



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MEXICO

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



## INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

**Evaluación del proceso de auto-reparación de un concreto con agregado grueso impregnado con solución de Silicato de Sodio.**

Tesis que para obtener el Grado de:

**Maestra en Construcción**

Presenta:

**Arq. Susana Maritza Hernández Ramos**

Director:

**Dr. Julio César Cruz Argüello**

Chetumal, Quintana Roo, México, Enero de 2019

A mis padres  
Para Mario y Amelíe

## **AGRADECIMIENTOS**

La maestría fue un proceso continuo de aprendizaje y de experiencias nuevas que me permitieron conocer un grupo de personas a las cuales dedico esta tesis y les agradezco por compartir sus conocimientos y fortalecer los míos.

En primer lugar, agradezco a mis padres, que han sido mi soporte y motivación para seguir adelante. Así mismo a mi hermana Claudia Hernández, inspiración y ejemplo de perseverancia y dedicación. Al Arq. Mario, por su apoyo brindado en laboratorio, por su paciencia y motivación para seguir adelante.

Al Instituto Tecnológico de Chetumal por recibirme como estudiante y brindarme los recursos materiales y económicos con los cuales se llevó a cabo el presente trabajo.

A la doctora Danna Trejo por su constante asesoramiento desde el inicio de la maestría y su tiempo y apoyo brindado en cada etapa.

A mi director de tesis, el doctor Julio Cruz por las facilidades para llevar a cabo el proyecto y por su confianza en todo momento.

Quisiera agradecer al doctor Ricardo Vega que, aunque no estuvo involucrado directamente en el proyecto, ha sido de gran inspiración para el posgrado.

Al doctor Felipe Jiménez y el M. en C. Alberto Yedalaqui por su asesoramiento y conocimientos brindados para fortalecer los conocimientos que me fueron dados en la licenciatura.

Finalmente agradezco el trabajo del Dr. Juan Zarate, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por su apoyo durante la estancia de movilidad llevada a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y por la facilidad brindada para realizar los estudios solicitados.

Aunque éste trabajo hubiere servido para examen de grado y hubiere sido aprobado por el H. Sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## RESUMEN

El proceso denominado auto-reparación es un fenómeno ampliamente conocido y estudiado en el campo de los materiales y se refiere a la capacidad de un material que después de haber sido sometido a una modificación en su estructura por una causa interna o externa tiene la capacidad de recuperar su forma, características y desempeño originales.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes técnicas para propiciar la auto-reparación en el concreto, éstas técnicas incluyen la adición de agentes externos a la mezcla como transportadores de sustancias que desencadenan la auto-reparación una vez que las grietas se forman en el concreto. Éstos agentes externos, sin embargo, pueden afectar las propiedades del concreto fresco y endurecido, por lo que en éste estudio se propuso el uso del agregado grueso como agente transportador.

En la presente investigación, se caracterizó el agregado grueso de la región y se sometió a un proceso de impregnación al vacío de una Solución de Silicato de Sodio y una encapsulación con Alcohol Polivinilo (PVA).

Para la medición y evaluación de éste proceso se emplearon pruebas mecánicas a la compresión para comparar la resistencia entre el concreto experimental y el de control, el resultado arrojado por ésta prueba indica hasta un 56% de mayor resistencia entre el concreto experimental y la resistencia de diseño. Además, se ensayaron pruebas físicas de absorción, porosidad y densidad en las cuales se presume que tanto el silicato de sodio como el PVA redujeron los valores de porosidad hasta en un 4% y absorción del concreto.

Finalmente se realizó un monitoreo de hasta noventa días en grietas para verificar que los productos que se formaron de hidratación fueran los deseados (gel sílice C-S-H y carbonato de calcio), esto con ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB-EDS) y Difracción de Rayos X, que arrojaron resultados prometedores para el empleo de ésta técnica para desencadenar el proceso de auto-reparación

## ABSTRACT

Self-healing in cementitious materials is a well-known phenomenon in the field of materials, and refers to the ability of a material that after having undergone a modification in its structure by an internal or external cause It has the ability to recover its original shape, characteristics and performance.

Over time, different techniques have been developed to promote self-healing in cementitious materials, these techniques include the addition of external self-healing agents (micro capsules, micro tubes, bacteria, etc.) to the mixture that trigger the self-healing once the cracks are formed in the concrete.

In this study, the coarse aggregate of the region is evaluated and has undergone a process of vacuum impregnation with a sodium silicate solution and an encapsulation with Polyvinyl Alcohol. The results indicated up to 56% greater compressive strength between the experimental concrete and the theoretical resistance.

In addition, ranges of absorption, porosity and density were tested and it was demonstrated that sodium silicate such as polyvinyl alcohol decreased up to 4% of the absorption and reduced the values of porosity.

Finally, up to ninety days of monitoring was carried out in cracks to verify if the expected hydration products were formed (silica gel C-S-H and calcite), SEM-EDX and X- Ray diffraction were used for this monitoring.

# CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE GRÁFICAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
Planteamiento del Problema.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Hipótesis.....	12
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 General.....	12
1.3.2 Específicos.....	12
1.4 Justificación .....	13
1.5 Glosario de términos .....	16
CAPÍTULO 2 .....	i
Estado del arte.....	i
.....	i
<b>Auto reparación (<i>Self healing</i>)</b> .....	26
“Auto regeneración” natural.....	27
Ingeniería con mezclas .....	28
Auto-reparación pasiva .....	30
Auto-reparación activa.....	31
Auto-reparación empleando Silicato de Sodio.....	31
Esquema de bases teóricas .....	33
1. Concepto de “auto-reparación” y “auto-curación” en materiales base cemento.....	33
1. Clasificación de la “ <i>auto-curación</i> ”.....	34
a. Auto-curación intrínseca.....	34
b. Auto-curación base capsular .....	35

c. Auto-curación base vascular .....	36
<b>2. Métodos de observación, medición y evaluación de la “auto-reparación” de grietas.....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>i</b>
<b>Metodología .....</b>	<b>i</b>
<b>1.1 Marco metodológico.....</b>	<b>45</b>
1.1.1 Nivel de investigación .....	45
1.1.2 Diseño de investigación.....	45
1.1.4 Variables .....	46
<b>1.2 Método de trabajo y diseño experimental .....</b>	<b>47</b>
<b>1.3 Metodología.....</b>	<b>51</b>
<b>Etapa uno.....</b>	<b>51</b>
1.1 Caracterización del material en estado natural.....	51
Agregado fino.....	51
<b>1. Reducción de muestras de agregados a tamaños de ensayos (cuarteo).....</b>	<b>51</b>
<b>2. Método estándar para determinar el módulo de finura del agregado fino. ...</b>	<b>52</b>
<b>3. Método estándar para determinar la densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino .....</b>	<b>54</b>
<b>4. Método estándar para la determinación del porcentaje de absorción.....</b>	<b>57</b>
<b>5. Método estándar para la determinación del contenido de humedad.....</b>	<b>58</b>
<b>6. Método estándar para la determinación de pesos volumétricos: sueltos y compactados.....</b>	<b>59</b>
Agregado grueso.....	61
<b>1. Análisis granulométrico .....</b>	<b>62</b>
<b>2. Método estándar para la determinación del peso específico y absorción de material grueso.....</b>	<b>62</b>
Se realizó la caracterización del agregado grueso para determina el peso específico y el porcentaje de absorción con base en la norma ASTM C-127 .....	62
<b>3. Contenido de humedad .....</b>	<b>62</b>
<b>i. Caracterización del cemento.....</b>	<b>66</b>
<b>ii. Caracterización del Silicato de Sodio .....</b>	<b>67</b>
<b>1. Etapa dos.....</b>	<b>68</b>
<b>1. Deseccación de las muestras de agregado grueso.....</b>	<b>68</b>
<b>2. Elaboración de solución de Silicato de Sodio .....</b>	<b>69</b>

4.	<b>Impregnación del agregado grueso con la solución de Silicato de Sodio</b> .....	71
5.	<b>Encapsulación del agregado grueso</b> .....	73
4.	<b>Etapa tres</b> .....	75
1.	<b>Diseño de mezclas para los especímenes de control y experimentales</b> .....	75
6.	<b>Etapa cuatro</b> .....	76
1.	<b>Elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto</b> .....	76
	<b>Preparación de materiales:</b> .....	76
	<b>Mezcla del concreto</b> .....	76
a.	Método de Ensayo Normalizado para la determinación del asentamiento del concreto hidráulico. ASTM C-143. ....	78
b.	Método de ensayo normalizado para la Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) ASTM C-138.....	79
c.	Método de Ensayo Normalizado para Contenido de Aire del Concreto Recién Mezclado Mediante el Método por Presión. ASTM C-231 .....	79
2.	<b>Elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra</b> .....	80
	Pruebas en concreto endurecido.....	82
1.	Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Norma ASTM C39/C39 .....	82
2.	Método estándar para la determinación de la absorción, densidad y porosidad. Norma ASTM C-642. ....	85
2.	<b>Etapa cinco</b> .....	87
1.	Evaluación del proceso de Auto-reparación .....	87
	<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>109</b>
	<b>Resultados y discusiones</b> .....	<b>109</b>
1.1	Caracterización del material en estado natural.....	109
1.1.1	Agregado grueso .....	109
1.2	Pruebas en concreto fresco.....	111
1.2.1	Diseño de mezcla .....	111
1.2.2	Determinación de asentamiento hidráulico (Revenimiento) .....	112
1.3	Pruebas mecánicas en concreto endurecido.....	114
1.3.1	Resistencia a la compresión .....	114
	<b>Auto reparación</b> .....	<b>135</b>
	<b>Prueba de dureza de Vickers</b> .....	<b>135</b>
	<b>Monitoreo del proceso de Auto Reparación</b> .....	<b>137</b>

Resultados de la visualización en el Microscopio Electrónico de Barrido .....	150
CONCLUSIONES.....	163
RECOMENDACIONES.....	165
REFERENCIAS .....	166
APÉNDICE .....	171

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Causas posibles de la fisuración (IMCYC, 2002) .....	4
Figura 1.2 Causas y edad a la que aparece la fisuración. ....	5
Figura 1.3 Diferentes tipos de agregados .....	6
Figura 1.4 Condiciones de humedad de los agregados (Elaboración propia).....	8
Figura 1.5 Agregado calizo.....	10
Figura 1.6 Península de Yucatán .....	10
Figura 1.7 Estructura de concreto expuesta al medio marino .....	14
Figura 1.8 ESEM de los productos de hidratación de un concreto agrietado. Se observa la formación de C-S-H y calcita .....	15
Figura 2.1 Principales causas del fenómeno de auto reparación .....	26
Figura 2.2 Concreto de auto-regeneración utilizando geo-materiales .....	29
Figura 2.3 Esquema de la auto-reparación (RILEM 221- SHC, 2011) .....	34
Figura 2.4 Aproximaciones a la auto reparación intrínseca (a) Restricción de grieta (b) Adición de agua (c) Re- cristalización.....	35
Figura 2.5 Auto-curación base capsular, temperatura y humedad controlados	35
Figura 2.6 Auto-curación base vascular.....	36
Figura 3.1 Variables involucradas en la investigación .....	46
Figura 3.2 Etapas de la metodología experimental .....	47
Figura 3.3 Cilindro de 30 cm para prueba de compresión ASTM C39/C39.....	49
Figura 3.4 Etapas del diseño experimental .....	50
Figura 3.5 Cuarteo del agregado fino .....	51
Figura 3.6 Cuarteo del agregado fino .....	51
Figura 3.7 Pesaje del agregado fino .....	51
Figura 3.8 Cribado del agregado fino .....	52
Figura 3.9 Granulometría del agregado fino .....	52
Figura 3.10 Cribado del agregado fino .....	54
Figura 3.11 Matraz aforado con agua y agregado fino.....	55
Figura 3.12 Pesaje del matraz aforado .....	55
Figura 3.13 Agregado fino seco en cristal de reloj.....	58
Figura 3.14 Determinación de peso suelto del agregado fino.....	60
Figura 3.15 Peso del agregado grueso.....	64
Figura 3.16 Pesaje de agregado grueso seco.....	68
Figura 3.17 Resguardo al vacío del agregado grueso seco .....	68
Figura 3.18 Material de laboratorio .....	69
Figura 3.19 Pesaje del Silicato de Sodio .....	69
Figura 3.20 Balanza con aproximación de 0.0000 gramos .....	70
Figura 3.21 Mezcla de la solución con agitador magnético.....	70
Figura 3.22 Agregado grueso sumergido en solución de Silicato sodio .....	70
Figura 3.23 Lectura del pH de la solución de silicato de sodio.....	70

