claude, 2008); observando algún espécimen ensayado a compresión; podemos determinar que, por lo general, la falla se desarrolla a través ya sea del mortero o de la superficie de contacto entre el agregado y el mortero. Es por lo que no es de suma importancia para un concreto convencional demostrar una resistencia alta por parte de los agregados; siempre y cuando estos provengan de un proceso de extracción que demuestre cualitativamente su resistencia.

Volumétricamente hablando, la dosificación de agregado grueso en el concreto convencional propuesto por el ACI se debe realizar considerando el módulo de finura de la arena, mientras que, la dosificación de la arena se debe realizar considerando alguno de los métodos propuestos para lograr ya sea un volumen neto o un peso definido. Esto para asegurar una buena graduación de los agregados. Otra perspectiva de dosificación se puede encontrar en el método propuesto por (Pierre-Claude, 2008), donde se menciona que; en relación a los agregados, el contenido de agregado grueso estará en función de la forma típica de la partícula.

Una característica muy importante al momento del diseño del concreto es considerar la cantidad de agua que absorben o incluyen los agregados ya que si se tiene considerada una relación agua cemento definida; ésta podría variar si se desprecia la influencia del agregado. Un método de referencia que se utiliza es el que se plantea en los "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of coarse Aggregate y Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C127 y 128)" (ASTM Committee C09, 1988) (ASTM Committee C09, 1998b). Los métodos tratados en estas normas están enfocados en lograr un agregado saturado con superficie seca, el cual, para el agregado grueso, se obtiene al saturarlo en agua por 24 horas y después secarlo en un horno hasta obtener una masa constante tomando los correspondientes datos de peso en

cada proceso y evaluándolos para obtener ya sea su peso volumétrico con superficie seca o su absorción. De igual forma, para el agregado fino se obtiene cuando bajo unas condiciones experimentales predefinidas, un pequeño cono de arena no se logra sostener debido a las fuerzas capilares entre las partículas.

### 3.2.5 El superplastificante

Tal como se menciona en (Pierre-Claude, 2008), hace aproximadamente 60 años se descubrió que algunas moléculas orgánicas conocidas por sus propiedades para la dispersión, podrían ser utilizadas para neutralizar las cargas presentes en las partículas de cemento, y así reducir su tendencia a flocular. De acuerdo con (Kreijger, 1980) químicamente un reductor de agua puede ser:

- Aniónicos.
- Catiónicos.
- No aniónicos.



Figura 1 Funcionamiento de superplastificantes (Modificado de Pierre-Claude, 2008).

Las partículas denominadas como aniónicas y catiónicas; contienen un lado muy cargado que neutraliza una carga opuesta a la partícula de cemento. Mientras que en las partículas denominadas como no-iónicas, las partículas actúan como dipolos unidos a los granos de cemento; actualmente la tecnología de los

superplastificantes ha avanzado bastante y se han clasificado en 3 tipos diferentes de generaciones las cuales se caracterizan por tener componentes y características diferentes.

La primera generación esta compuestas por los aditivos a base de Lignosulfonatos, los cuales son un sub-producto del proceso de la producción de celulosa dentro de la industria del papel; utilizando ésta clase de aditivo reductor de agua, se pueden lograr reducciones de entre 5 y 10% de agua, sin embargo, tienen la desventaja de que debido a la presencia de azúcares podrían retardar bastante el fraguado y podrían atrapar burbujas de aire significativamente grandes debido a que contienen surfactantes de madera.

La segunda generación está compuesta por aditivos a base de sulfonato de naftaleno y sulfonato de melamina ambos formaldehidos a los cuales se les asignó el nombre de superplastificantes, reductores de agua de alto rango o fluidificantes. La ventaja que presentan con respecto a las características de la primera generación es que, pueden utilizarse en cantidades mayores ya que son productos sintéticos. Sin embargo, su desventaja es la corta duración del efecto fluidificante ya que pueden mantener el efecto por un rango de entre 15 y 30 min.

La tercera generación de estos aditivos está compuesta por poli carboxilatos que se basan en copolímeros de ácido acrílico y ésteres de estos ácidos los cuales normalmente se denominan como "poli carboxilatos modificados". La diferencia principal entre las generaciones anteriores y ésta es que son macromoléculas que poseen cadenas laterales que son capaces hasta de modificar el tiempo el tiempo de fraguado y mejorar las resistencias iniciales y/o finales. Con este tipo de aditivos se pueden alcanzar reducciones de agua bastante altas, lo cual los identifica como aditivos ideales para generar concretos auto-compactables y de alto desempeño.



### 3.2.6 El concreto de alto desempeño

El concreto auto-compactable surgió como una rama de estudio en la tecnología del concreto partiendo de la necesidad de un concreto con características de durabilidad importante; una solución al problema planteado era proponer un tipo de concreto que fuera capaz de auto compactarse bajo su propio peso sin la necesidad de compactación.

Tal como menciona (Okamura & Ouchi, 2003) El prototipo de un concreto auto-compactable fue completado por primera vez en 1988 usando materiales que existían en el mercado y el prototipo se comportó de una manera exitosa con relación al secado y contracción por endurecimiento, calor de hidratación, densidad después del endurecimiento y otras propiedades. El prototipo fue nombrado como "Concreto de alto desempeño" y fue definido por sus tres etapas siguientes:

- Estado fresco: Auto-compactable.
- A temprana edad: Anulación de los defectos iniciales.
- Estado endurecido: Protegido contra factores externos.

Otra definición que surgió casi al mismo tiempo fue que el "Concreto de alto desempeño" se refiere a un concreto con una durabilidad alta debido a la baja relación agua-cemento.

Como se puede observar en la figura 2, Un concreto compactado con rodillo lograría una densidad mayor comparada con la de un concreto convencional y con un concreto auto-compactable, esto debido a la disminución de aire incluido (aprox. 1% vs 5% respectivamente). Comparando de una manera conjunta la relación de agua-cemento y la cantidad de agregado se puede concluir que a mayor cantidad de pasta menor necesidad de uso de agentes de compactación externos.



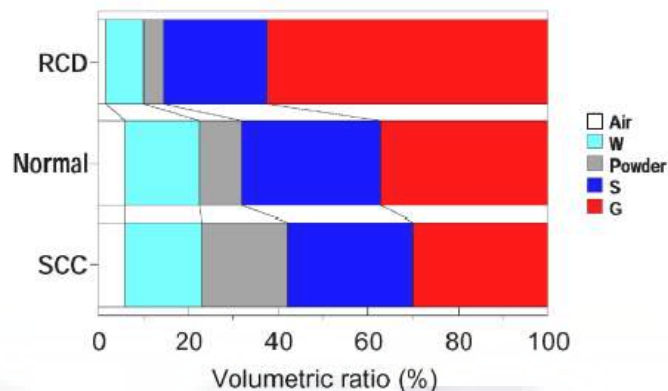


Figura 2 Comparación de las proporciones de mezcla del concreto auto-compactable con otro tipo de concretos convencionales (Okamura & Ouchi, 2003).

Con relación a las mezclas que dan origen a las características que definen un concreto auto-compactable se puede citar lo que menciona (Okamura & Ozawa, 1995) en donde se habla acerca de los siguientes puntos importantes:

1. Limitar el contenido de agregado grueso: Esto debido a que la frecuencia de colisión entre partículas de agregado grueso puede incrementar causando que el concreto se trabee.
2. Limitar el contenido de arena: Se demostró en el estudio mencionado que es conveniente mantener un máximo de 40% de volumen de arena sobre el volumen total de mortero.
3. Baja relación agua-cemento: Esto debido a que una alta relación agua-cemento genera en la pasta características indeseables como: (segregación y reducción de la viscosidad).

En general el sistema que se intenta generar en un concreto auto-compactable es como el mostrado en la figura 3 en donde se puede apreciar el mecanismo de fluencia del concreto idealizado.

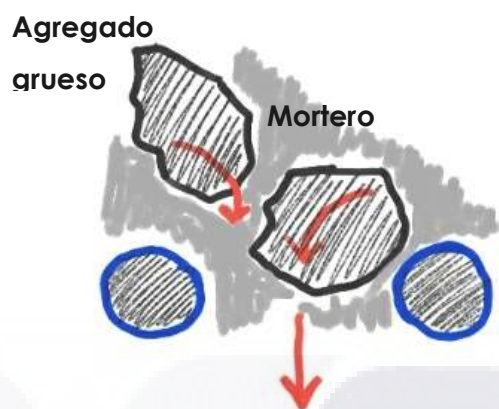


Figura 3 Mecanismo para lograr auto-compactación (Modificado de Okamura & Ouchi, 2013).





# CAPÍTULO

# IV

Desarrollo experimental

## CAPITULO IV: Desarrollo experimental

### 4.1 Metodología experimental.

Ya que se pretende analizar si la radiación láser CO<sub>2</sub> tiene un efecto en el concreto auto-compactable, es necesario conocer cuál es el fenómeno que se presenta con relación a las características mecánicas, físicas, microestructurales y químicas posteriores a la irradiación de la muestra. Para llevar a cabo dicha tarea se ha decidido abordar la experimentación bajo los siguientes criterios:

- Elaborar 10 tandas de 3 muestras cilíndricas de concreto auto-compactable de 10 x 20 cm a partir de las cuales 1 de las 3 muestras será irradiada con láser CO<sub>2</sub> (Ver anexo B); a una potencia de 6.5 Watts mientras que las otras 2 servirán como testigos sin irradiar. El objetivo de dicho concepto será el de comprobar la normalidad de los datos, así también como para utilizarlos en la comparativa de resistencias.
- Elaborar 5 tandas de 3 muestras cilíndricas bajo el mismo criterio de elaboración, pero irradiadas a una potencia de 2.5 Watts. El objetivo será el de considerarlas como principal representante de las muestras irradiadas con una menor potencia.
- Elaborar 2 tandas bajo el mismo criterio, pero considerando irradiarlas a las potencias (3.5, 4.5, 5.5 y 7.5). el objetivo de dicho procedimiento será el de utilizar los datos para ampliar el rango de observación dentro del análisis de potencias a irradiar

Para el desarrollo de las pruebas de compresión, una vez que las muestras tengan una edad de 7 días serán ensayadas a compresión y se recopilarán los datos correspondientes. Con la finalidad de llevar un control sobre las diferentes tandas a desarrollar se decidió clasificar los especímenes bajo la nomenclatura "Rij" donde R significa resistencia a compresión, i clasifica a el número de tanda destinada para cierta radiación y j clasifica la potencia de radiación utilizada.

Con lo referente a el análisis físico de los especímenes; en el momento del descimbrado de los moldes se realizará una inspección para detectar cualquier condición anormal y así ser reportada. Mientras que con respecto a el análisis microestructural y químico; se tomarán muestras representativas procedentes de los cilindros ensayados en compresión y se clasificarán bajo la nomenclatura (M1, M2 y M3) que representan muestras de la parte superior, media e inferior respectivamente las cuales se someterán a estudio por espectroscopía Raman.