<b>Figura 3.24 Agregado grueso cubierto por solución de Silicato de sodio en cámara al vacío.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3.25 Cámara de impregnación al vacío con tres puertos.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3.26 Agregado grueso saturado con solución de silicato de sodio.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 3.27 Secado manual del agregado grueso para obtener un estado superficialmente seco.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 3.28 Agregado recubierto con PVA.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 3.29 Inmersión del agregado grueso en solución de PVA.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.30 Muestra de agregado grueso encapsulado con PVA.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3.31 Mezcla de concreto fresco en revolvedora.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 3.32 Prueba de asentamiento plástico en concreto fresco.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 3.33 Lectura de revenimiento en concreto experimental.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.34 Prueba de revenimiento en concreto de control.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 3.35 Determinación del rendimiento del concreto fresco.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3.36 Lectura del contenido de aire en concreto fresco.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3.37 Cilindros de concreto experimental de 30 cms.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 3.38 Cilindros de concreto experimental 15 cms.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 3.39 Curado de cilindros de 30 y 15 cms. en tanque de agua.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 3.40 Cilindros de concreto experimental de 30 y 15 cms.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 3.41 Cilindros de concreto de control de 30 y 15 cms.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 3.42 Pesaje de cilindros.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 3.43 Prueba de compresión en cilindros de 30 cms.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 3.44 Tipos de fracturas en cilindros.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 3.45 Cilindros experimentales sometidos a prueba de compresión.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 3.46 Cilindros de control sometidos a la prueba de compresión.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 3.47 Cilindros en tanque de agua para prueba de absorción.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3.48 Cilindros sumergidos en agua hirviendo.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3.49 Pesaje de cilindros sumergidos.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 3.50 Recuperación de muestras de cilindros tronados.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 3.51 Desbaste con lijas de agua de las muestras en resina.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 3.52 Pulidora rotatoria.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 3.53 Indentador Vickers para prueba de dureza.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 3.54 Difractor de Rayos X.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 3.55 Desecador de silica con muestras preparadas.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 3.56 Muestras metalizadas con cobre para el MEB.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 3.57 Colocación de las muestras en el Microscopio.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 3.58 Preparación de muestras en el MEB para hacer el vacío.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 3.59 Localización de huellas de indentación y medición de micro fisuramiento.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.1 Prueba de dureza Vickers en concreto experimental curado por 28 días.....</b>	<b>138</b>

<b>Figura 4.2 Prueba de dureza de Vickers en concreto curado por 7 días.....</b>	<b>138</b>
.....	138
<b>Figura 4.3 Prueba de dureza de Vickers en concreto curado por 28 días.....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 4.4 Prueba de dureza de Vickers en concreto curado por 7 días .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 4.5 Huella en concreto curado por 7 días –CUARTO MONITOREO .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 4.6 Huella en concreto curado por 7 días –CUARTO MONITOREO .....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 4.7 Huella en concreto curado por 7 días – PRIMER MONITOREO.....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 4.8 Huella en concreto curado por 7 días – CUARTO MONITOREO .....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 4.9 Huella en concreto curado por 14 días – PRIMER MONITOREO.....</b>	<b>142</b>
<b>Figura 4.10 Huella en concreto curado por 14 días – CUARTO MONITOREO</b>	<b>142</b>
<b>Figura 4.11 Huella en concreto curado por 28 días – PRIMER MONITOREO...</b>	<b>144</b>
<b>Figura 4.12 Huella en concreto curado por 28 días – CUARTO MONITOREO .</b>	<b>144</b>
<b>Figura 4.13 Huella en concreto curado por 28 días – PRIMER MONITOREO...</b>	<b>145</b>
<b>Figura 4.14 Huella en concreto curado por 28 días – CUARTO MONITOREO .</b>	<b>145</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Causas del fisuramiento.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 1.2 Clasificación de las rocas sedimentarias .....	7
Tabla 2.1 Técnicas de visualización y determinación de la auto-reparación.....	38
Tabla 2.2 Técnicas para determinar la fuerza de tensión recuperada .....	38
Tabla 2.3 Técnicas para determinar las propiedades mecánicas recuperadas .	39
Tabla 2.4 Métodos y medidas de grietas reparadas.....	39
Tabla 3.1 Diseño experimental.....	48
Tabla 3.2 Análisis granulométrico del agregado fino .....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3.3 Requisitos de granulometría de los agregados gruesos ASTM C-33 .....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.1 Análisis granulométrico de los agregados gruesos .....	109
Tabla 4.2 Pruebas de absorción en el agregado grueso .....	110
Tabla 4.3 Resultados de la caracterización del agregado fino.....	110
Tabla 4.4 Resultados del diseño de mezcla teórico .....	111
Tabla 4.5 Características de los materiales para el diseño de mezclas .....	112
Tabla 4.6 Tabla de revenimientos obtenidos en obra .....	112
Tabla 4.7 Resultados de aire incluido en concreto fresco elaborado en obra.	113
Tabla 4.8 Prueba de compresión axial en concreto testigo.....	114
Tabla 4.9 Prueba de compresión axial en concreto experimental .....	115
Tabla 4.10 Prueba de compresión axial en concreto testigo.....	116
Tabla 4.11 Prueba de compresión axial en concreto experimental .....	117
Tabla 4.12 Prueba de compresión axial en concreto testigo.....	118
Tabla 4.13 Prueba de compresión axial en concreto experimental .....	119
Tabla 4.14 Resultados promedio de la prueba de compresión axial para cilindros testigo y experimentales.....	120
Tabla 4.15 Determinaciones en concreto testigo 28 días de curado .....	122
Tabla 4.16 Valores obtenidos en concreto testigo 28 días de curado .....	122
Tabla 4.18 Valores obtenidos en concreto testigo 28 días de curado .....	122
Tabla 4.17 Determinaciones en concreto experimental 28 días de curado.....	122
Tabla 4.19 Determinaciones en concreto testigo 14 días de curado .....	124
Tabla 4.20 Valores obtenidos en concreto testigo 14 días de curado.....	124
Tabla 4.21 Determinaciones en concreto experimental 14 días de curado.....	125
Tabla 4.22 Valores obtenidos en concreto testigo 14 días de curado.....	125
Tabla 4.23 Determinaciones para el concreto testigo con 7 días de curado ...	127
Tabla 4.24 Valores obtenidos en concreto testigo con 7 días de curado.....	127
Tabla 4.25 Determinaciones para el concreto testigo con 7 días de curado ...	128
Tabla 4.26 Valores obtenidos en concreto testigo con 7 días de curado.....	128

<b>Tabla 4.27 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento</b>	139
<b>Tabla 4.28 Primer monitoreo - 7 EXP</b>	139
<b>Tabla 4.29 Cuarto monitoreo – 7 EXP</b>	139
<b>Tabla 4.30 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento</b>	140
<b>Tabla 4.31 Primer monitoreo - 7 EXP</b>	141
<b>Tabla 4.32 Cuarto monitoreo - 7 EXP</b>	141
<b>Tabla 4.33 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento</b>	142
<b>Tabla 4.35 Cuarto monitoreo 14 -EXP</b>	143
<b>Tabla 4.34 Primer monitoreo 14 - EXP</b>	143
<b>Tabla 4.36 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento</b>	144
<b>Tabla 4.38 Cuarto monitoreo 28 - EXP</b>	145
<b>Tabla 4.37 Primer monitoreo 28 - EXP</b>	145
<b>Tabla 4.39 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento</b>	146
<b>Tabla 4.36 Cuarto monitoreo 28 - EXP</b>	146
<b>Tabla 4.35 Primer monitoreo 28 - EXP</b>	146

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 3. 1 Granulometría del agregado fino .....	54
Gráfica 3.2 Granulometría del agregado fino .....	¡Error! Marcador no definido.
Gráfica 4.1 Revenimiento de concreto fresco elaborado en obra.....	112
Gráfica 4.2 Porcentaje de aire incluido en concreto fresco elaborado en obra.....	113
Gráfica 4.3 Resistencia a la compresión en concreto testigo .....	114
Gráfica 4.4 Resistencia a la compresión en concreto experimental.....	115
Gráfica 4.5 Resistencia a la compresión en concreto testigo .....	116
Gráfica 4.6 Resistencia a la compresión en concreto experimental.....	117
Gráfica 4.7 Resistencia a la compresión en concreto testigo .....	118
Gráfica 4.8 Resistencia a la compresión en concreto experimental.....	119
Gráfica 4.9 Comparación de la resistencia promedio para cilindros testigos y experimentales .....	121
Gráfica 4.10 Porcentaje de porosidad 28 días de curado .....	123
Gráfica 4.11 Densidad total 28 días de curado .....	123
Gráfica 4.12 Porcentaje de absorción 28 días de curado .....	123
Gráfica 4.13 Densidad total 14 días de curado .....	125
Gráfica 4.14 Porcentaje de absorción 14 días de curado .....	126
Gráfica 4.15 Porcentaje de porosidad 14 días de curado .....	126
Gráfica 4.16 Densidad total 7 días de curado .....	128
Gráfica 4.17 Porcentaje de absorción total 7 días de curado.....	129
Gráfica 4.18 Porcentaje de porosidad 7 días de curado .....	129
Gráfica 4. 19 Densidad total promedio para cilindros experimentales y testigo en tres tiempos de curado .....	130
Gráfica 4.20 Porcentaje de absorción promedio para cilindros experimentales y testigo con tres tiempos de curado .....	131
Gráfica 4.21 Porcentaje de porosidad promedio de cilindros experimentales y testigo con tres tiempos de curado .....	134
Gráfica 4.22 Ancho promedio de grieta en concreto curado a diferentes tiempos .....	147
Gráfica 4.23 Ancho promedio de grieta en concreto curado a diferentes tiempos .....	148
Gráfica 4.24 Ancho promedio de grieta en concreto testigo y experimental curado a 28 días .....	149
Gráfica 4.25 Primer monitoreo DRX [1] Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [2] Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) [3] Minrecordita ( $\text{CaZn}(\text{CO}_3)_2$ ).....	160
Gráfica 4.26 Segundo monitoreo DRX [1] Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [2] Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) [3] Minrecordita ( $\text{CaZn}(\text{CO}_3)_2$ ).....	161

**Gráfica 4.26 Tercer monitoreo DRX [1] Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [2] Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) [3] Minrecordita ( $\text{CaZn}(\text{CO}_3)_2$ ) ..... 162**

## INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales de construcción más importante y más frecuentemente utilizado en obra civil y edificaciones. Sin embargo, la infraestructura de concreto experimenta deterioro a un ritmo mucho más acelerado de lo esperado.

Los trabajos de mantenimiento y reparación de estructuras dañadas, principalmente por agrietamiento, resultan costosos y no garantizan que las estructuras recuperen su condición inicial. Es por ello que el campo de la “*auto reparación*” se ha convertido en foco de atención para los investigadores.

A últimas fechas se ha desarrollado un gran número de técnicas para promover la *auto reparación*. Éstas técnicas incluyen en su mayoría, la adición de agentes ajenos a la mezcla de concreto (contenidos en micro cápsulas o tubos huecos de cristal) que desencadenan el proceso de *auto reparación* en elementos de concreto agrietados, reparando grietas incluso en horas. El Silicato de Sodio es un compuesto ampliamente estudiado y su inserción en el campo de los materiales cementantes como agente reparador ha ido en aumento. Éste compuesto inorgánico se produce a partir del dióxido de silicio y el carbonato de sodio y tiene propiedades diversas en las que se incluye: inhibidor de la corrosión, agente adhesivo y regulador de pH.

En estudios recientemente publicados, se utiliza el agregado ligero (LWA por sus siglas en inglés) como medio para transportar agentes que propicien la *auto reparación* desde la matriz del concreto en estructuras dañadas por agrietamiento. Esto con el fin de no añadir elementos que disminuyan la resistencia del mismo. Dadas las condiciones de porosidad, densidad y peso del agregado de la Península Yucateca, éste llega a caracterizarse como un agregado ligero, que de la misma manera puede ser empleado como un medio para transportar el silicato de sodio y propiciar el fenómeno de auto reparación.

En este trabajo se evalúa dicho proceso en un concreto con agregado grueso impregnado con una solución de Silicato de Sodio, con el fin de generar estructuras de

concreto que presenten menor agrietamiento a mediano plazo mientras sean expuestas a cargas de servicio y que este mismo agrietamiento sea corregido desde la matriz del concreto propiciado por dicha solución.

## **CAPÍTULO 1**

### **Planteamiento del Problema**

---

### 1.1 Antecedentes

El concreto es el material de construcción más utilizado debido a su alta resistencia a la compresión, flexibilidad, costo relativamente bajo, etc. Sin embargo, una propiedad adversa del concreto es su sensibilidad a la formación de grietas como consecuencia de su limitada resistencia a la tensión. Por esta razón, el concreto se combina principalmente con acero para soportar las cargas de tensión. Aunque estos refuerzos restringen el grosor de las grietas, en su mayor parte no están diseñados para prevenir completamente la formación de las mismas (Van Tittelboom, Gruyaert, Rahier, & De Belie, 2012).

El agrietamiento es inevitable durante el tiempo de vida de las estructuras de concreto y una vez que las grietas se han formado en el concreto, en muchas ocasiones son difíciles de detectar y de reparar por métodos tradicionales. Las estructuras son susceptibles al agrietamiento por factores como condiciones de servicio, cargas de servicio, deficiencias de diseño, deficiencias de la construcción, interacción de los materiales y condiciones de exposición.

#### **El agrietamiento en estructuras de concreto**

Estructuralmente hablando, el concreto presenta una característica particular de trabajo que es su capacidad de agrietamiento ante los esfuerzos que absorbe, que inevitablemente reducen el tiempo de vida de la estructura (Rodríguez, 2002).

Las grietas se clasifican en dos categorías:

- Activas: que varían de acuerdo a la temperatura y tienen movimiento.
- Inactivas: la causa que las origina ya no le afecta, por lo tanto, no hay movimiento en ellas.

Además de ésta clasificación, existe una tipificación de las fisuras:

- ✓ Origen: Fuerzas externas (mecánico-dinámico); variaciones internas (origen químico, físico externo o interno)
- ✓ Geometría: Dirección, anchura, profundidad, movimiento.
- ✓ Trazado: Intergranular, transgranular, mixta, sucia, limpia.
- ✓ Ubicación: Tipo de elemento, orientación solar.
- ✓ Aparición: Antes, después del fraguado, días, años; después de puesta en servicio en la obra.
- ✓ Evolución: Activa, pasiva, variaciones en longitud y ancho.

La figura 1.1 muestra un diagrama de fisuras de acuerdo al tipo de fuerza que las origina, en éste se puede apreciar que tanto las acciones externas como las internas afectan el desempeño del concreto.



Figura 1.1 Causas posibles de la fisuración (IMCYC, 2002)

### Causas del agrietamiento

El agrietamiento ocurre cuando los esfuerzos de tracción a los cuales está sujeto el concreto exceden a la capacidad resistente a los esfuerzos de tracción del mismo.

La capacidad resistente de los esfuerzos de tracción del concreto varía con la edad y con la tasa de aplicación de los esfuerzos como se observa en la figura 1.2 (Rodríguez, 2002)

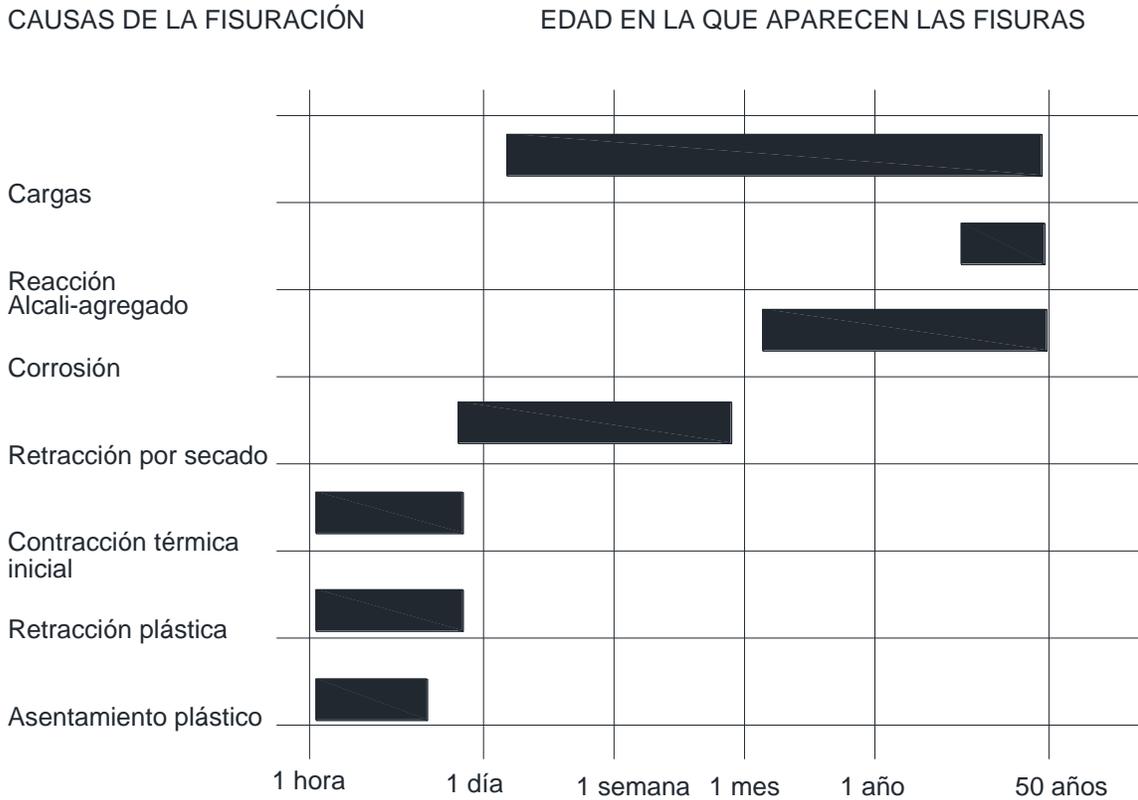


Figura 1.2 Causas y edad a la que aparece la fisuración (Rodríguez, 2002).

### La importancia del agregado grueso en las estructuras de concreto

El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, de pasta y agregados minerales. Dicha pasta se compone de cemento y agua, que al fraguar une a los agregados formando un conglomerado similar a una roca debido a la reacción química entre sus componentes. Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje (Pabol, 1996).

El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto está determinado principalmente, por las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos y de la interface entre éstos componentes. (Özturan, T.; Çeçen, 1997).

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, y puesto que forman la mayor parte del volumen del material (60-75%), se consideran componentes críticos en el concreto teniendo un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan, 1993).

La necesidad de contar con un concreto de calidad hace imprescindible conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos, especialmente de los agregados (Cerón, M.; Duarte, F.; Castillo, 1996).

El 100% de los concretos que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes (tabla 1.1): en depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca (Figura 1.3) (Uribe, 1991)



Figura 1.3 Diferentes tipos de agregados

Tabla 1.1 Clasificación de las rocas sedimentarias

	Tipo de roca y origen	Nombre	Componentes mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto	
Sedimentarias	Clásicas	Conglomerado	Fragmentos de roca y matriz	Fragmentos redondeados 2mm de diámetro	Estratificación gruesa, lentes rellenos de cauces, masiva		
		Arsénica	Qz, Pk, p1 y fragmentos de roca	Fragmentos 2mm a 1/16 mm de diámetro	Estratificación masiva lentes	Puede contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento	
		Lutita	Materiales arcillosos	Fragmentos 1/6 mm de diámetro	Laminaciones masiva	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión, puede hidratarse a través de los materiales arcillosos	
	No clásicas	Caliza	Calcita		Cristalina	Estratificación masiva	Altamente soluble
		Marga	Calcita y minerales arcillosos		Cristalina	Estratificación	Sus minerales arcillosos puede hidratarse fácilmente
		Dolomita	Calcita y dolomita		Cristalina	Estratificación masiva	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato (a través de la desdolomitación)
		Yeso	Calcita y dolomita		Cristalina	Vetas y lentes	Muy ligero, baja resistencia a la abrasión
		Carbón	Carbón		Criptocristalina	Mantos, vetas, lentes	Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento Portland

La resistencia del agregado no es usualmente el principal factor que afecte la resistencia del concreto normal, porque la partícula del agregado suele ser mucho más fuerte que la matriz y la zona de transición. Sin embargo, en pruebas realizadas en especímenes de concreto preparado con agregados calizos de la Península de Yucatán, es común observar que la falla se presente principalmente en los agregados, especialmente para relaciones agua/cemento relativamente bajas (menores a 0.5). Otras características del agregado, distintas a la resistencia, tales como tamaño, forma, textura de superficie y mineralogía (Tabla 1.1) también pueden afectar la resistencia del concreto en grados distintos (Ezeldin A.S., 1991)

### Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto fresco

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla (Figura 1.4). Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas (Alaejos P., 1996)

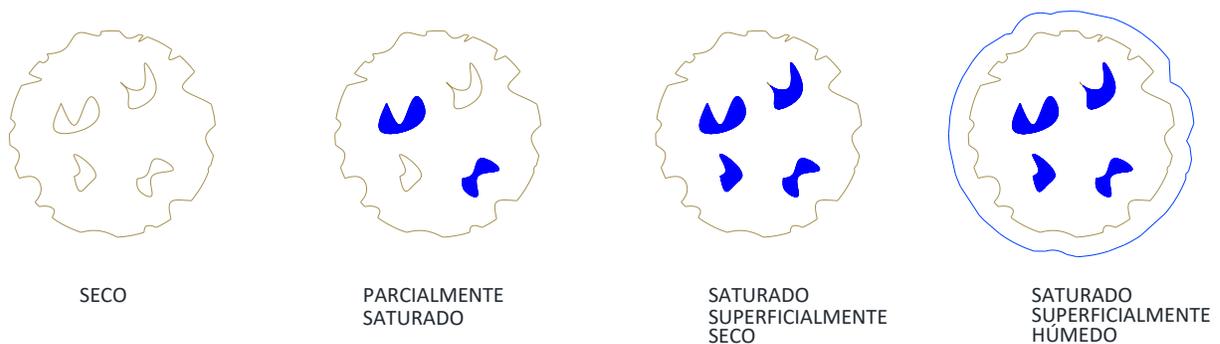


Figura 1.4 Condiciones de humedad de los agregados (Elaboración propia)

### **Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto endurecido**

Las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la forma, la textura de la superficie y el tipo de mineral, influyen en las características de la zona de transición o interface, y por consiguiente, afectan la resistencia del concreto (Mehta, K.; Monteiro, 1998). En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es principalmente responsable de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado; aunque en la adherencia también tiene influencia la relación agua cemento que afecta tanto física como químicamente la zona de interface (Özturan, T.; Çeçen, 1997).

Por otro lado, la capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este mismo puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura de concreto.

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad ( $\geq 2.25$ ) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen que ocupa un agregado según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al concreto en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla. Además de lo anterior, es conocido que a mayor porosidad mayor fuerza de adhesión, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad, y como consecuencia menor adherencia y cantidad de finos que pasan por la malla N° 200 (Cerón, M.; Duarte, F.; Castillo, 1996)



Figura 1.5 Agregado calizo



Figura 1.6 Península de Yucatán

### Agregados de piedra caliza y su comportamiento en el concreto

En la Península de Yucatán (Figura 1.6) los agregados provienen de la trituración de roca caliza (Figura 1.5) las cuales poseen diferentes niveles de dureza, porosidad y compactación ya que su formación fue en el periodo cenozoico (Solís-Carcaño & Moreno, 2006). En el planeta, la piedra caliza es la más abundante de las rocas de carbonato; va del rango de la roca caliza pura, que consiste en el mineral calcita (carbonato cálcico), a la dolomita pura, que consiste en el mineral dolomita (carbonato cálcico magnésico). Generalmente todas contienen además, en diferentes proporciones y cantidades, impurezas no carbonatadas, como son la arcilla y la arena (Mehta, K.; Monteiro, 1998).

Esta caliza está compuesta, fundamentalmente, por carbonato de calcio (77%) y carbonato de magnesio (13%) (Martínez & Salomón, 2003) el producto pétreo vendido caracterizado como agregado normal es de una densidad relativa que va de 2.2 a 2.6, que los clasifica como agregados de peso normal a peso ligero, susceptibles a la abrasión y su índice de porosidad va de un rango de 5 a 30% (Hernández Hernández

D.C., 2003). Es importante resaltar que, comparados con las rocas ígneas, los agregados producidos con sedimentos estratificados pueden variar ampliamente en sus características. Esto es debido a que las condiciones bajo las cuales fueron consolidadas son distintas según el área y estrato en que son extraídas. Las rocas tienden a ser porosas y débiles cuando se forman bajo presiones relativamente bajas; y son densas y resistentes si se forman bajo presiones altas.