El desarrollo experimental estará basado en la siguiente serie de pasos:

1. Elección de los materiales a utilizar.
2. Diseño de mezcla de concreto auto-compactable.
3. Elaboración de muestras de concreto para prueba a compresión.
4. Desarrollo de pruebas a compresión.
5. Inspección visual del acabado en los especímenes.
6. Extracción de muestras para análisis por espectroscopía Raman.
7. Análisis de resultados y descripción del fenómeno.

El análisis experimental estará basado en 2 partes, la primera parte se centrará en la elaboración de una prueba de hipótesis utilizando una distribución t de student para muestras relacionadas estableciendo el promedio de resistencias a compresión como parámetro de comparación. Para esto se revisará la normalidad de los datos con el uso de herramientas como la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de normalidad de Chapiro Wilk. La segunda parte se centrará en un análisis cualitativo-cuantitativo de las muestras de concreto auto-compactable irradiadas en contraste con las muestras no irradiadas con respecto a los siguientes criterios:

- Apariencia
- Microestructura.
- Composición química.

## 4.2 Elección de los materiales

### 4.2.1 Elección del cemento

Se utilizará el cemento portland compuesto CPC 30R, el cual, de acuerdo con la ficha técnica del producto cumple con la norma NMX-C-414-ONNCCE. Esto debido a que es uno de los cementos con mayor comercialización en México.

En la tabla 1, se puede observar los resultados presentados por (M. Moreno-Virgen, 2010) provenientes de estudios por Espectroscopia Raman, Microscopía Electrónica de Barrido, Difracción de Rayos X entre otros.

Tabla 1 Composición química y propiedades físicas del cemento utilizado (M. Moreno-Virgen, 2010).

Análisis químico	Especificación NMX-C-414- ONNCCE	Resultado
SiO <sub>2</sub>	-	22.97 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4.53 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2.72 %
CaO <sub>f</sub>	-	61.38 %
CaO <sub>L</sub>	-	0.47 %
MgO	-	1.46 %
SO <sub>3</sub>	4.00 % máx.	2.61 %
R.I.	-	8.14 %
Na <sub>2</sub> O	-	0.65 %
K <sub>2</sub> O	-	1.10 %
Blaine	-	4327.00 cm <sup>2</sup> /g
% Finura Tamiz 325 (45 µm)	-	1.60 %
Sanidad		
Expansión	0.80 % máx	-
Contracción	0.20 % máx	-0.03 %

Tiempo de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	45.00 min	192.00 min
Final	375.00 min	313.00 min
Fraguado Falso %	-	79.00 min
Resistencia a la compresión		
1 día	-	16.9 N/mm <sup>2</sup>
3 días	20.00 N/mm <sup>2</sup> min	28.8 N/mm <sup>2</sup>
7 días	-	34.90 N/mm <sup>2</sup>
28 días	30.00-50.00 N/mm <sup>2</sup>	40.80 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.2.2 Elección del superplastificante

Como aditivo superplastificante, se utilizará “Sika ViscoCrete 7300 HE” el cuál de acuerdo con la ficha técnica se describe como: Aditivo líquido con base de poli carboxilatos modificados con densidad de 1.12 kg/l aprox.; reductor de agua de alto rango y superplastificante de alto desempeño de tercera generación para concretos de altas resistencias iniciales con inclusión de aire controlada, no contiene cloruros y cumple con las normas: ASTM C 494 Tipo F y ASTM C 1017 Tipo 1.

De acuerdo con los usos especificados por el fabricante el aditivo se adapta excelentemente para los fines de la presente investigación, ya que los usos recomendados son:

- Concretos con gran reducción de agua.
- Concretos de altas presentaciones.
- Concretos de altas resistencias iniciales.
- Prefabricados de concreto.

Algunas ventajas que menciona la ficha técnica son:

- Alta compactación.

- Alta reducción de agua e inclusión de aire controlada.
- Altas resistencias iniciales.
- Disminución de la retracción del concreto.
- Reducción de la carbonatación del concreto.

La dosificación recomendada por el fabricante es de 0.4 a 1.5% del peso del cemento (4.0 a 14 ml/kg de cemento) dependiendo de que se emplee como superplastificante o como reductor de agua de alto poder.

Con la finalidad de observar la compatibilidad y el punto de saturación del superplastificante con el cemento, se desarrolló la prueba del cono de Marsh elaborando pastas de cemento con una relación de agua-cemento de 0.4 y añadiendo respectivamente dosificaciones de superplastificante desde la dosificación recomendada por el proveedor hasta una más baja con la intención de identificar el punto de saturación. La prueba mostró que la dosis recomendada por el fabricante cumple perfectamente en función de la compatibilidad y que el punto de saturación corresponde a una dosis de alrededor del 0.4%.

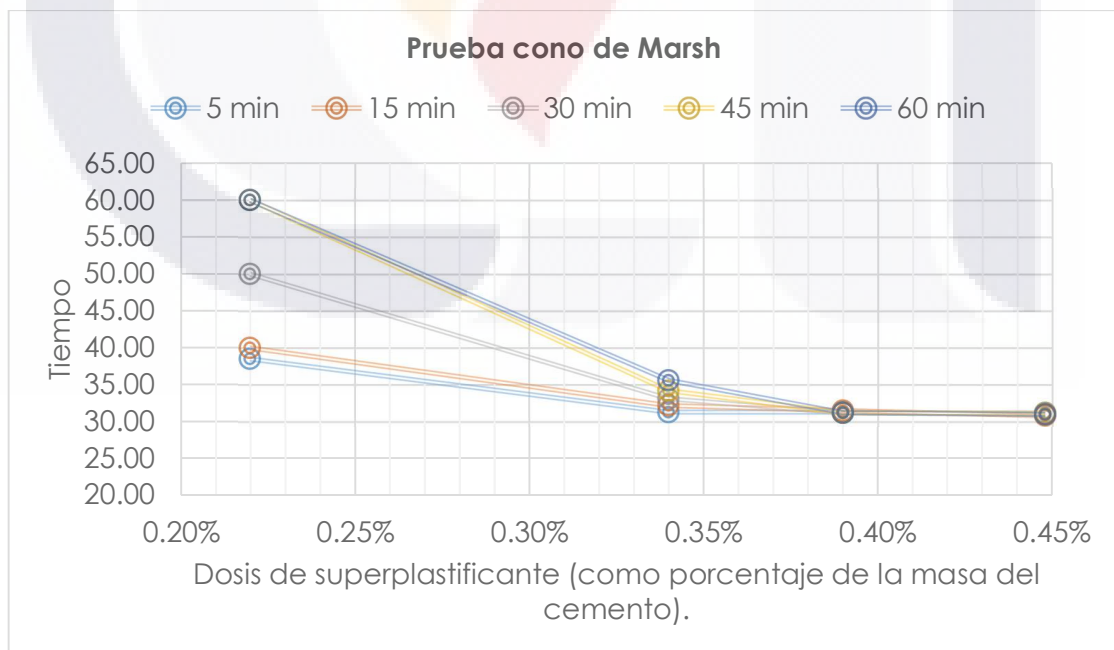


Figura 4 Resultados de la prueba del cono de Marsh.



### **4.2.3 Selección de los agregados**

#### **Agregado grueso**

El agregado grueso utilizado se consiguió en la trituradora de la ciudad de Lagos de Moreno, se tomó en consideración la limitante del tamaño máximo de agregado, la cual en éste caso es de  $\frac{1}{2}$ " , posteriormente se realizaron los análisis correspondientes de acuerdo con "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of coarse Aggregate (ASTM C127)"(ASTM Committee C09, 1988) con la finalidad de obtener las características de absorción y la gravedad específica saturado con superficie seca; los resultados de dichos análisis son 1.38% y 2.66 Ton/m<sup>3</sup> respectivamente.

#### **Agregado fino**

El agregado fino utilizado se consiguió en la presa de la sauceda ubicada en la ciudad de Lagos de Moreno, se realizaron los análisis correspondientes de acuerdo con relación a "Standard Specification for Concrete Aggregates )(ASTM C33)" (ASTM Committee C09, 2001b) y "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128)" (ASTM Committee C09, 1998b) con la finalidad de obtener las características propias del agregado fino; los resultados obtenidos de dichas pruebas fueron las siguientes: un módulo de finura de 3.0, un porcentaje de absorción de 2.25% y una gravedad específica de 2.45 Ton/m<sup>3</sup>.

### **4.3 Diseño de concreto auto-compactable.**

Se diseñó una mezcla para concreto auto-compactable, la cual se realizó tomando como base el método propuesto por (Pierre-Claude, 2008) para concretos de alto desempeño. El método está definido por los siguientes pasos:

1. Relación Agua/material cementante.
2. Contenido de agua.

3. Dosificación de superplastificante.
4. Contenido de agregado grueso.
5. Contenido de aire atrapado.

#### 4.3.1 Relación agua/material ligante

Tomando como base de selección la figura 5, en la que se muestra una gráfica la relación de resistencia a compresión y la relación agua/material cementante realizada con pruebas en cilindros de 10 x 20 cm; se seleccionó una relación agua/material cementante de 0.4, la cual corresponde a un área que incluye valores de resistencia nominal a compresión entre 22.5 y 52.5 MPa (229.36 y 535.17 kg/cm<sup>2</sup>).

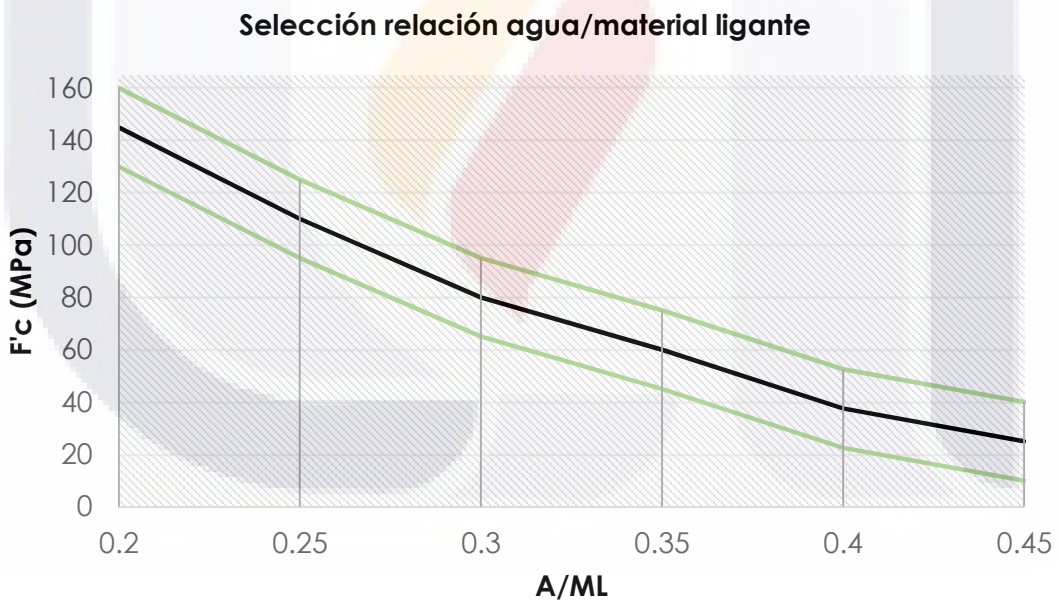


Figura 5 Relación A/ML propuesta frente a la relación de resistencia a la compresión (Pierre-Claude, 2008).

**4.3.2 Dosificación de agua.**

Con la finalidad de tener un acercamiento a la dosificación de agua correcta, el método propuesto por (Pierre-Claude, 2008) propuso considerar la dosis de agua en función del punto de saturación tal como se muestra en la figura 6, como se puede observar, en la figura propuesta no se logra obtener un dato tangible de la dosis de agua dado que no se tenía contemplado éste rango, sin embargo realizando una interpolación lineal dada la lógica de dosificación, se seleccionó un dato de entre 115 y 120 litros por m<sup>3</sup> de concreto. Sin embargo, después de varios diseños y pruebas se llegó a un dato correspondiente a 210 lt/m<sup>3</sup> de concreto, la explicación a la que se llegó es que dado que el agregado grueso es de TMA de ½" la demanda de mortero es mayor que para un concreto con agregado grueso con TMA de ¾".

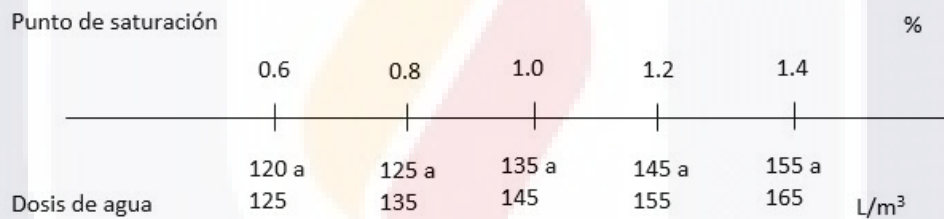


Figura 6 Relación entre el punto de saturación y la dosificación de agua (Pierre-Claude,2008).

**4.3.3 Dosificación de súper plastificante**

La dosificación del superplastificante se realizó tomando en cuenta la prueba del cono de Marsh y la cantidad recomendada por el fabricante, después de varias pruebas utilizando dosificaciones tanto de entre 4.00 a 8.00 ml/kg de cemento, se decidió establecer una dosificación de 6.00 ml/kg de cemento, esto debido a que con la dosificación seleccionada el comportamiento de la mezcla se mantenía uniforme y mostraba las características reológicas necesarias.

#### 4.3.4 Contenido de agregado grueso.

De acuerdo con el planteamiento propuesto por (Pierre-Claude, 2008), el contenido de agregado grueso se puede realizar analizando la forma de la partícula tal como se observa en la figura 7, en éste caso se definió que la partícula de agregado tiene una forma entre cúbico y redondo y por lo tanto se podría seleccionar una dosificación de 1125 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, después de varios diseños y pruebas se llegó a una dosificación de 675 kg/m<sup>3</sup>. Lo anterior debido a que se buscaba tener una relación grava arena la cual evitara el sangrado y proporcionara las características al concreto auto-compactable.

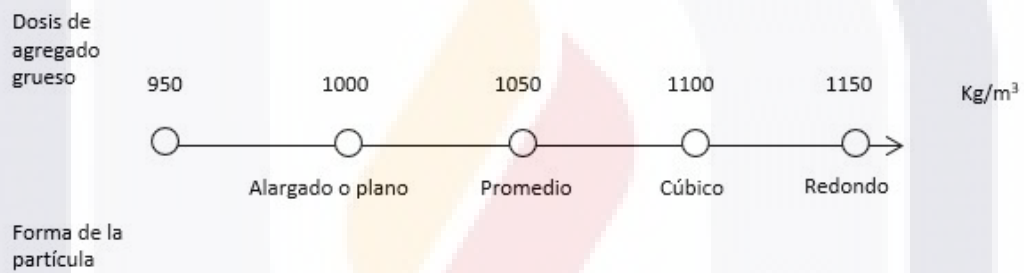


Figura 7 Relación entre la dosis de agregado grueso y la forma de la partícula (Pierre-Claude,2008).

#### 4.3.5 Contenido de aire.

Teóricamente no es necesario diseñar el concreto para una cantidad de aire específica ya que no se plantea ser utilizado en ambientes de congelamiento, sin embargo, para fines de la presente investigación se consideró una cantidad de aire atrapado de 1.5%, dato que se ajusta a dosificaciones normales.

**4.3.6 Procedimiento de cálculo para el diseño del concreto auto-compactable.**

Se desarrolló una hoja de cálculo en Excel donde se vaciaron los datos anteriormente mencionados. La hoja se elaboró estableciendo una serie de pasos donde se contempla como primer punto las características de los materiales y se calcula el volumen de concreto requerido para cada tanda (3 cilindros por tanda) donde:

- **G<sub>c</sub>**: Gravedad específica del cemento o material cementicio en (T/m<sup>3</sup>).
- **%**: Porcentaje de participación del material cementicio en la mezcla.
- **d**: Diámetro del cilindro en (m).
- **h**: Altura del cilindro en (m).

**1.- Gravedades específicas de los materiales cementantes y su porcentaje de participación.**

	<b>G<sub>c</sub></b>	<b>%</b>	<b>d (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b>Número</b>	<b>Volúmen (m<sup>3</sup>)</b>
Cemento	3.14	100%	0.1	0.2	3	0.002
-	2.20	0%				<b>Cantidad (kg)</b>
-	1.00	0%				10.714

*Figura 8 Paso 1 para el cálculo del concreto auto-compactable.*

De acuerdo con el cálculo teórico, se obtuvo un peso necesario de concreto de 10.714 kg, sin embargo, dado a las pérdidas de manejo y por cuestiones de calidad se optó por insertar una cantidad definitiva de 13kg por tanda.

Como segundo paso se insertó un apartado donde se vaciaron los datos correspondientes a las características de los agregados calculados anteriormente en donde:

- **G<sub>ssd</sub>**: Gravedad específica del agregado en condición de saturado con superficie seca en (T/m<sup>3</sup>).
- **W<sub>abs</sub>**: Porcentaje de agua absorción del agregado.
- **W<sub>tot</sub>**: Porcentaje de contenido total de agua en el agregado.

- **W<sub>h</sub>**: Porcentaje del contenido de humedad en el agregado.

**2.- Características de los agregados.**

<b>Agregado</b>	<b>G<sup>SSD</sup></b>	<b>W<sub>abs</sub></b>	<b>W<sub>tot</sub></b>	<b>W<sub>h</sub></b>
<b>Grueso</b>	2.66	1.38%	0.00%	-1.38%
<b>Fino</b>	2.45	2.25%	1.50%	-0.75%

Figura 9 Paso 2 para el cálculo del concreto auto-compactable.

En base a varios análisis se optó por insertar un dato de porcentaje del contenido total de agua en el agregado grueso de 0.00% dado que, en la mayoría de los casos no existía agua presente en el agregado y para el agregado fino un dato 1.50%, ya que, en promedio, varias iteraciones resultaron con ese porcentaje.

Como tercer paso se procedió a insertar las características de los aditivos procedentes tanto de la ficha técnica como de las deducciones obtenidas de la prueba del cono de Marsh.

**3.- Características de los aditivos.**

<b>Aditivo</b>		
<u>Súper-plastificante</u>		
	Gravedad esp. (Kg/l)	1.21
	Dosis (ml/kg)	6.00

Figura 10 Paso 3 para el cálculo del concreto auto-compactable.

Como cuarto y último punto se procedió a realizar la tabla de cálculo de las cantidades específicas por tanda, ésta tabla contiene columnas de proceso que van de izquierda a derecha depurando el contenido con ajustes en el contenido de agua y convirtiendo la dosificación de contenido por m<sup>3</sup> a contenido por peso decaído. Cabe mencionar que se añadió un apartado final en donde se contempla la relación entre el contenido de grava y arena y otro apartado en

donde se transforma el peso del superplastificante a mililitros, esto con la finalidad de revisar la filosofía de diseño y hacer más fácil el procedimiento de mezclado respectivamente.

Tabla 2 Tabla de cálculo para el concreto auto-compactable

**4.- Calculo de diseño.**

w/c= 0.40  
 CANTIDAD DE CONCRETO A FABRICAR (Kg) 13.00

MATERIALES	Contenido kg/m3	Volumen l/m3	Condic. De dosis SSS kg/m3	Factor de corrección l/m3	Composición		
					1 m3	Mezcla de prueba (kg)	
Agua	210.00	210.00	210.00		225.76	1.29	
Cemento	525.00	167.20	525.00		525.00	3.00	
525.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	Relación grava/arena
	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	
Agregado grueso	675.00	253.76	675.00	-9.32	665.69	3.81	
Agregado fino		350.89	859.69	-6.45	853.24	4.88	0.72
Aire	1.50%	15.00	0.00				Cantidad se S.P. en ml
Súper-plastificante	3.81	3.15	3.81		3.81	0.022	18.01
<b>Total</b>		1000.00	2273.50	-15.76		13.00	

**4.3.7 Revisión de características auto-compactables.**

Con la finalidad de verificar las características para un concreto auto-compactable se realizó la prueba de flujo de revenimiento en la cual se comprobaron 3 características principales las cuales son T50, el índice de estabilidad visual y la extensión máxima, los resultados de dichas pruebas son 3 segundos en promedio, estable y 70 cm respectivamente, estos datos se



encuentran dentro de los límites aceptables con respecto a la normatividad mexicana correspondiente (NMX-C-472-ONNCCE-2013, 2013).



Figura 11 Prueba de flujo de revenimiento.

#### 4.4 Elaboración de muestras.

El proceso de elaboración de cilindros se desarrolló apoyado en la normatividad vigente, con la cual, se seleccionaron moldes marca “Alcon” para cilindros con un tamaño 10 x 20 cm apoyado en la norma “Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically” (ASTM Committee C09, 1998a). Posteriormente basado en la norma “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory” (ASTM Committee C09, 2000), se procedió a realizar un mezclado de los materiales por tanda e inmediatamente elaborado el concreto se procedió a insertar uno de los colados en el sistema de radiación mientras que los 2 restantes se depositaron a un costado para mantenerlos lo más posible bajo las mismas condiciones atmosféricas.

Luego del proceso de radiación por láser CO<sub>2</sub> de una de las muestras de concreto auto-compactable (ver capítulo 4.5), se procedió a realizar el curado de los cilindros sumergiéndolos en una cubeta con agua hasta el día de la prueba en compresión.