Comparada con otros agregados, la piedra caliza tiene gran influencia en la naturaleza y carácter de la microestructura de la zona de interface. La interacción química entre algunas rocas y la pasta de cemento puede conducir a un incremento en la fuerza de la adherencia, en particular la piedra caliza reacciona con la pasta de cemento hasta producir una gran cantidad de poros en la zona de interface, lo que resulta en una reducción en la fuerza de adherencia a edades tempranas; sin embargo, a mayor edad, estos poros se llenan con productos de reacción posteriores incrementando la fuerza de adherencia (Tasong, 1999)

A pesar de esta ventaja en la adherencia, la baja resistencia mecánica de los agregados de roca caliza provoca una práctica de sobredosificación en cemento con miras a alcanzar concretos que cumplan con los esfuerzos de diseño (Cerón, M.; Duarte, F.; Castillo, 1996).

## 1.2 Hipótesis

1. La impregnación del agregado grueso con solución de Silicato de Sodio propiciará el proceso de auto-reparación en las grietas del concreto.
2. El Silicato de Sodio mejorará las propiedades mecánicas del concreto.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

Evaluar el desempeño físico-mecánico y de auto-reparación de un concreto con agregado grueso impregnado con solución de Silicato de Sodio.

### 1.3.2 Específicos

1. Determinar el grado de impregnación del agregado grueso con solución de Silicato de Sodio.
2. Diseñar la mezcla de concreto para las muestras testigo y experimentales.
3. Caracterizar físico-química y mecánicamente las muestras de concreto.
4. Evaluar el proceso de auto-reparación de las muestras de concreto agrietado mediante pruebas físico-químicas.

### 1.4 Justificación

En los Estados Unidos, el impacto económico anual asociado con el mantenimiento, la reparación o el reemplazo de la estructura deteriorada se estima en \$18-21 billones de dólares. La Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles estimó que \$ 2,2 billones fueron necesarios durante cinco años, a partir de 2012, para reparación y reacondicionamiento de infraestructura; se estimó un costo de \$2 billones de dólares para la infraestructura de Asia durante el mismo período. Europa gasta más de la mitad de su presupuesto anual de construcción en obras de reparación, mientras que, en el Reino Unido, el costo de reparación y mantenimiento representa más del 45% del total de gastos de construcción.

En México se invierten anualmente \$4, 818, 154, 873 pesos en el rubro de “*Servicios de instalación, reparación, mantenimiento y conservación*” en el ámbito de la construcción.

En 2014 el INEGI (“INEGI”, 2016), a través de la Encuesta Anual de Empresas Constructoras (EAEC), reportó que en el Estado de Quintana Roo se destinaron en el rubro “*Materiales para la construcción consumidos como contratista principal*” \$3, 723, 398 pesos; en tanto que en “*Materiales para la construcción consumidos como subcontratista*” se destinaron \$96, 380 pesos.

De acuerdo con esta misma institución, en 2014, en el Estado de Quintana Roo se invirtieron \$10, 836,507 pesos para la compra de artículos de construcción y de reparación; dicha suma representa más del 100% del monto destinado para la compra de material para la construcción, asumiendo por tanto que se destinan más recursos a gastos de construcción y reparación que a la compra de materia prima para la infraestructura nueva.

En ese mismo año, el INEGI reportó la cantidad de \$45, 201, 738 pesos invertidos en “*Servicios de instalación, reparación, mantenimiento y conservación*”, dentro del cual

se encuentra la “*Conservación y mantenimiento menor de inmuebles*”, esta cantidad representa 2.07% de la inversión total en “*Servicios generales*”.

Las causas por las cuales resultan necesarios los trabajos de mantenimiento son diversas sin embargo el agrietamiento en el concreto es una de las principales y más perjudiciales debido a que las grietas impactan negativamente en las estructuras de concreto de diferentes maneras: el agrietamiento debilita las estructuras, afectando negativamente en sus propiedades mecánicas, o reduciendo la durabilidad, creando los medios para que agentes indeseables y dañinos (cloruros, sulfatos, ácidos, etc.) penetren la estructura y ataquen el acero de refuerzo o el concreto a su alrededor (Figura 1.6) . Lo anterior incrementa los costos de mantenimiento de las estructuras de concreto y disminuye su vida de servicio (Figura 1.7)

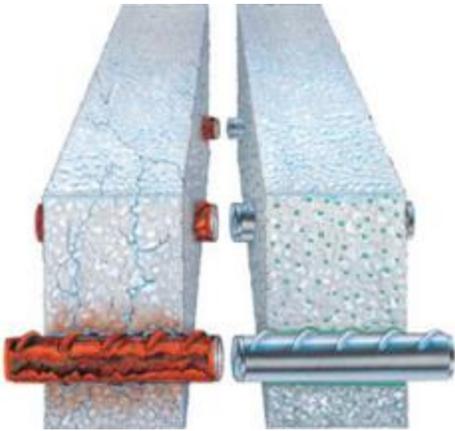


Figura 1.6 Elemento de concreto dañado por agrietamiento y corrosión en el acero



Figura 1.7 Estructura de concreto expuesta al medio marino

El desarrollo de un material que pueda sanarse por sí mismo en un ambiente natural puede reducir los costos de mantenimiento de las estructuras, incrementando la vida de servicio de las edificaciones y disminuyendo los recursos y energía necesarios en las reparaciones.

De acuerdo a los estudios efectuados, se observa que el proceso de *auto reparación* puede ser promovido por diversos medios, sin embargo, en la mayoría de ellos, el

agente externo añadido o insertado en las estructuras de concreto afectan negativamente las principales propiedades del concreto, como la resistencia y durabilidad.

En estudios previos se ha empleado el Silicato de Sodio como un potencial *agente reparador* (Alghamri, Kanellopoulos, & Al-Tabbaa, 2016). Éstos estudios demuestran que el principal mecanismo de la *auto reparación* empleando una solución de Silicato de Sodio es la reacción de los cationes de calcio ( $\text{Ca}^+$ ) con el Silicato de Sodio disuelto y la cristalización del mismo, mecanismo que mejora las propiedades mecánicas, y reduce la absorción capilar de agua (sorptividad) de los especímenes.

Del mismo modo, el Silicato de Sodio tiene sílice rica en C-S-H (principal producto de hidratación en el concreto) el cual repara las grietas en el concreto (Alghamri et al., 2016) Por lo cual su empleo resulta prometedor para desencadenar la *auto-reparación* en estructuras de concreto dañadas por agrietamiento (Figura 1.8)

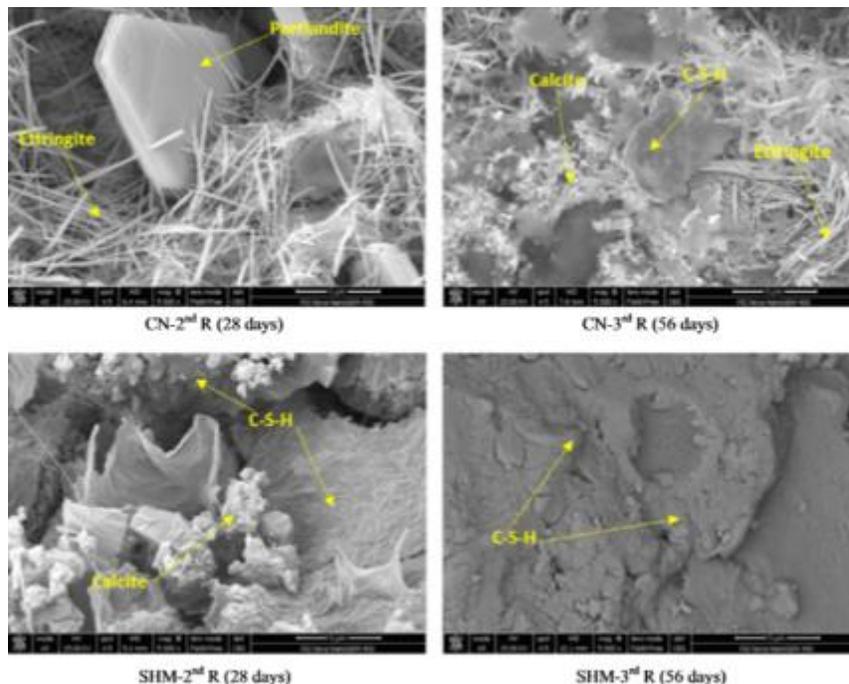


Figura 1.8 ESEM de los productos de hidratación de un concreto agrietado. Se observa la formación de C-S-H y calcita

### 1.5 Glosario de términos

- **Absorción:** Incremento del peso de un material debido a la humedad que absorbe por los poros de la estructura. Este aumento de masa se da debido a que al agua que es introducida en los poros del material; no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca (IMCYC, 1985)
- **Agregado:** Material granular como la arena, grava, roca triturada, escoria de alto horno o concreto hidráulico triturado que se utiliza en un medio cementante hidráulico para producir mortero y concreto, se dividen en finos y en gruesos, se constituyen de partículas limpias, duras, resistentes y durables, que desarrollan buena adherencia con la pasta de cemento. Naturales, semi-triturados o triturados (Neville, 1999).
- **Agregado fino:** Material conocido como arena, que proviene de la desintegración natural o artificial de las rocas, el cual pasa el tamiz 9.4 mm (3/8") (NMX-C-111-ONNCCE).
- **Agregado grueso:** Material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria de alto horno, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de estos u otros, que es retenido por la criba 4,75 mm (malla N°4) y que pasa por la criba 90 mm (malla N° 3 ½") (NMX-C-111-ONNCCE).
- **Concreto:** Material compuesto esencialmente de un medio aglomerante dentro del cual se hallan partículas o fragmentos de un relleno mineral relativamente inerte ahogadas. Es decir una pasta de cemento portland, el medio aglutinante y el relleno que forma una masa que se hace rígida y endurecen como avanzan las reacciones químicas entre el cemento y el agua en la pasta de cemento (Muciño, 2003)
- **Curado del concreto:** Procedimiento utilizado para promover la hidratación del cemento, el curado se detiene antes de la hidratación máxima posible, para que continúe la hidratación tiene que contenerse la humedad relativa dentro del concreto a un mínimo del 80% (A.M., 1999).

- **Densidad relativa:** Relación del peso de un material respecto al peso de un volumen igual de agua (IMCYC, 1985)
- **Dolomita:** roca que contiene cantidades iguales de carbonatos de calcio y de magnesio empleada como agregado grueso en el concreto. (IMCYC, 1985)
- **Durabilidad del concreto:** Es la capacidad del concreto de soportar el proceso de deterioro al cual se puede esperar que vaya a estar expuesto, no significa por tiempo indefinido y se debe de tomar en cuenta junto con la resistencia para el diseño de la mezcla. (Neville, 1999).
- **Granulometría de los agregados:** La granulometría está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría (Sánchez, 2001).
- **Humedad Relativa:** Es la relación entre la cantidad de agua presente en la atmosfera y la cantidad necesaria para la saturación, referido todo a una misma temperatura. Se expresa en porcentaje. (Hernández 2008).
- **Impregnación:** Técnica empleada para proteger los materiales de la acción del medio ambiente.
- **Masa seca (MS).** El agregado es considerado seco cuando se ha mantenido a una temperatura de  $383K \pm 5K$  ( $110^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ ) durante el tiempo necesario para lograr una masa constante. El material se considera seco cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas es igual o menor que 0.1 % de la masa de material.
- **Porosidad ( $\phi$ ):** Es la medida del espacio intersticial (espacio existente entre grano y grano), y se define como la relación entre el volumen poroso y el volumen total de la roca, entendiéndose por volumen poroso al volumen total menos el volumen de los granos o sólidos contenidos en dicha roca. De acuerdo a la interconexión del volumen poroso, la porosidad se puede clasificar como porosidad absoluta, efectiva y no efectiva.