#### 4.5 Proceso de radiación por láser CO<sub>2</sub>.

Complementando el proceso de elaboración de los cilindros de concreto auto-compactable se mencionó que se insertó uno de los cilindros bajo un sistema predefinido para irradiarlo, se elaboró un esquema que muestra cuales son los componentes principales (ver figura 12), como se puede apreciar, el sistema consta de 3 componentes principales los cuales son:

1. Máquina generadora del láser CO<sub>2</sub>.
2. Lente de seleniuro de zinc ampliador del haz del láser.
3. Banco regulador de amplitud del láser.

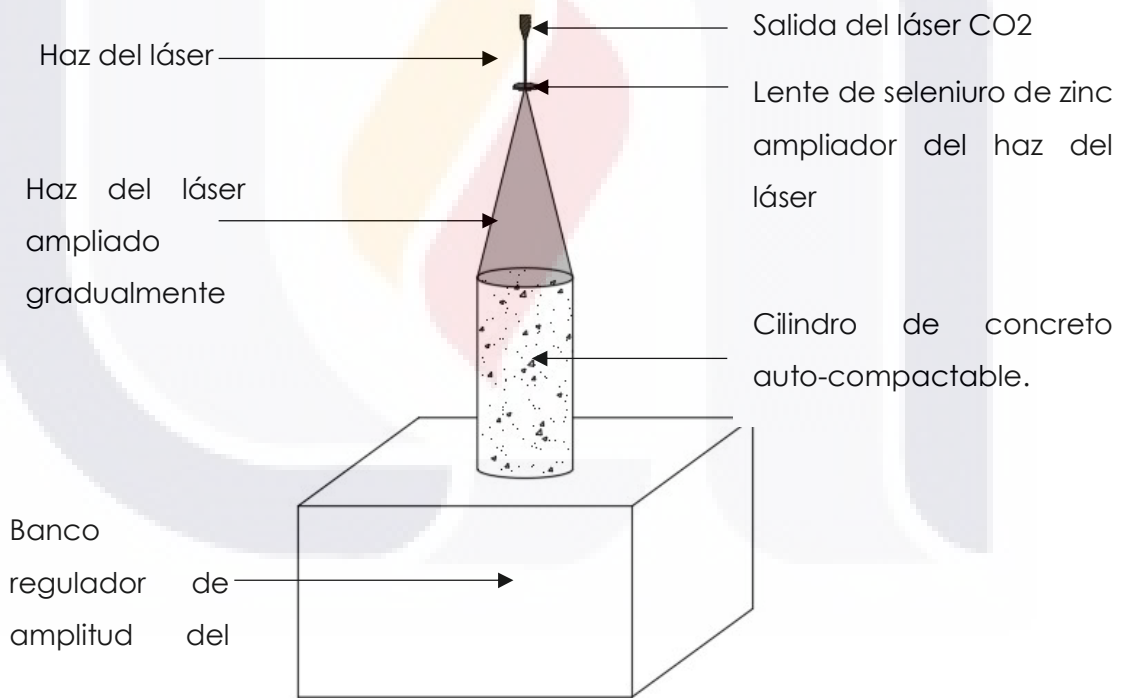


Figura 12 Sistema para irradiar los cilindros de concreto auto-compactable.

Cabe mencionar que durante el proceso de ajuste de la potencia del láser fue necesario auxiliarse de un dispositivo de medición WISARD 250 el cuál comprobó la potencia inducida en cada una de las tandas.

#### 4.6 Desarrollo de pruebas en compresión.

Como se mencionó en capítulos anteriores, al séptimo día de elaboración de una tanda se desarrolló el proceso de ensaye en compresión utilizando una prensa marca "Controls" modelo "50-C3144" con una capacidad de fuerza de 1500 kN; insertando los cilindros de concreto auto-compactable bajo las instrucciones de seguridad del personal a cargo del laboratorio construcción de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, para este proceso fue necesario hacer referencia a lo que se indica en la norma "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens" (ASTM Committee C09, 2001a). Cabe mencionar que durante este proceso se tuvo especial cuidado en el cabeceo de los cilindros el cuál se realizó por medio de neoprenos nuevos marca "Elvec".



Figura 13 Fotografía de cilindro inmediatamente después de la falla en compresión.

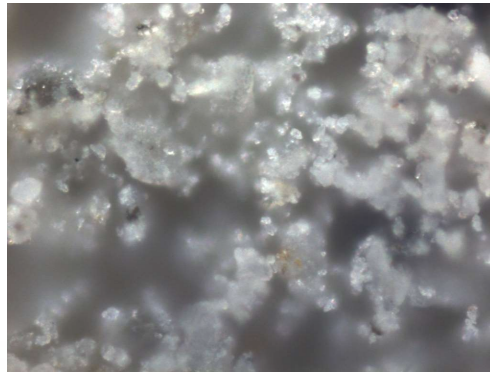
#### 4.7 Proceso de análisis por espectroscopía Raman.

Con la finalidad de corroborar los resultados y ligar de alguna manera el efecto obtenido en las tandas representativas, se optó por apartar una tanda completa tanto de los cilindros que incluían una muestra irradiada a 6.5 Watts como una 2.5 Watts para realizar un corte por la mitad vertical de los cilindros, y luego de un análisis visual de distribución del agregado se procedió a retirar una cantidad de material de las profundidades M1, M2, M3.

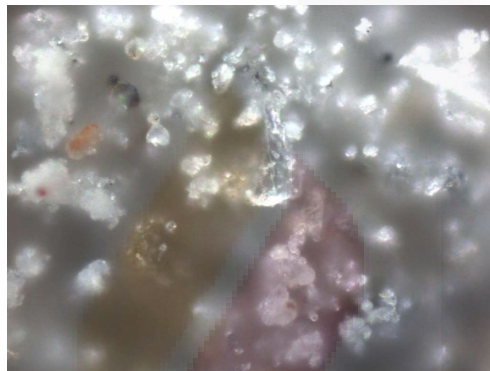


*Figura 14 Fotografía de cilindro para extracción de muestras para análisis por espectroscopía Raman.*

Una vez que fueron recopiladas las muestras se procedió a cuartearlas en 64 porciones por muestra para su correspondiente enfoque y barrido en un microscopio Raman de marca "ThermoFisher Scientific" a una potencia de 10W utilizando láser de 780  $\mu\text{m}$  con una ganancia de 2, corrección de fluorescencia, resolución de 4.7 a 8.7  $\text{cm}^{-1}$  y apoyado por un microscopio acoplado "MPlan 50x/75" del cual se capturaron unas imágenes con enfoque a 50x en las cuales se puede observar una distribución de los componentes del concreto.



*Figura 15 Imagen a 50X de la muestra irradiada con 6.5 Watts.*



*Figura 16 Imagen a 50X de la muestra irradiada con 2.5 Watts.*

Para finalizar el proceso se procedió a procesar los datos arrojados por el microscopio Raman a través de computadora y se desarrollaron las gráficas comparativas de los espectros.

#### **4.8 Proceso de análisis estadístico.**

Para culminar con el proceso experimental planteado, se procedió a realizar el análisis estadístico, el cual se comenzó por encasillar los datos en sus grupos correspondientes (no irradiados, irradiados de bajo efecto e irradiados de alto efecto). Para los cilindros hermanos (par de cilindros no irradiados obtenidos de una

tanda) se obtuvo un valor correspondiente de rango interno de resistencia a compresión para luego ser transformado en un rango promedio total, de igual forma se obtuvieron los datos de promedio de resistencia en compresión, y de coeficiente de variación. El procedimiento de encasillamiento de datos para los cilindros irradiados fue parecido con la diferencia que en este caso se obtuvo un rango interno que incluía al total de los cilindros irradiados a una misma potencia para luego transformarlo en un rango promedio total y al igual que a los no irradiados se obtuvieron los datos de promedio de resistencia en compresión y de coeficiente de variación.

Una vez que se tuvieron los resultados encasillados, se procedió a realizar la prueba de normalidad correspondiente; ya que los resultados de compresión de los cilindros no irradiados conforman un total de 46 muestras, se aplicó la prueba de normalidad de kolmogorov-Smirnov la cuál es un comparativo de diferencias entre el estadístico arrojado por la frecuencia relativa absoluta de los datos analizados y una distribución normal de la misma. De manera similar se aplicó el test de Shapiro-Wilk para los datos obtenidos de los ensayos de compresión para cilindros irradiados tanto de bajo efecto como de alto efecto, los cuales conforman un total de 11 y 12 muestras respectivamente.

Para finalizar con el proceso estadístico se procedió a elaborar histogramas de los grupos y a realizar gráficas comparativas tanto del historial de resistencia como de su correspondiente distribución normal.

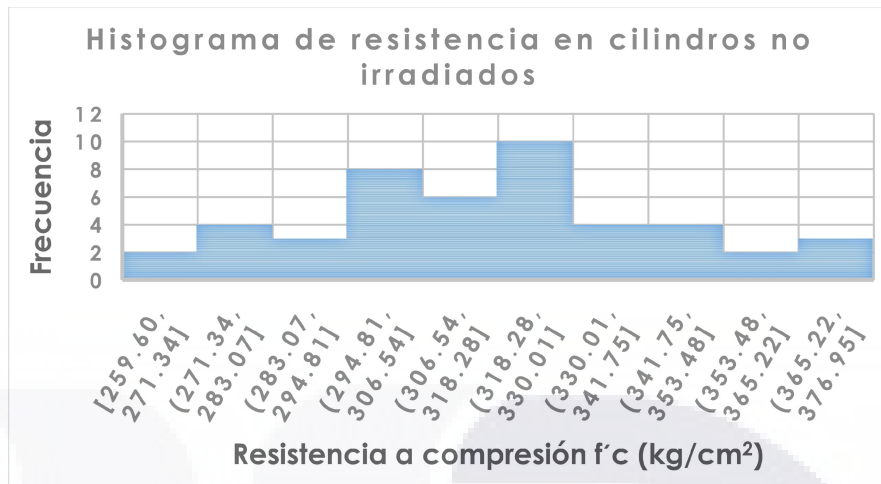


Figura 17 Histograma de resistencia en cilindros no irradiados.

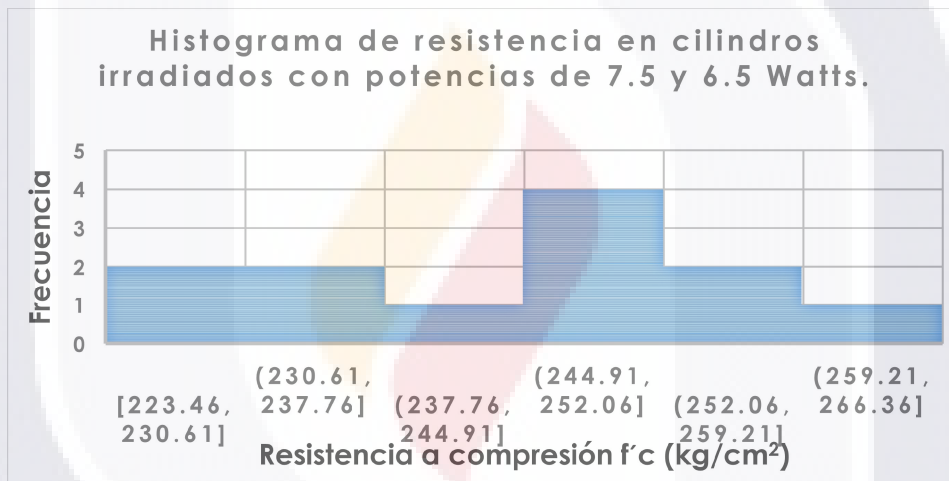


Figura 18 Histograma de resistencia en cilindros irradiados con potencias de 7.5 y 6.5 Watts.