- **Porosidad efectiva:** Se define como aquella fracción de la roca que además de no estar ocupada por material denso o matriz, está interconectada.
- **Porosidad Absoluta o Total:** Se define como la fracción del volumen bruto de la roca que no está ocupada por material denso o matriz, ya que el espacio poroso total no tiene que estar necesariamente conectado.
- **Porosidad No Efectiva:** Es la diferencia que existe entre las porosidad absoluta y efectiva. (“Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos”, s/f)
- **Relación agua/cemento:** número de litros de agua empleados por saco de cemento, en una mezcla de concreto, determina la resistencia del concreto endurecido. (IMCYC, 1985).
- **Resistencia a la compresión:** Es la característica mecánica más importante del concreto, pues sirve para juzgar su calidad y para determinarla se emplea el promedio de los resultados de ensayos válidos, sobre un conjunto de probetas normalizadas, en una fecha determinada y siguiendo un procedimiento establecido. (Porrero, 2008).
- **Resistencia del cemento:** La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales, la resistencia de un mortero o concreto depende de la cohesión entre partículas (Neville, 1999).
- **Roca caliza:** La roca caliza es la materia prima utilizada para obtener los agregados para el concreto en el estado de Quintana Roo. Las calizas son rocas sedimentarias que contienen por lo menos 50% de minerales de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y dolomita ( $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)$ ) predominando la calcita. Cuando prevalece la dolomita se denomina dolomía. La caliza es aglomerante, neutralizante, escoriificante y fundente (Coordinación General de Minería, 2013). En la península de Yucatán Las calizas terciarias que constituyen a la Plataforma de Yucatán, presentan en general permeabilidades medias y altas lo que conlleva a que en su mayoría sean consideradas de baja resistencia (Gonzales, 2009).
- **Segregación:** Se define como la separación de los componentes del concreto fresco de manera que no queden uniformemente distribuidos. Hay dos clases

de segregación. La primera, que es característica de las mezclas de concreto seco, consiste en la separación del mortero del cuerpo del concreto (por ejemplo, debido a la sobre vibración). (Hernández 2008).

- **Volumen absoluto:** volumen sin cavidades (IMCYC, 1985)

## **CAPÍTULO 2**

Estado del arte

---

### Auto reparación (*Self healing*)

La *auto reparación* es un fenómeno antiguo y bien conocido en el concreto, se ha concluido que éste posee algunas propiedades regenerativas autógenas naturales (Van Tittelboom et al., 2012). Estudios han demostrado que el concreto agrietado tiene la capacidad de regenerarse por sí solo con el tiempo cuando se expone al agua.

Con base en numerosos estudios experimentales y en la experiencia práctica se cree que la auto reparación de grietas en materiales cementantes es la combinación de complejos procesos físicos y químicos. Como es afirmado en la mayoría de la literatura estudiada, diversas causas posibles pueden ser responsables del fenómeno de la auto reparación. En la figura 2.1 se muestran las principales causas (Schlangen, 2010).

- a. Formación de carbonato de calcio o hidróxido de calcio.
- b. Bloqueo de grietas por impurezas en el agua o partículas de concreto que resultan del desmoronamiento de otras grietas.
- c. Continua hidratación de las partículas del cemento sin reaccionar.
- d. Expansión de la matriz cementante hidratada en las grietas (Precipitación de C-S-H)

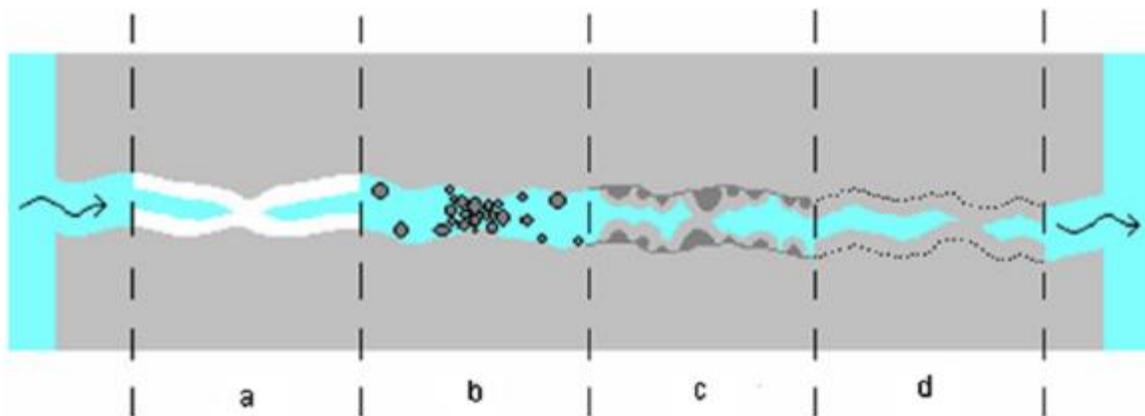


Figura 2.1 Principales causas del fenómeno de auto reparación

Se ha desarrollado una serie de métodos para inducir la *auto reparación* en el concreto. De estos métodos, los más comunes son: encapsulación química, encapsulación

bacteriana, aditivos minerales, productos químicos en tubos de vidrio y regeneración intrínseca con grosor de grieta auto – controlado (Van Tittelboom & De Belie, 2013).

### **“Auto regeneración” natural**

La regeneración o curación (*healing*) es un proceso complejo que implica varios mecanismos químicos y físicos. Algunos de estos mecanismos son: hidratación de cemento sin reaccionar, hinchamiento del C-S-H, precipitación de cristales de carbonato de calcio, cerrado de grietas por impurezas dentro del agua y cerrado de grietas por partículas de concreto en los bordes de la grieta. Aunque todos estos mecanismos contribuyen a la regeneración, se ha demostrado que la precipitación de carbonato de calcio es el principal mecanismo para la *auto regeneración natural* de grietas en el concreto (Hosford, 2013) .

El proceso de *auto regeneración* del concreto es materia ampliamente estudiada. Desde 1956 Lauer & Slate reportaron un estudio sobre la naturaleza de la acción “*auto-curativa*” y del aumento de la resistencia a la tensión del concreto. Se estudió la influencia de la edad, las condiciones de curado, adiciones de cal y cenizas volantes, y los ciclos de hidratación y secado en el proceso de “*auto-curación*”.

Dhir et al. (1973) estudiaron la influencia de la edad y las proporciones de la mezcla en la *auto regeneración* de los morteros. Concluyeron que la tasa de *regeneración* disminuyó con la edad dentro del rango de prueba de 7-120 días y que el porcentaje de recuperación en la resistencia fue mayor para las mezclas con mayores contenidos de cemento.

En 1994, C. Dry fue el primero en proponer una introducción inicial a las propiedades “*auto-regenerativas*” en el concreto. En los años siguientes, varios investigadores comenzaron a estudiar este tema (Van Tittelboom, K.; de Belie, 2010)

Ramm y Biscopig en 1998 realizaron un estudio experimental durante un período de dos años con respecto a la corrosión “*auto-curable*” y de refuerzo de grietas de separación penetradas por agua en concreto armado a través de ensayos con concreto

plano e investigaron los efectos de *auto reparación* sobre la fuga de agua a través de grietas en concreto. Encontraron que el mayor efecto de *auto reparación* ocurrió dentro de los primeros 3 a 5 días de exposición al agua y que la precipitación de los cristales de  $\text{CaCO}_3$  en las grietas fue prácticamente la única causa para la *auto reparación* de las grietas. La velocidad de crecimiento de los cristales de  $\text{CaCO}_3$  dependió del ancho de fisura y de la presión del agua, mientras que la composición de concreto y el tipo de agua no influyeron en la velocidad de *auto reparación*. Edvardsen (Edvardsen, 1999) también concluyó que la formación de  $\text{CaCO}_3$  responde a dos procesos diferentes de crecimiento de cristales. En la fase inicial de exposición al agua, la cinética del crecimiento cristalino es superficialmente controlado, pero más tarde esto cambia a un crecimiento cristalino controlado por difusión.

### Ingeniería con mezclas

Con el fin de estimular la reacción química para generar productos de hidratación y cerrar las grietas en el concreto, se han empleado algunas mezclas. Por ejemplo, se ha propuesto la aplicación de bacterias productoras de minerales, así como geomateriales. Recientemente, se ha observado la precipitación del carbonato de calcio debido a la acción bioquímica de las bacterias. Según Jonkers (Jonkers, Thijssen, Muyzer, Copuroglu, & Schlangen, 2010), el mecanismo principal de la “*regeneración bacteriana*” de la grieta es que las mismas actúan en gran parte como un catalizador y transforman un compuesto precursor en un material de relleno adecuado. Jonkers señaló los dos requisitos siguientes para aplicar esta nueva técnica a un concreto “*auto-regenerable*”: (1) El tiempo de vida de la bacteria debe ser lo suficientemente largo, equivalente al de las estructuras de concreto; (2) La adición de bacterias o compuestos precursores de bio-cemento adicionalmente necesarios no debe causar la pérdida de otras propiedades del mismo concreto. Mientras que las bacterias formadoras de esporas resistentes a los álcalis existentes en la naturaleza son viables durante 50 años, la vida útil de las bacterias en el concreto se limita a unos pocos

meses cuando las esporas de bacterias se añaden directamente a la mezcla de concreto. Además, se encontró una disminución drástica de la resistencia a la compresión debido a varios compuestos orgánicos precursores de bio-ciclo, aunque un gran número de esporas bacterianas apenas afectaron la resistencia.

Del mismo modo, Jonkers (2010, 2011) inmovilizó simultáneamente tanto las esporas de bacterias como un compuesto precursor bio-mineral orgánico (lactato de calcio) necesario mediante la aplicación de una técnica de vacío en poros antes de su adición a la mezcla de concreto. El tamaño de partícula era de 1 a 4 mm y la forma era esférica. El ESEM reveló que la “*regeneración*” eficiente de las grietas se produjo en la muestra

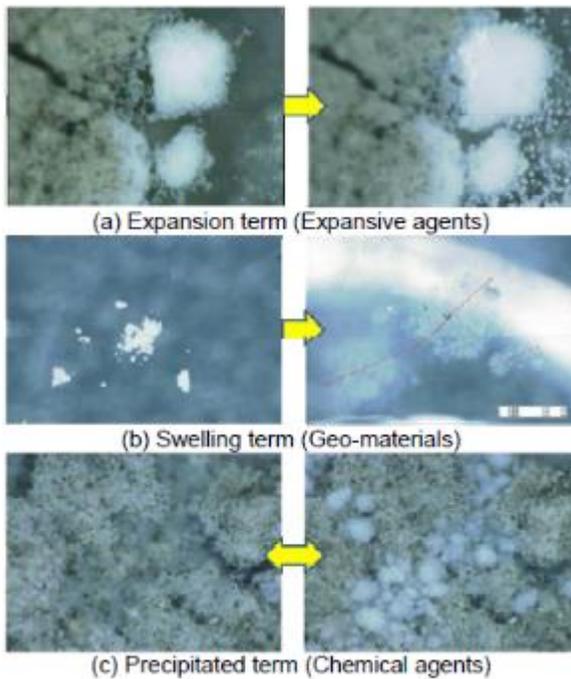


Figura 2.2 Concreto de auto-regeneración utilizando geo-materiales

de bacterias en la que se crearon grandes productos de “*auto-regeneración*” a base de carbonato de calcio (de 50 a 100 micrómetros). Las pruebas también mostraron que la viabilidad de las esporas bacterianas aumentó de dos a más de seis meses, aunque esta duración es todavía mucho más corta que la vida normal de las edificaciones. Ahn & Kishi (Ahn, T., & Kishi, 2010) desarrollaron un concreto de “*auto-regeneración*” utilizando geo-materiales que estaban disponibles para la aplicación práctica (Figura 2.2).

Concluyeron que la capacidad de “*auto-regeneración*” fue afectada significativamente por los materiales de aluminosilicato y diversos materiales modificados compuestos de calcio, principalmente debido al efecto de hinchamiento, efecto de expansión y recristalización. Este método requiere el suministro de agua o al menos de humedad, pero como la mayoría de las edificaciones están expuestas a la lluvia o al agua

subterránea, éste es un requisito que se puede cumplir fácilmente (Ahn, T., & Kishi, 2010).

Feng et al. también utilizaron micro-cápsulas esféricas con una envoltura de urea formaldehído (UF) llena con una resina epoxi de dos componentes. Sin embargo, estos investigadores modificaron la resina epoxi con un diluyente químico para ajustar la viscosidad, con el objetivo de obtener una mezcla superior de ambos componentes. Aunque la reacción de esta resina epoxi puede ocurrir a temperatura ambiente al contacto con el agente de curado, se obtienen propiedades benéficas mediante curado térmico a 120°C.

### **Auto-reparación pasiva**

La Agencia de Ciencia y Tecnología (1989) sugirió el concepto básico de materiales inteligentes como compuestos de cápsulas y matrices funcionales distribuidas. Este concepto fue ampliamente reconocido como un tema de investigación práctica para la investigación de materiales poliméricos utilizando productos químicos encapsulados (White et al., 2001). En el campo de la ingeniería del concreto, hubo algunos investigadores que adoptaron un concepto similar, es decir, mezclar cápsulas *quebradizas* que contenían un “*agente reparante*” al concreto. Uno de los primeros estudios en el campo de la ingeniería del concreto fue realizado por Dry (Dry, 1996). En este estudio, un agente adhesivo contenido en fibras frágiles de vidrio huecas sirvió como el producto químico reparador.