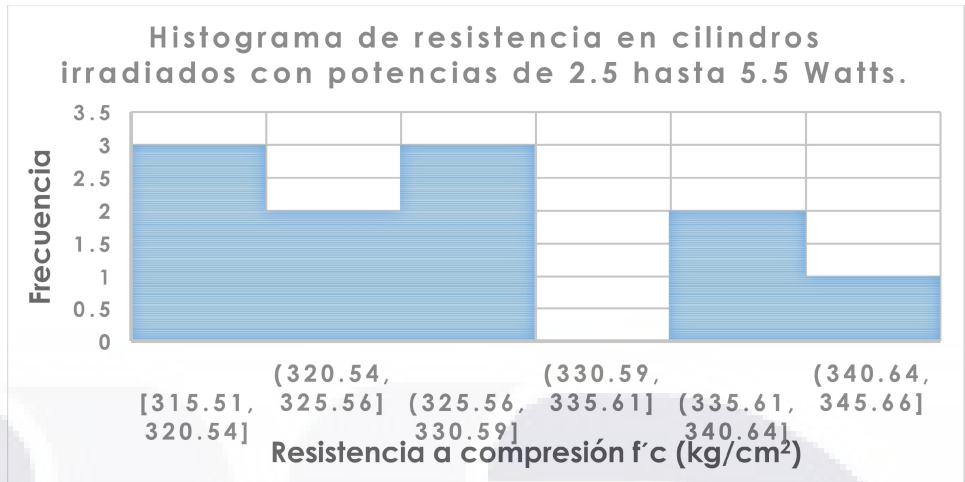
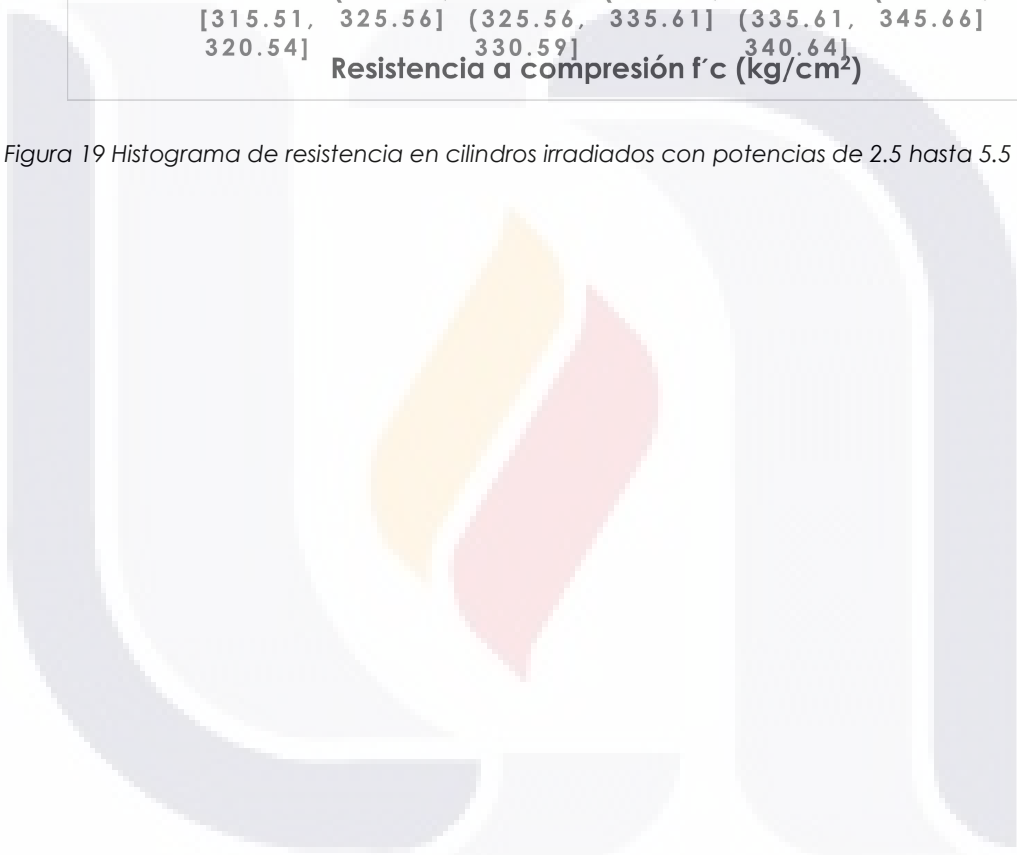


Figura 19 Histograma de resistencia en cilindros irradiados con potencias de 2.5 hasta 5.5 Watts.





# CAPÍTULO

# V

## DISCUSION DE LOS RESULTADOS



## CAPITULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 5.1 Resultados de las pruebas a compresión.

Los resultados de las pruebas en compresión (Ver anexo A) se vaciaron en una gráfica para analizar el historial de carga con relación a la potencia de radiación.

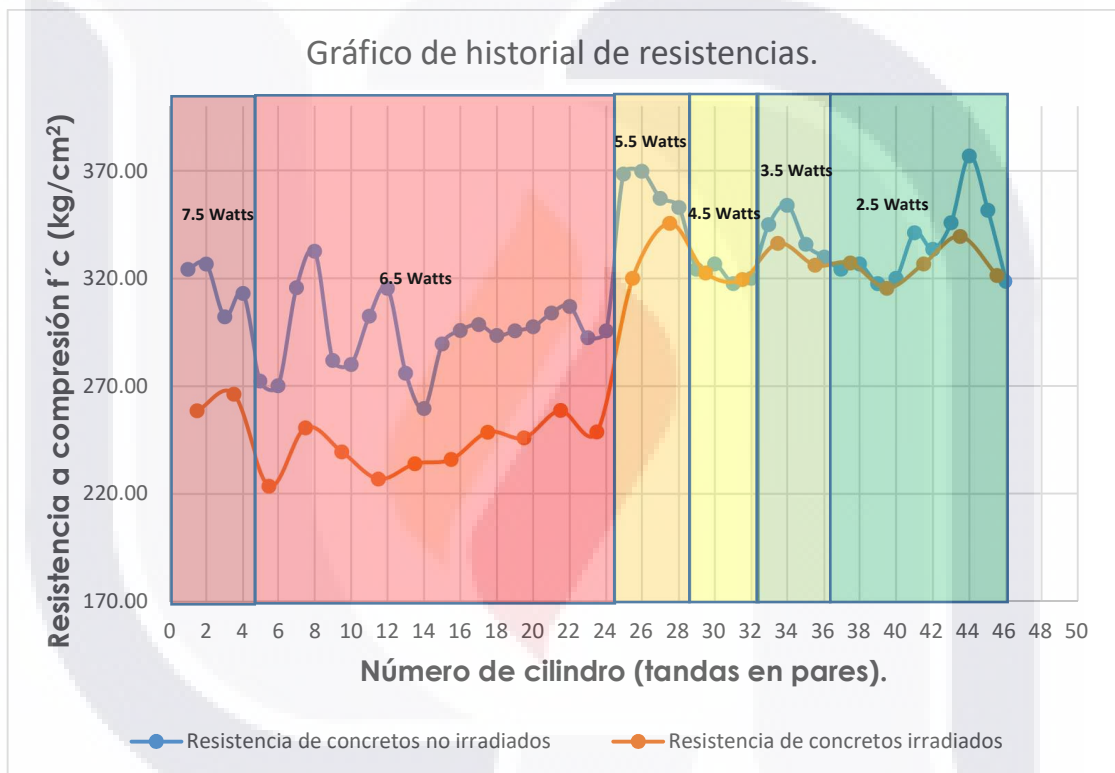


Figura 20 Grafica de resistencias por historial de tandas.

Como se puede observar en la figura 20 en la cual se comienza el historial de mayor a menor potencia de radiación de izquierda a derecha, la brecha entre las diferencias de resistencia se reduce con relación a la disminución de potencia, esto por un lado, podría demostrar de manera inmediata, que existe un efecto provocado por la radiación láser CO<sub>2</sub> con respecto a las características mecánicas del concreto auto-compactable, sin embargo, se plantea la incógnita de que a su

vez; con el incremento de potencia, la temperatura local cerca del punto de recepción del haz sobre el espécimen aumenta causando así una posible pérdida de agua lo cuál podría ser el motivo por el cual se reduce la resistencia. Para analizar este fenómeno desde un punto de vista cualitativo, hacemos referencia a las fotografías de los cilindros en el momento del descimbrado

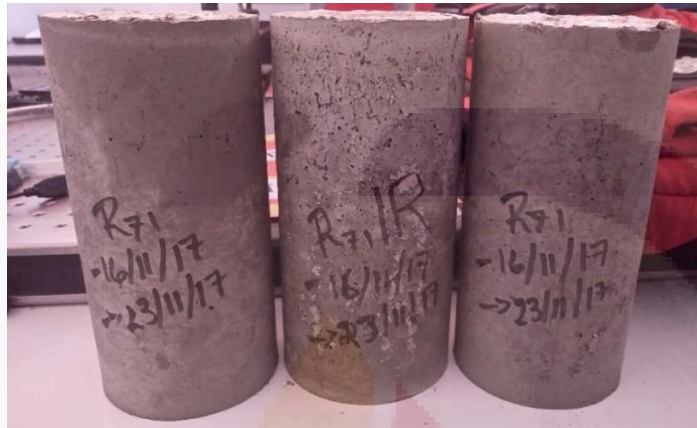


Figura 21 Tanda con cilindro irradiado a 6.5 Watts.

Como muestra se presenta la figura 24, en la cual se puede observar una tanda dentro de la cual forma parte un cilindro irradiado a 6.5 Watts marcado con la denominación "IR". La presencia de poros cerca de la superficie de exposición expone, más que una pérdida de calidad de apariencia, una interacción entre la radiación láser CO<sub>2</sub> y el concreto auto-compactable. Es por lo que dado este fenómeno visual se presenta la cuestión comentada anteriormente.

Para respaldar la hipótesis y corroborar el análisis visual, se hace referencia a el estudio estadístico, a continuación, se presenta un resumen de los resultados:

**PASO 1 (REDACCIÓN DE HIPÓTESIS).**

**Ho=** La radiación laser CO<sub>2</sub>, no tiene un efecto con relación a las características mecánicas del concreto auto-compactable ya que la radiación electromagnética no es capaz de transmitirse a través de la pasta de cemento.

**H1=** La radiación laser CO<sub>2</sub> tiene un efecto con relación a las características mecánicas del concreto auto-compactable gracias a que la radiación electromagnética es capaz de transmitirse a través de la pasta de cemento.

**PASO 2 (ESTABLECIMIENTO DEL GRADO DE SIGNIFICANCIA).**

Se considerará un nivel de significancia del 1%.

**PASO 3 (REVISIÓN DE NORMALIDAD DE LOS DATOS).**

Criterio para determinar la normalidad:

**Estadístico>Estimador**, Los datos provienen de una distribución normal.

**Estadístico<Estimador**, Los datos no provienen de una distribución normal.

*Tabla 3 Revisión de normalidad para resultados de compresión en muestras sin irradiar.*

<b>NORMALIDAD DE MUESTRAS SIN IRRADIAR (Kolmogorov-Smirnov)</b>		
<b>Estadístico=0.20</b>	<b>&gt;</b>	<b>Estimador=0.036</b>
<b>CONCLUSIÓN:</b>		
Los datos provenientes del cálculo de la resistencia a compresión de las muestras sin irradiar provienen de una distribución normal.		

**P-valor> $\alpha$** , Los datos provienen de una distribución normal.

**P-valor< $\alpha$** , Los datos no provienen de una distribución normal.

*Tabla 4 Revisión de normalidad para resultados de compresión en muestras con radiación de 6.5 y 7.5 Watts.*

<b>NORMALIDAD DE MUESTRAS IRRADIADAS DE 6.5 Y 7.5 Watts (Shapiro Wilk)</b>		
<b>P-valor= 0.97</b>	<b>&gt;</b>	<b>0.01</b>
<b>CONCLUSIÓN:</b>		
Los datos provenientes del cálculo de la resistencia a compresión de las muestras irradiadas provienen de una distribución normal.		

Tabla 5 Revisión de normalidad para resultados de compresión en muestras con radiación de 2.5 a 5.5 Watts.

<b>NORMALIDAD DE MUESTRAS IRRADIADAS DE 2.5 Y 5.5 Watts (Shapiro Wilk)</b>		
<b>P-valor= 0.91</b>	<b>&gt;</b>	<b>0.01</b>
<b>CONCLUSIÓN:</b>		
Los datos provenientes del cálculo de la resistencia a compresión de las muestras irradiadas provienen de una distribución normal.		

**PASO 4 (DESICIÓN ESTADÍSTICA).**

Si la probabilidad obtenida **Estadístico > = Valor crítico**, se acepta H1.

Si la probabilidad obtenida **Estadístico < Valor crítico**, se acepta Ho.

Tabla 6 Prueba de hipótesis para muestras relacionadas con radiación de 6.5 y 7.5 Watts.

<b>DESICIÓN ESTADÍSTICA PARA MUESTRAS IRRADIADAS DE 7.5 Y 6.5 Watts</b>		
<b>Estadístico t = 12.76</b>	<b>&gt;</b>	<b>Valor crítico = 3.105</b>
<b>CONCLUSIÓN:</b>		
La radiación laser CO <sub>2</sub> con potencia de 6.5 y 7.5 Watts, tiene un efecto con relación a las características mecánicas del concreto auto-compactable gracias a que la radiación electromagnética es capaz de transmitirse a través de la pasta de cemento.		

Tabla 7 Prueba de hipótesis para muestras relacionadas con radiación de 2.5 a 5.5 Watts.

<b>DESICIÓN ESTADÍSTICA PARA MUESTRAS IRRADIADAS DE 2.5 HASTA 5.5 Watts</b>		
<b>Estadístico t = 2.742</b>	<b>&lt;</b>	<b>Valor crítico = 3.17</b>
<b>CONCLUSIÓN:</b>		
La radiación laser CO <sub>2</sub> con potencia de entre 2.5 hasta 5.5 Watts, no tiene un efecto con relación a las características mecánicas del concreto auto-compactable ya que la radiación electromagnética no es capaz de transmitirse a través de la pasta de cemento.		

Con los resultados del análisis estadístico se puede llegar a la conclusión de que, efectivamente, existe un efecto provocado por la radiación láser CO<sub>2</sub> sobre los especímenes irradiados a una potencia superior a 5.5 Watts, lo cual es consistente con lo mencionado anteriormente. Para fines de comprobación se elaboró una gráfica en donde se presentan las distintas distribuciones normales para las muestras en estudio (Ver figura 22).

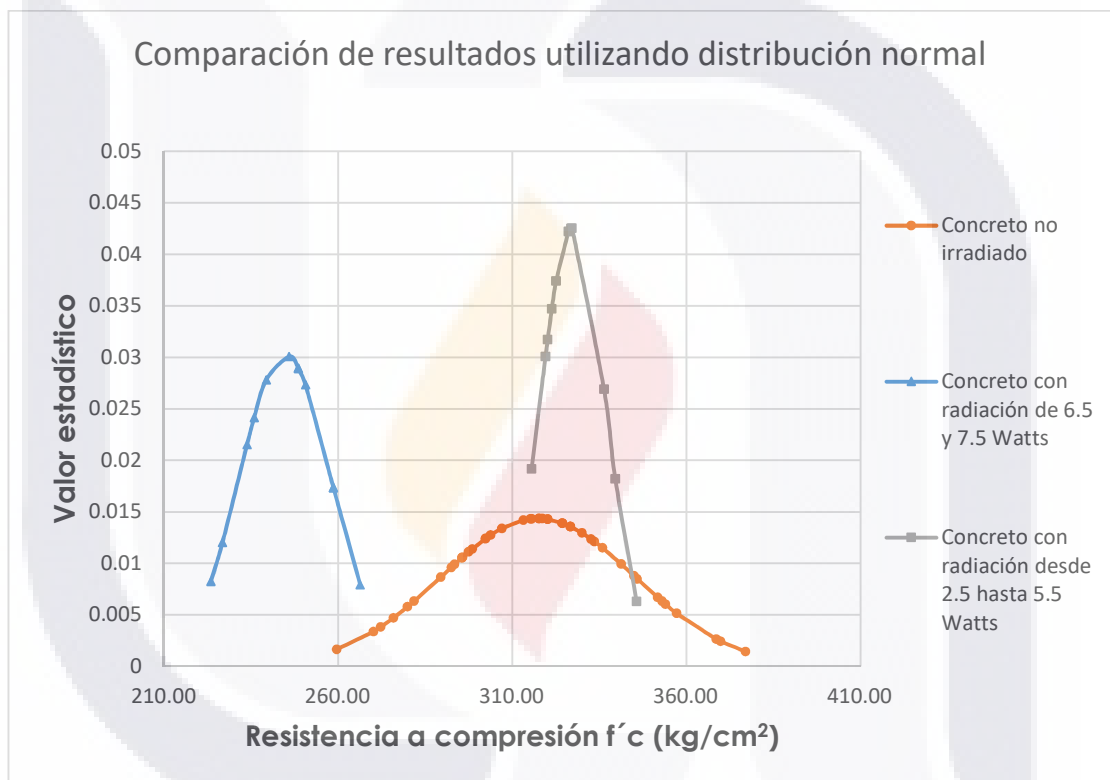


Figura 22 Gráfica comparativa de campana de Gauss suponiendo una distribución normal en todos los grupos de estudio.

## 5.2 Resultados del análisis por espectroscopía Raman.

En las figuras 23 y 24, se muestran los espectros Raman para las muestras de cilindros de concreto auto-compactable sometidos a radiación láser de CO<sub>2</sub> a potencias de 2.5 y 6.5 Watt; los cuales corresponden a diferentes profundidades de los cilindros de prueba, siendo M1, las superficies de las muestras que fueron expuestas a la radiación; mientras que M2 y M3 corresponden a los centros y caras opuestas de los cilindros respectivamente.

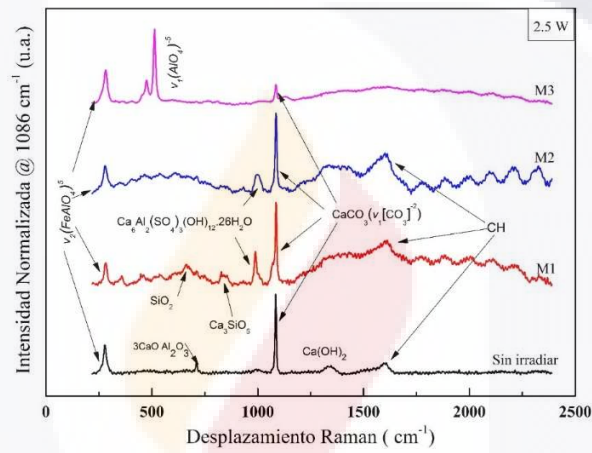


Figura 23 Espectros Raman para las muestras irradiadas a 2.5 Watts y sin irradiar.

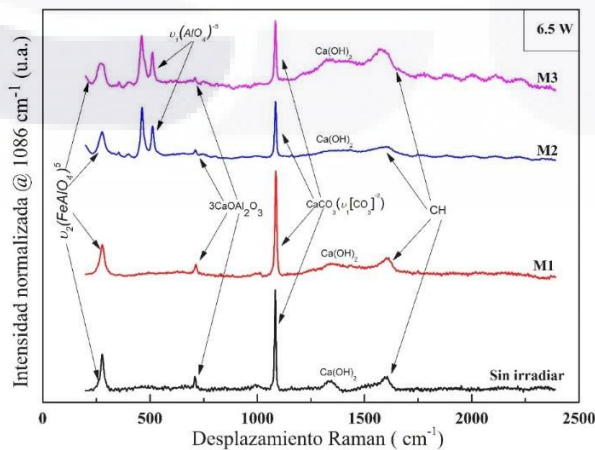


Figura 24 Espectros Raman para las muestras irradiadas a 6.5 Watts y sin irradiar.