Li et al. (1998) estudiaron un ECC inteligente de “*auto-reparación pasiva*” (PSS-ECC por sus siglas en inglés). El PSS-ECC en ese estudio consistía en tubos de vidrio frágiles que contenían súper-pegamento (ciano-acrilato de etilo) incrustado en el ECC. Los autores enfatizaron que el control del ancho de la grieta dentro del rango de micrómetros es esencial para el PSS-ECC debido a que los anchos de grieta más grandes eliminan rápidamente la cantidad de agente adhesivo disponible para curar todas las grietas. De lo contrario, se necesitan tubos de vidrio huecos muy gruesos, lo

que a su vez reduce las propiedades mecánicas de los compuestos cementantes reforzados con fibra. Además, el ancho de fisura máximo permisible también debería estar limitado por el mecanismo de accionamiento, porque la liberación de agentes adhesivos en la grieta depende de la capilaridad de los canales delgados creados por las superficies de fisura contra la fuerza capilar dentro de las fibras de vidrio huecas. Por lo tanto, el ancho de fisura de la matriz debe limitarse a menos que el diámetro interior de la fibra de vidrio para un accionamiento efectivo.

### **Auto-reparación activa**

Sakai et al. (2003) propusieron un sistema de cierre de grietas que utiliza aleación de Memoria de Forma (Smart Memory Alloy). Utilizaron el sistema SMA como barras principales de refuerzo para las vigas de concreto, para que las grandes grietas bajo carga fueran mecánicamente cerradas después de retirar la carga, aunque el cierre total de la grieta resultó difícil de alcanzar.

En 2010 Jefferson et al. desarrollaron un sistema similar de cierre de grietas para materiales cementantes usando tendones de polímeros retráctiles. El sistema implicó la incorporación de tendones de polímero pre-orientados no unidos en vigas de cemento. Las grietas pueden cerrarse mediante la activación térmica del mecanismo de contracción de los tendones de polímero restringido. Sin embargo, si se requiere intervención humana externa para calentar la estructura para cerrar grietas, el material no califica como un material inteligente como se ha definido anteriormente.

### **Auto-reparación empleando Silicato de Sodio**

El Silicato de Sodio ha sido propuesto como un agente potencial de “*auto-reparación*” en diferentes sistemas. Un gran número de investigadores han valorado los diferentes aspectos de la capacidad de *auto-reparación* del Silicato de Sodio. Pelletier et al. (Pelletier, Brown, Shukla, & Bose, 2010) cubrieron Silicato de Sodio cristalino en micro-

capsulas de poliuretano de un tamaño de 40-800 $\mu$ m. Posteriormente las cápsulas sintetizadas fueron añadidas a la mezcla de concreto en una relación del 2% de volumen. Las muestras de concreto que contenían las micro-cápsulas mostraron un 24% de recuperación de fuerza flexible en comparación con un 12% de las muestras de concreto sin micro-cápsulas. Huang & Ye (Huang & Ye, 2011) incrustaron cápsulas de 5mm de diámetro rellenas con solución de Silicato de Sodio dentro de especímenes de ECC (Engineered Cementitious Composites). Los resultados demostraron que el principal mecanismo de *auto-reparación* es la reacción entre los cationes de Calcio y el Silicato de sodio disuelto y su consecuente cristalización.

En un estudio previo de Kanellopoulos et al. (Alghamri et al., 2016) se depositó Silicato de sodio líquido en cápsulas de vidrio de sosa de paredes delgadas. Los resultados indican que el Silicato de Sodio tiene una capacidad para la *auto-reparación* bastante prometedora, tanto para la recuperación de la fuerza como para mejorar la durabilidad.

## Esquema de bases teóricas

### 1. Concepto de “auto-reparación” y “auto-curación” en materiales base cemento.

La Academia Francesa de Ciencias en 1836, concluyó que la “*auto-curación*” (self-healing) es la conversión del hidróxido de calcio exudado del cemento hidratado y convertido en carbonato de calcio en exposición a la atmósfera.

De acuerdo al RILEM 221-SHC la *auto-reparación* es “cualquier proceso propio de un material que implica una recuperación y por lo tanto un mejoramiento de su desempeño después de una acción previa que disminuyó el desempeño del mismo material.”

Del mismo modo el RILEM define los fenómenos de “*auto-curación*” en materiales cementantes, con base en el resultado de la acción: “*auto-cerrado*” o “*auto-curado*”; y sobre el proceso de la acción: “*autogénico*” o “*autonómico*” (de Rooij, M., & Schlangen, 2011). Por lo tanto, se subdivide en los cuatro grupos siguientes:

1. Auto-cierre autogénico: material genérico que por su cuenta cierra las grietas.
2. Auto-curación autogénico: material genérico que por su cuenta restaura las propiedades.
3. Auto-cierre autonómico: adiciones artificiales que cierran las grietas.
4. Auto-curación autonómica: adiciones artificiales que restauran propiedades.

Por su parte el “*Comité Técnico de Curación Autógena en Materiales Cementantes de la JCI*” en 2009, propuso la siguiente clasificación de concreto “*auto-reparador*”:

1. Reparación natural
2. Reparación autonómica
3. Reparación activada

4. Reparación autógena que cubre la curación natural y la curación autonómica
5. Reparación de ingeniería que cubre la curación autonómica y la reparación activada.

Finalmente, la “auto reparación” que abarca todas las acciones de cierre y / o reparación de grietas (Figura 2.3)

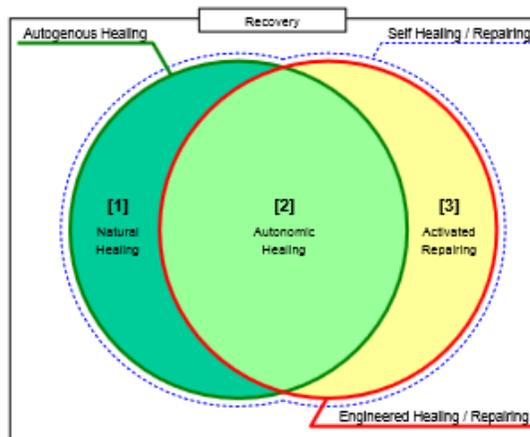


Figura 2.3 Esquema de la auto-reparación (RILEM 221- SHC, 2011)

### 1. Clasificación de la “auto-curación”

#### a. Auto-curación intrínseca

Estos materiales manifiestan propiedades “auto-curables” debido a la composición de la matriz cementosa. En éste enfoque, la “curación” se basa en la curación autógena, la mejora de la “curación” autógena o la reacción de las sustancias poliméricas dentro de un concreto polimérico modificado. La “curación autógena” de grietas puede atribuirse principalmente a dos mecanismos: (1) la hidratación de las partículas de cemento no hidratado y (2) la disolución y posterior carbonatación del hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (Figura 2.4)

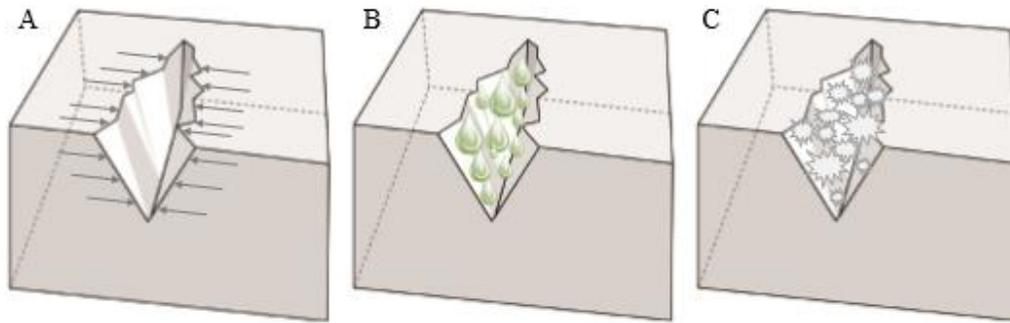


Figura 2.4 Aproximaciones a la auto reparación intrínseca (a) Restricción de grieta (b) Adición de agua (c) Re- cristalización

b. *Auto-curación base capsular*

Los materiales de “*auto-curación*” basados en cápsulas contienen un agente curativo dentro de cápsulas discretas. Cuando las cápsulas se rompen por ejemplo por daño, el mecanismo de “*auto-curación*” se activa a través de la liberación y reacción del agente curativo en la zona dañada. Mientras que algunos agentes reaccionan al contacto con la humedad o el aire o debido al calentamiento (Figura 2.5 A, B) o al contacto con la misma matriz de cemento (Figura 2.5 C, D), reaccionan otros agentes cuando hacen contacto con un segundo componente que está presente en la (Figura 2.5 E, F) o proporcionadas por cápsulas adicionales (Figura 2.5 G, H). Las cápsulas pueden tener una forma esférica (Figura 2.5 A, C, E, G) o cilíndrica (Figura 2.5 B, D, F, H).

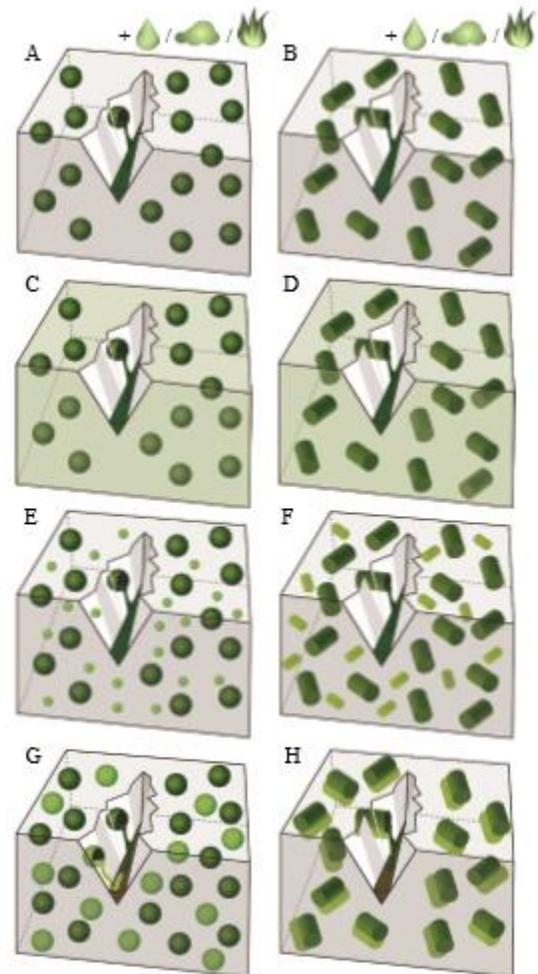


Figura 2.5 Auto-curación base capsular, temperatura y humedad controlados

*c. Auto-curación base vascular*

Los materiales “*auto-curables*” base vascular contienen el agente curativo en una red de tubos huecos que conectan el interior y el exterior de la estructura. Cuando se utiliza este método en combinación con un agente de curación de un componente, se aplica un sistema vascular de un canal (Figura 2.6 A), mientras que se utiliza un sistema de múltiples canales en combinación con un agente de cicatrización de múltiples componentes (Figura 2.6 B)

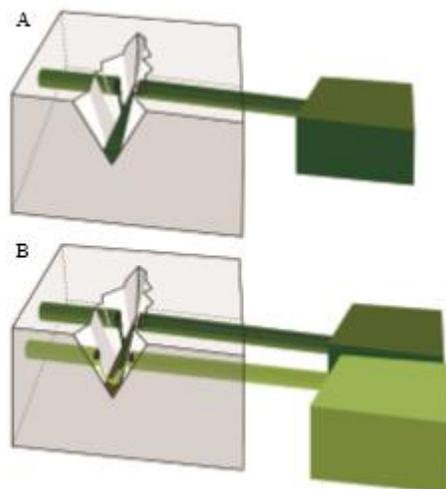


Figura 2.6 Auto-curación base vascular

## 2. Métodos de observación, medición y evaluación de la “*auto-reparación*” de grietas.

Al estudiar las propiedades de auto reparación de los materiales de construcción, pueden ser usadas diferentes pruebas destructivas y no destructivas (NDT). Los métodos se pueden categorizar basado en el hecho de si se utilizan para estudiar el mecanismo para encapsular o proteger el agente de reparación, las propiedades del agente reparador encapsulado, la distribución del mecanismo de reparación, el desencadenamiento del mecanismo de reparación, la eficacia de curación o el desempeño de la reparación (Snoeck, Malm, Cnudde, Grosse, & Van Tittelboom, 2018)

Para detectar y evaluar la eficacia y el desempeño de la reparación en materiales de concreto, se han empleado una variedad de métodos de observación. Entre ellos se encuentran la microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopia de dispersión de energía (EDE), espectroscopia infrarroja por transformación de Fourier (EITF), la tomografía computarizada de rayos X y pruebas de permeabilidad. (Li & Herbert, 2013).