De acuerdo con (Neville, 2011); los principales 4 componentes del cemento son:

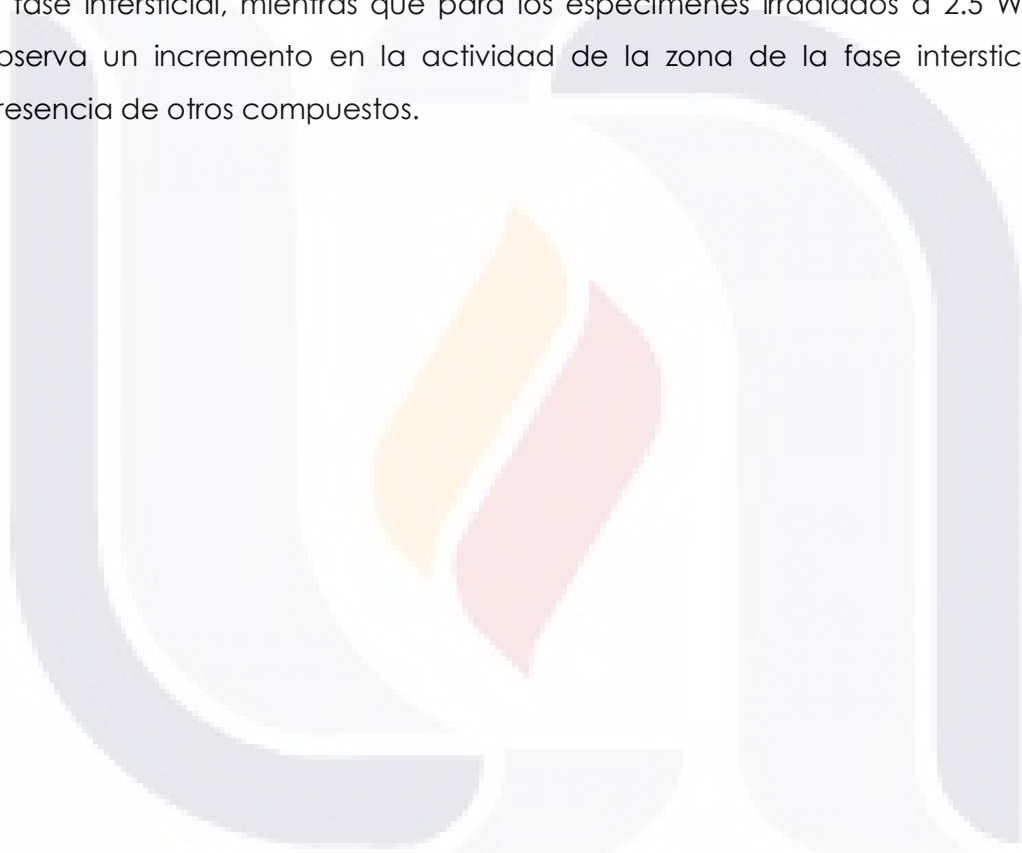
1. Silicato tricálcico ( $3\text{CaOSiO}_2$ )
2. Silicato di cálcico ( $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ )
3. Aluminato tricálcico ( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ )
4. Aluminato tetra cálcico ( $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

Mientras citando los estudios en pastas de cemento publicados por (M. del R. Moreno-Virgen et al., 2011), en los cuales se encontraron bandas predominantes en ( $187.5$ ,  $563$ ,  $695$ ,  $897$ ,  $1042$  y  $1159\text{ cm}^{-1}$ ) mismos que corresponden a los compuestos de Óxido Férrico, Unión silicio-silicio, Óxido de aluminio, silicato tricálcico, silicato di cálcico y Yeso respectivamente.

Ahora, analizando los espectros obtenidos de las muestras de estudio, se puede asumir que:

1. La banda  $283\text{ cm}^{-1}$  se identifica cerca del rango del Óxido Férrico, el cuál es un compuesto que sirve para controlar la temperatura de quemado del Clinker, es por lo que es normal que se encuentre en el análisis.
2. Las bandas entre el rango de  $500$  y  $800\text{ cm}^{-1}$  son asociadas a las vibraciones de compuestos con presencia de aluminio tales como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  el cuál juega un papel fundamental dentro del diagrama de la fase ternaria del cemento y al Aluminato tricálcico ( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ) el cual forma parte importante dentro de la fase intersticial.
3. Las bandas entre el rango de  $800$  y  $1200\text{ cm}^{-1}$  son asociadas a las vibraciones de compuestos con presencia de carbonato o silicato en el caso de la formación de un cristal, el cual, es el caso del Silicato tri cálcico o alita ( $3\text{CaOSiO}_2$ ) y del Silicato di cálcico o belita ( $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ), mismos que son los principales cristales que se busca obtener dentro de una pasta de cemento.
4. Las bandas entre el rango de  $1200$  a  $1500\text{ cm}^{-1}$  que demuestran la presencia de yeso en el cemento el cual tiene una función en el control de la hidratación inicial del cemento.

Una vez que tenemos identificados los aspectos generales de los resultados provenientes de la espectroscopía Raman, podemos observar que dados los espectros; el espécimen no irradiado cuentan con una estructura bien definida tanto de su fase intersticial como de sus cristales de alita como belita, el irradiado a una potencia de 6.5 Watts muestra en su profundidad inicial una tendencia hacia el no irradiado, esto muestra que, en general, la pasta de cemento no está siendo afectada en su estructura, pero a mayores profundidades muestra un aumento en la fase intersticial, mientras que para los especímenes irradiados a 2.5 Watts, se observa un incremento en la actividad de la zona de la fase intersticial con presencia de otros compuestos.







**CAPÍTULO**

**VI**

**CONCLUSIONES**

## **CAPITULO VI: Conclusiones**

### **6.1 Conclusión General**

Existe un efecto generado por la radiación láser CO<sub>2</sub> en el concreto auto-compactable, y dados los resultados de pruebas de compresión, así como a las observaciones al acabado de cada uno de los especímenes; se puede concluir que la radiación se transmite a todo el espécimen generando vibraciones intermoleculares, sin embargo, debido a la potencia necesaria para el efecto, éste se presenta también como aumento de temperatura lo cual provoca pérdida de agua y por lo tanto carencia de hidratación del cemento. Del mismo modo, se puede concluir que, en base a los resultados obtenidos en este estudio experimental, la metodología aplicada en este estudio es efectiva para lograr un efecto de la radiación en el concreto auto-compactable.

### **6.2 Conclusiones Particulares**

- Con respecto al diseño de concreto auto-compactable se concluye que la tecnología actual permite el diseño y elaboración a cualquier escala de concreto con características auto-compactables, sin embargo, se observa que existe un gran campo de investigación para elaborar manuales para el diseño de concretos especializados.
- Con respecto a la resistencia en compresión para muestras de concreto auto-compactable se puede concluir que la radiación láser CO<sub>2</sub> con potencias superiores de 6.5 watts provocan una reducción en la resistencia en compresión.
- Con respecto al análisis por espectroscopía Raman, se concluye que existe una variación con relación a las profundidades de interacción entre el

cilindro de concreto auto-compactable y la radiación láser CO<sub>2</sub> por lo que sería interesante analizar en investigaciones futuras acerca de dicho fenómeno.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ACI Committee 116. (2000, March 16). Cement and Concrete Terminology. In *American Concrete Institute (ACI)* (p. 73).

ASTM Committee C01. (2000, February 10). Standard Specification for Portland Cement.

ASTM Committee C01. (2001, March). Standard terminology relating to hydraulic cement.

ASTM Committee C01. (2010, December). Standard Specification for blended hydraulic cements.

ASTM Committee C09. (1988, December). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of coarse Aggregate.

ASTM Committee C09. (1998a, July). Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically.

ASTM Committee C09. (1998b, October). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.

ASTM Committee C09. (2000, August). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

ASTM Committee C09. (2001a, February). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM Committee C09. (2001b, February 10). Standard Specification for Concrete Aggregates.

Chang, R., & College, W. (2007). *Química (Décima)*. McGRAW-HILL.

Féret, R. (1892). "Sur la capacité des mortiers hydrauliques. Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur"[Hacia la compactación de los morteros hidráulicos. Memorias y documentos sobre el arte de la construcción al servicio del ingeniero]. *Annales Des Ponts et Chaussées*, 4, 5–161.

Gómez-Heras, M., Fort, R., Morcillo, M., Molpeceres, C., & Ocaña, J. L. (2008). Laser heating: a minimally invasive technique for studying fire-generated heating in building stone. *Materiales de Construcción*, 58(289–290), 203–217.

Kreijger, P. C. (1980). Plasticizers and dispersing admixtures. *The Construction Press*, 1–16.

Lawrence, J., & Li, L. (2000). A comparative study of the surface glaze characteristics of concrete treated with CO<sub>2</sub> and high power diode lasers: Part I: Glaze characteristics. *Materials Science and Engineering: A*, 284(1–2), 93–102. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00770-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00770-X)

Martínez-Ramírez, S., Díaz, L., Martín-Garrido, M., Fernández-Carrasco, L., & Torrens, D. (2018). In situ chemical modification of C–S–H induced by CO<sub>2</sub> laser irradiation. *Materials and Structures*, 51(1), 24. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1150-y>

Moreno-Virgen, M. (2010, July 2). *Influencia de la radiación láser en las propiedades mecánicas de la pasta de cemento y su caracterización*. (Thesis). Retrieved from <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6811>

Moreno-Virgen, M. del R., Soto-Bernal, J. J., Ortíz-Lozano, J. A., Bonilla-Petriciolet, A., Vega-Duran, J., González-Mota, R., & Pineda-Piñón, J. (2011). Influence of CO<sub>2</sub> laser radiation on the mechanical properties of Portland cement pastes. *Materiales de Construcción*, 61(301), 77–91.

Moreno-Virgen, M. R., Soto-Bernal, J. J., Ortiz-Lozano, J. A., Frausto-Reyes, C., Bonilla-Petriciolet, A., González-Mota, R., ... Pineda-Piñón, J. (2011). Efectos de la radiación

láser de CO<sub>2</sub> en la pasta de cemento a diferentes etapas de hidratación después de su preparación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(3), 321–328.

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Inglaterra: Pearson Education Limited.

NMX-C-472-ONNCCE-2013. (2013). Industria de la Construcción - Determinación del Flujo de Revenimiento del Concreto Autoconsolidable - Método de Ensayo.

Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 11.

Okamura, H., & Ozawa, K. (1995, June). Mix design for self-compacting concrete. In *Concrete Library of JSCE* (Vol. 24, p. 13).

Pierre-Claude, A. (2008). *Concreto de alto desempeño* (Holcim Group Support Ltd). San José, Costa Rica: Jiménez & Tanzi S.A.

Rao, B. T., Kumar, H., & Nath, A. K. (2005). Processing of concretes with a high power CO<sub>2</sub> laser. *Optics & Laser Technology*, 37(5), 348–356. <https://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. <https://doi.org/10.1155/2015/934195>

Velasco-González, J. (2016, May 27). *Influencia de la radiación láser CO<sub>2</sub> en las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto hidráulico*. Retrieved from <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/123456789/656>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

**ANEXO A**

A continuación, se muestran las tablas de análisis para los resultados en compresión de las tandas de concreto y algunas imágenes de la máquina universal donde se realizaron las pruebas en compresión.

*Tabla 8 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 1.*

<b>Tanda 1</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R17.5	324.39
R17.5	326.73
R17.5IR	258.65
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>325.56</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.65</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.51</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-66.91</b>

*Tabla 9 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 2.*

<b>Tanda 2</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R27.5	302.32
R27.5	313.16
R27.5IR	266.36
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>307.74</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>7.67</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>2.49</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-41.38</b>

Tabla 10 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 3.