La permeabilidad en el concreto se refiere a la cantidad de agua u otras sustancias líquidas que migran por los poros del material en un determinado tiempo; y así ser el resultado de: la composición de la porosidad en la pasta de concreto, la hidratación, la temperatura del concreto, y la formación de cavidades y grietas por contracción plástica en el concreto durante el tiempo de fraguado (Vélez, 2010)

La porosidad de la pasta de cemento es la suma del volumen de los huecos capilares y de los huecos del gel, y representa el espacio no llenado por los componentes sólidos de la pasta de cemento hidratado (Neville & Brooks, 1998); depende principalmente de la relación agua/cemento (a/c) y del grado de hidratación alcanzado por el cemento. En general, la porosidad de la pasta suele ser mayor a la porosidad del agregado.

La porosidad no solo influye en la absorción del material sino también en su resistencia (Hincapié & Montoya, 2005).

Tabla 2.1 Técnicas de visualización y determinación de la auto-reparación

Visualización y Determinación	Técnica	Posibilidades
	Microscopio óptico + Análisis de imágenes	Visualización de depósito de cristales + determinación del grado de curación
	Microscopía electrónica de barrido	Visualización de depósito de cristales
	Microscopía electrónica de barrido ambiental	Visualización de la rotura de la cápsula parcialmente incrustada
	Análisis de secciones finas	Visualización del depósito de cristales dentro de las grietas
	Análisis de difracción de Rayos-X	Determinación de materiales cristalinos
	Espectroscopía Ramann	Determinación de la composición química
	Análisis infrarrojo	Determinación de los productos precipitados

Tabla 2.2 Técnicas para determinar la fuerza de tensión recuperada

Fuerza de tensión recuperada	Técnica	Posibilidades
	Permeabilidad al agua-baja presión	Flujo de agua a través de las grietas (healed)
	Permeabilidad al agua-alta presión	Flujo de agua a través de las grietas (healed)
	Permeabilidad al aire	Flujo de aire a través de las grietas (healed)
	Captación de agua capilar	Captación de agua capilar por las grietas (healed)
	Radiografía de neutrones	Visualizar la captación de agua capilar por la grieta (healed)
	Test de corrosión	Resistencia contra la corrosión
	Análisis infrarrojo	Determinación de los productos precipitados

Tabla 2.3 Técnicas para determinar las propiedades mecánicas recuperadas

	Técnica	Posibilidades
Propiedades mecánicas recuperadas	Test de compresión	Recuperación de la fuerza, rigidez y / o energía obtenida al re-cargar el espécimen healed.
	Test de tracción	
	Prueba de flexión de 3 puntos	
	Prueba de flexión de 4 puntos	
	Columna / marco de deformación horizontal	
	Losa de carga de impacto	
	Análisis de frecuencia de resonancia	Recuperación de la rigidez

Tabla 2.4 Métodos y medidas de grietas reparadas

Método	Medida variable (tamaño de la grieta)	Referencias
Natural	Curación de grieta por debajo de 60 $\mu\text{m}$	Parks et al., Yang et al.
Material cementante suplementario	Grietas con medidas menores de 200 $\mu\text{m}$ pudieron ser tapadas	Huang et al., Van Tittelboom et al.
Polímero	Grietas con medidas mayores de 138 $\mu\text{m}$ fueron completamente cerradas	Elmoaty and Elmoaty, Snoeck et al.
Bacteria encapsulación/ inmovilización	y Se reportaron grietas con un máximo de 0.970 mm cerradas	Wang et al., Dong et al., Wang et al., Qian et al.
Otro Biológico/químico)	( Se reportaron grietas con un máximo de 0.22 mm cerradas	Stuckrath et al.

De la revisión del estado del arte, se concluye que tanto el fenómeno de auto-reparación autógena como autónoma en el concreto ya es un tema bien estudiado.

Las investigaciones buscan la mejora en la implementación de técnicas para conseguir concretos que reparen el agrietamiento con dimensiones cada vez mayores y con ello, garantizar e incrementar el tiempo de vida útil de las estructuras y prevenir su deterioro anticipado. Sin embargo cada región varía y por tanto, las características de los materiales que se emplean como materia prima para las construcciones, por lo que resulta conveniente trasladar algunas de éstas técnicas en un proyecto de ingeniería aplicada para las características propias de nuestra zona de estudio, abriendo así un nuevo campo de investigación en la región.

## **CAPÍTULO 3**

### Metodología

---

## 1.1 Marco metodológico

### 1.1.1 Nivel de investigación

- Investigación de tipo exploratoria

Esta investigación pretende determinar si el método de impregnación y encapsulación del agregado grueso con solución de Silicato de Sodio y Alcohol de Polivinilo resulta viable para promover el fenómeno de auto-reparación en estructuras de concreto, a través de diversos ensayos mecánicos-físicos-químicos a cilindros de concreto.

### 1.1.2 Diseño de investigación

- Investigación experimental

Se llevarán a cabo una serie de muestras (cilindros y preparaciones en resina) experimentales y de control para evaluar el comportamiento físico-mecánico-químico y de auto reparación de un concreto con agregado grueso impregnado con solución de Silicato de Sodio versus un concreto elaborado con agregados en condiciones normales.

### 1.1.3 Delimitación del área de estudio

Para el trabajo de laboratorio y de campo que se realizará en éste estudio se considera que los agregados que se obtienen son propios de la Península de Yucatán, por lo que el estudio puede ser aplicado a regiones con las características climáticas y geológicas de la Ciudad de Chetumal.

El trabajo se limita a trabajar con una relación A/C, un porcentaje de concentración de Silicato de Sodio (15%) y el 100% de agregado impregnado.

### 1.1.4 Variables

#### Variable Dependiente

- Auto reparación del concreto
- Resistencia a compresión axial
- Porcentaje de absorción
- Porcentaje de densidad absoluta
- Porcentaje de porosidad

#### Variable Independiente

- Agregado grueso impregnado con Solución de Silicato de Sodio y encapsulado con PVA.
- Agregado grueso en condiciones normales de humedad

#### Variables a Controlar

- Relación A/C
- Condiciones de humedad del agregado grueso
- Tamaño de agregado grueso y fino

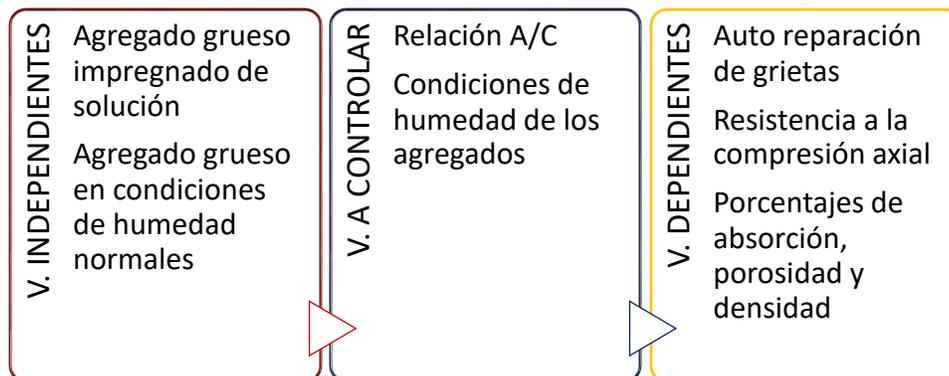


Figura 3.1 Variables involucradas en la investigación

### 1.2 Método de trabajo y diseño experimental

En el afán de extender el tiempo de vida útil de las estructuras de concreto fabricadas en la Ciudad de Chetumal, se ha propuesto un método de impregnación al vacío y encapsulación del agregado grueso, con el propósito fundamental de promover el fenómeno de auto reparación de las grietas en el concreto.

Se propone un trabajo experimental (Figura 3.2) basado en ensayos de laboratorio con probetas de cilindro experimentales y de control para comparar los resultados arrojados en ambos casos.

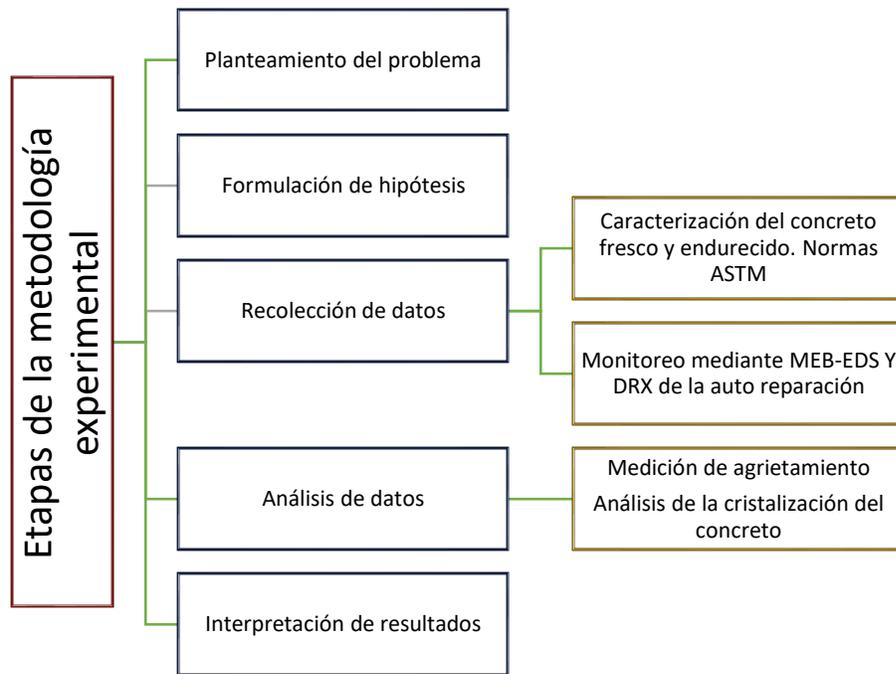


Figura 3.2 Etapas de la metodología experimental

Para tener datos estadísticos se realizarán cinco cilindros experimentales y cinco cilindros de control para tres diferentes tiempos de curado (7, 14 y 28 días). Además, se elaborarán cuatro cilindros experimentales y cuatro cilindros de control para las determinaciones de absorción, porosidad y densidad, del mismo modo para tres tiempos de curado (7, 14 y 28 días).

Para el monitoreo del proceso de auto reparación se evaluará el desempeño de una muestra de concreto experimental y de control para cada tiempo de curado (Tabla 3.1)

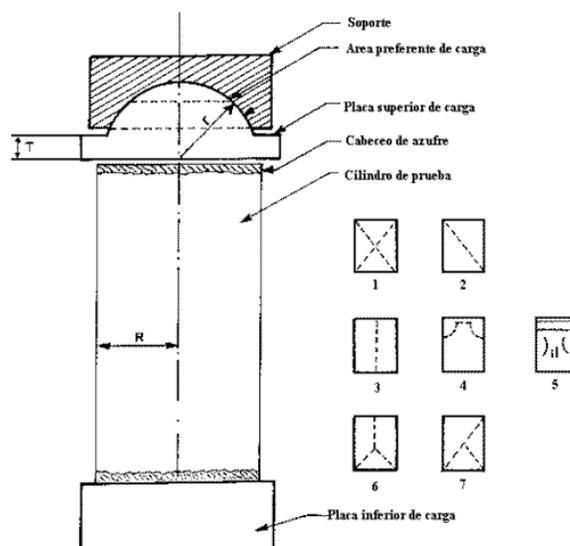
**Tabla 3.1 Diseño experimental**

DISEÑO EXPERIMENTAL										
TRATAMIENTO		BLOQUE		PRUEBA		DRX	MEB-EDS	VICKERS	TOTAL CILINDROS	TOTAL DE PRUEBAS
		TIPO 30	TIPO 15	ABSORCIÓN	COMPRESIÓN					
CXP con silicato de sodio	TIEMPO DE CURADO	CANTIDAD DE CILINDROS				NÚMERO DE CILINDROS				
	CXP7	5	4	●	●	CXP7-1 CXP7-2	CXP7X1 CXP7X2 CXP7X3	CXP7V1 CXP7V2 CXP7V3	9	17
	CXP14	5	4	●	●	CXP14-1 CXP14-2	CXP14X1 CXP14X2 CXP14X3	CXP14V1 CXP14V2 CXP14V3	9	17
	CXP28	5	4	●	●	CXP28-1 CXP28-2	CXP28X1 CXP28X2 CXP28X3	CXP28V1 CXP28V2 CXP28V3	9	17
CCN sin silicato de sodio	CCN7	5	4	●	●	CCN7-1 CCN7-2			9	9
	CCN14	5	4	●	●	CCN14-1 CCN14-2			9	11
	CCN28	5	4	●	●	CCN28-1 CCN28-2	CCN28-1	CCN28-2	9	13

Los agregados utilizados para el estudio se obtendrán del Banco, Ejido Juan Sarabia, propiedad de la compañía AGBLO considerado con un nivel de confianza del 99.7% y un promedio de resistencia a la compresión de 80.21 kg/cm<sup>2</sup>, siendo por tanto el banco de agregados con mayor calidad en Chetumal, Quintana Roo (Rejón, 2015), (Hernández, 2013).