<b>Tanda 3</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R16.5	272.25
R16.5	270.16
R16.5IR	223.46
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>271.21</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.48</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.54</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-47.75</b>

Tabla 11 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 4.

<b>Tanda 4</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R26.5	315.61
R26.5	332.63
R26.5IR	250.66
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>324.12</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>12.03</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>3.71</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-73.46</b>

Tabla 12 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 5.

<b>Tanda 5</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R36.5	281.83
R36.5	279.96
R36.5IR	239.40
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>280.90</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.32</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.47</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-41.50</b>



Tabla 13 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 6.

<b>Tanda 6</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R46.5	302.41
R46.5	315.27
R46.5IR	226.82
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>308.84</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>9.09</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>2.94</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-82.02</b>

Tabla 14 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 7.

<b>Tanda 7</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R56.5	275.91
R56.5	259.60
R56.5IR	233.88
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>267.76</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>11.53</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>4.31</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-33.88</b>

Tabla 15 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 8.

<b>Tanda 8</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R66.5	289.50
R66.5	295.78
R66.5IR	235.92
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>292.64</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>4.44</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>1.52</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-56.72</b>

Tabla 16 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 9.

<b>Tanda 9</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R76.5	298.53
R76.5	293.44
R76.5IR	248.56
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>295.99</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>3.60</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>1.22</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-47.43</b>

Tabla 17 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 10.

<b>Tanda 10</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R86.5	295.60
R86.5	297.50
R86.5IR	245.96
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>296.55</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.34</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.45</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-50.59</b>

Tabla 18 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 11.

<b>Tanda 11</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R96.5	303.85
R96.5	306.99
R96.5IR	258.65
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>305.42</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>2.22</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.73</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-46.77</b>

Tabla 19 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 12.

<b>Tanda 12</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R106.5	292.50
R106.5	295.60
R106.5IR	248.66
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>294.05</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>2.19</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.75</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-45.39</b>

Tabla 20 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 13.

<b>Tanda 13</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R15.5	368.54
R15.5	369.83
R15.5IR	320.16
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>369.19</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>0.91</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.25</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-49.03</b>

Tabla 21 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 14.

<b>Tanda 14</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R25.5	357.22
R25.5	352.99
R25.5IR	345.66
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>355.11</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>2.99</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.84</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-9.44</b>

Tabla 22 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 15.

<b>Tanda 15</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R14.5	324.39
R14.5	326.73
R14.5IR	322.58
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>325.56</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.65</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.51</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-2.98</b>

Tabla 23 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 16.

<b>Tanda 16</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R24.5	317.68
R24.5	320.13
R24.5IR	319.54
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>318.91</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.73</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.54</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>0.64</b>

Tabla 24 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 17.

<b>Tanda 17</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R13.5	344.97
R13.5	354.02
R13.5IR	336.33
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>349.50</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>6.40</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>1.83</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-13.17</b>

Tabla 25 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 18.

<b>Tanda 18</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R23.5	335.89
R23.5	330.00
R23.5IR	326.16
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>332.95</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>4.16</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>1.25</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-6.78</b>

Tabla 26 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 19.

<b>Tanda 19</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R12.5	324.39
R12.5	326.73
R12.5IR	327.16
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>325.56</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.65</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.51</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>1.60</b>

Tabla 27 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 20.

<b>Tanda 20</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R22.5	317.68
R22.5	320.13
R22.5IR	315.51
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>318.91</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>1.73</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>0.54</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-3.39</b>

Tabla 28 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 21.

<b>Tanda 21</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R32.5	341.25
R32.5	333.63
R32.5IR	326.84
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>337.44</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>5.39</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>1.60</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-10.60</b>

Tabla 29 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 22.

<b>Tanda 22</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R42.5	345.88
R42.5	376.95
R42.5IR	339.57
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>361.42</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>21.97</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>6.08</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-21.85</b>

Tabla 30 Resultados de pruebas en compresión para la tanda 23.

<b>Tanda 23</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Resistencia (Kg/cm2)</b>
R52.5	351.75
R52.5	318.68
R52.5IR	321.37
<b>Promedio (No irradiados)=</b>	<b>335.22</b>
<b>Desviación estandar=</b>	<b>23.38</b>
<b>Coefficiente de variación=</b>	<b>6.98</b>
<b>Diferencia a irradiado=</b>	<b>-13.85</b>

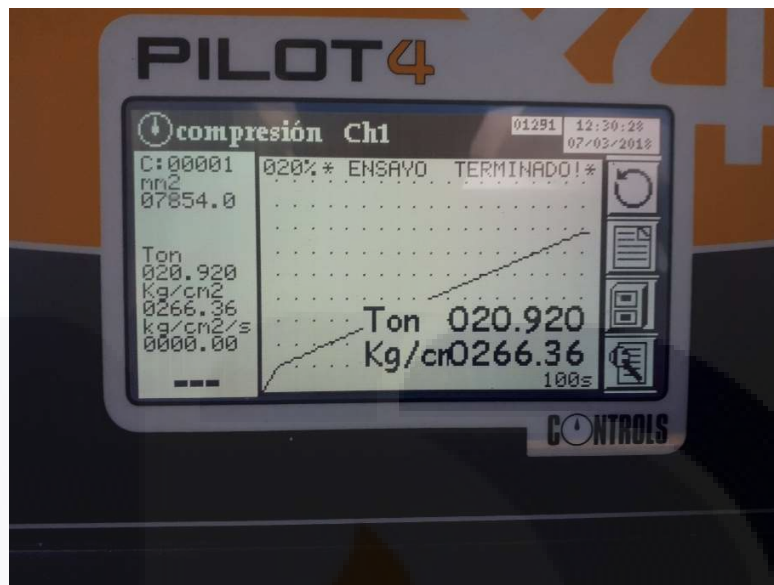


Figura 25 Resultados de prueba en compresión para R27.5IR, en pantalla de prensa hidráulica.

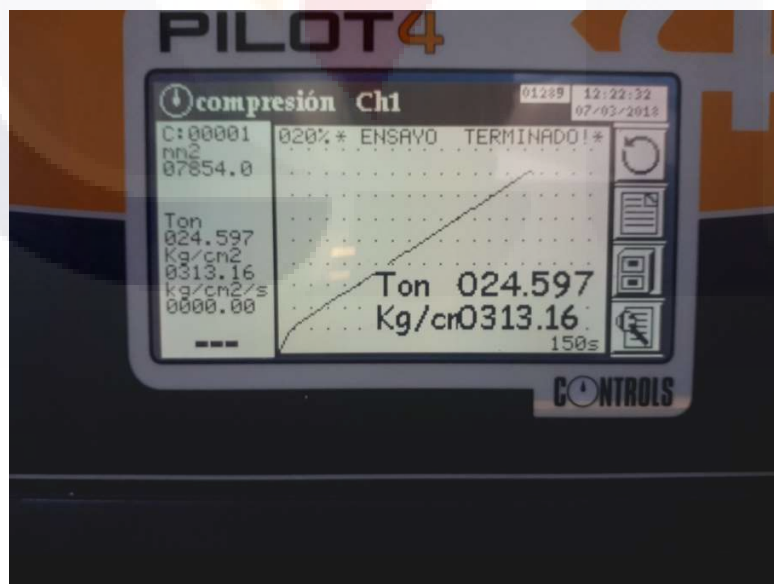


Figura 26 Resultados de prueba en compresión para cilindro 1 sin irradiar R27.5, en pantalla de prensa hidráulica.

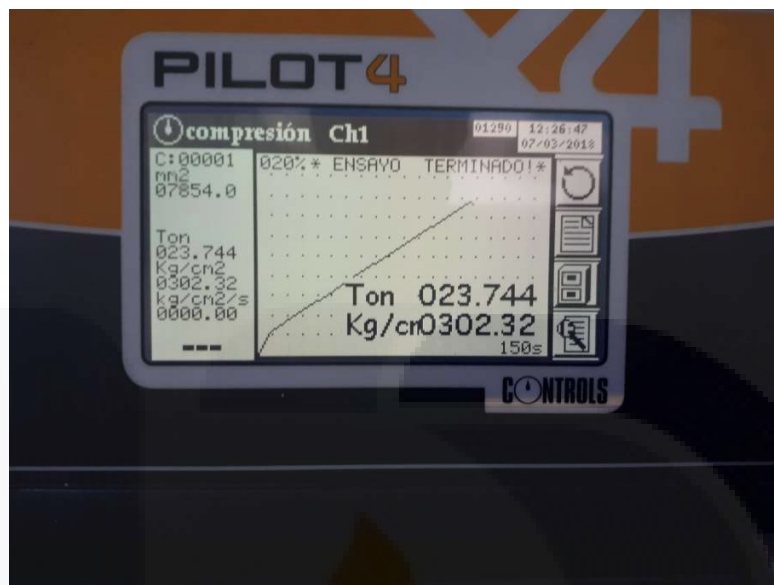


Figura 27 Resultados de prueba en compresión para cilindro 2 sin irradiar R27.5, en pantalla de prensa hidráulica.



## ANEXO B

A continuación, se muestran las imágenes del proceso de radiación:



Figura 28 Láser CO2 utilizado para irradiar las muestras de concreto auto-compactable.

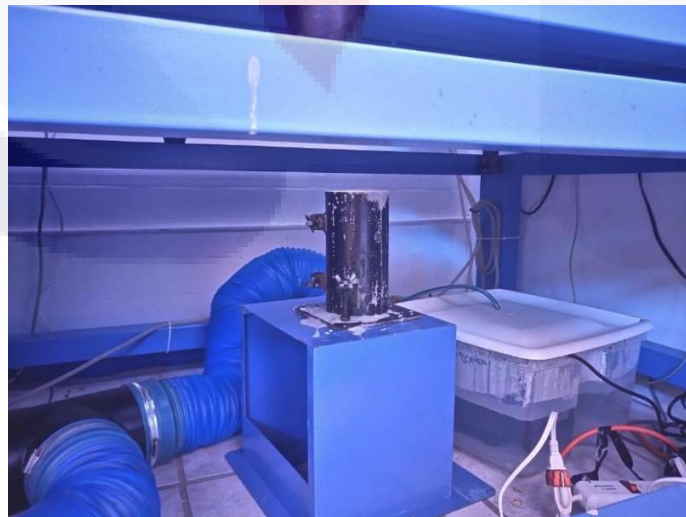


Figura 29 Muestra de concreto auto-compactable en proceso de radiación.



Figura 30 Muestra de concreto auto-compactable después del proceso de radiación visto desde la parte superior del sistema.



Figura 31 Dispositivo de medición de potencia WISARD 250.

## ANEXO C

A continuación, se muestran las imágenes del proceso de análisis por espectroscopía Raman:



Figura 32 microscopio Raman de marca "ThermoFisher Scientific" utilizado para el análisis.



Figura 33 Tanda elaborada para análisis por espectroscopía Raman.



*Figura 34 Descimbrado de cilindro de concreto auto-compactable irradiado a una potencia de 6.5 Watts.*