Para la elaboración de los cilindros los procesos necesarios serán definidos a continuación (Cabrera Díaz, 2010):

1. Caracterización de los agregados
2. Diseño de las mezclas
3. Preparación de las mezclas
4. Caracterización del concreto fresco
5. Pruebas en concreto fresco
6. Caracterización del concreto endurecido
7. Pruebas en concreto endurecido
8. Resultados existentes



**Figura 3.3 Cilindro de 30 cm para prueba de compresión ASTM C39/C39**

Para un mejor desarrollo del método experimental, ésta investigación se ha dividido en cinco etapas consecutivas mostradas en la figura 3.4.

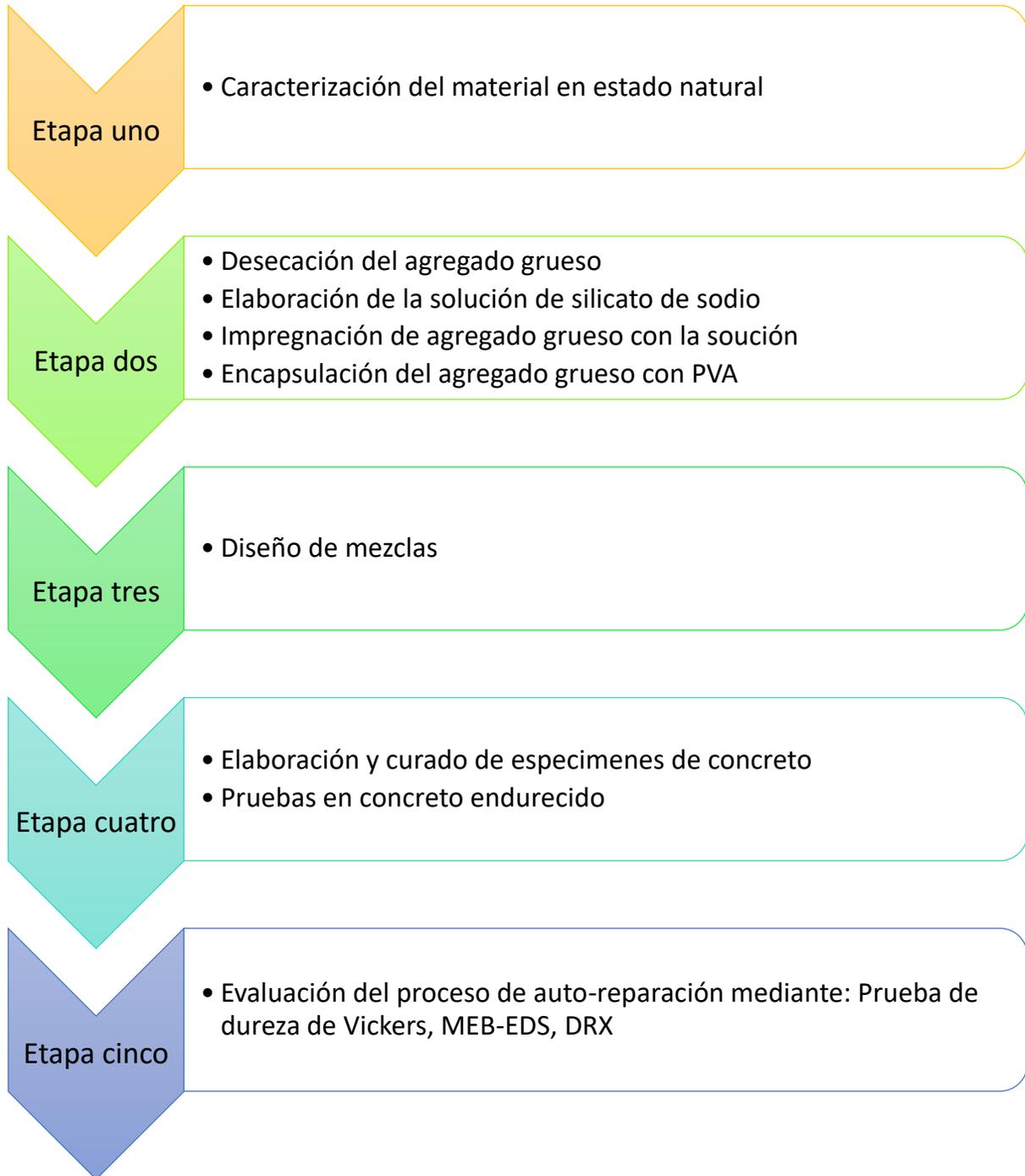


Figura 3.4 Etapas del diseño experimental

## 1.3 Metodología

### Etapa uno

#### 1.1 Caracterización del material en estado natural

##### Agregado fino

Debe cumplir con los requisitos básicos de las normas ASTM:

1. Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas.
2. Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1, ni que varíe en más de 0.2 del valor típico de la fuente del abastecimiento del agregado. En el caso de que sobrepase este valor, el agregado fino se deberá rechazar a menos que se hagan los ajustes adecuados en las proporciones del agregado fino y grueso.

#### **1. Reducción de muestras de agregados a tamaños de ensayos (cuarteo).**

Para la reducción de muestras, se utilizó la norma ASTM C702-98. Se aplicó el Método B (Figura 3.5), de la norma ASTM D75 (Astm:C702/C702M-11, 2011)



**Figura 3.5 Cuarteo del agregado fino**

## 2. Método estándar para determinar el módulo de finura del agregado fino.

El módulo de finura (FM) del agregado se obtuvo, conforme a la norma ASTM C-125 (ASTM C 125-03, 2005), sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura so: 0.075mm (Núm. 200), 0.15 mm (Núm.100), 0.30 mm (Núm.50), 0.60 mm (Núm.30), 1.18 mm (Núm.16), 2.36 mm (Núm.8), 4.75 mm (Núm.4), 9.52 mm (3/8"), 19.05 mm (3/4"), 38.10 mm (1½"), 76.20 mm (3"), y 152.40 mm (6"). El módulo de finura es un índice de la finura del agregado, entre mayor sea el módulo de finura más grueso será el agregado.



Figura 3.6 Cuarteo del agregado fino



Figura 3.7 Pesaje del agregado fino



Figura 3.8 Cribado del agregado fino

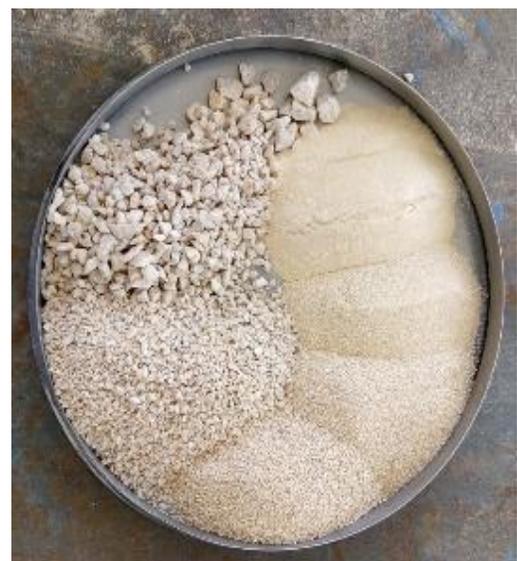


Figura 3.9 Granulometría del agregado fino

Fórmulas:

$$\text{Fórmula 1} \quad Mf = \frac{\Sigma\% \text{ Retenido Acumulado}}{100}$$

Dónde:

$Mf$  = Módulo de finura

$\Sigma\%$  = Porcentaje retenido en las mallas

Sustituyendo:

Muestra 1

$$Mf = \frac{314}{100}$$

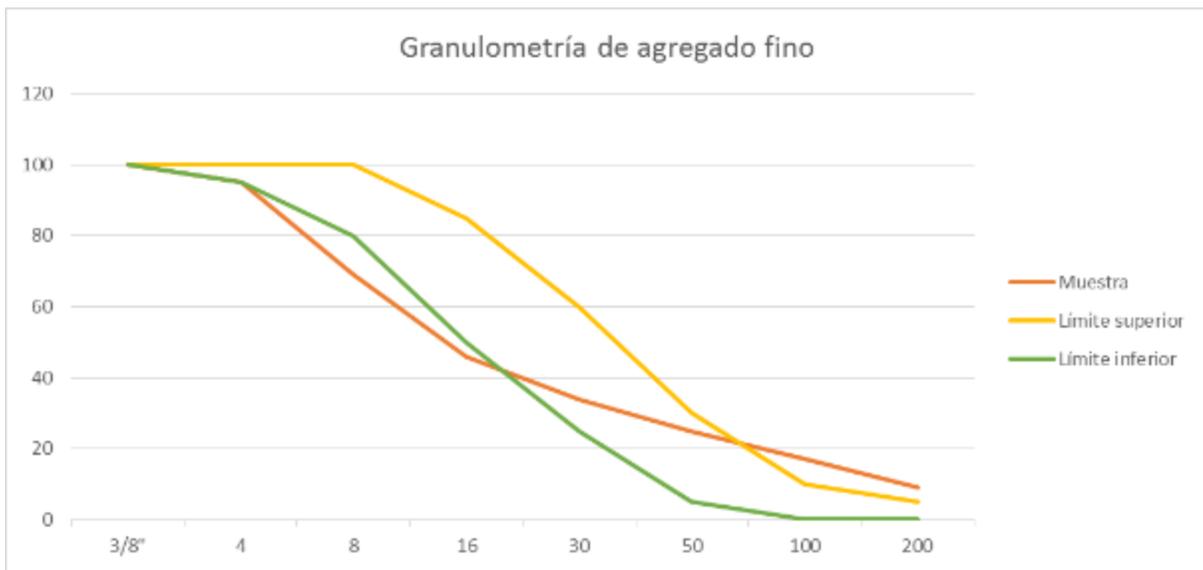
$$Mf = 3.14$$

Muestra 2

$$Mf = \frac{279}{100}$$

$$Mf = 2.79$$

En la gráfica 3.1 se puede apreciar que el agregado fino adquirido únicamente cumple con el porcentaje que pasa en cuatro tamices, 3/8", Núm. 4, Núm. 30 y Núm. 50, respectivamente, sin embargo, para el diseño experimental se seleccionará el agregado que quede retenido en las mallas del Núm. 8 al Núm. 100, desechando el agregado retenido en malla Núm. 4 y Núm. 200.



Gráfica 3. 1 Granulometría del agregado fino

### 3. Método estándar para determinar la densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino

El peso específico (densidad relativa) de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión).

Para la determinación de la densidad relativa de arena se emplearon las normas ASTM C-702. (Figura 3.6) para el cuarteo y la norma ASTM C-128 (ASTM C 128-01, 2001). (Figura 3.10) para obtener el tamaño de grano deseado.



Figura 3.10 Cribado del agregado fino

Para la obtención de los valores de Densidad relativa (Figura 3.11), seca al horno, Saturada Superficialmente Seca (SSS), Relatividad Aparente y Absorción (Figura 3.12) se empleó la norma ASTM C-128.



Figura 3.11 Matraz aforado con agua y agregado fino



Figura 3.12 Pesaje del matraz aforado

Datos:

*A = Masa de la muestra de ensayo seca al horno*

*B = Masa del picnómetro con agua hasta la marca de calibración*

*C = Masa del picnómetro con muestra de ensayo y agua hasta la marca de calibración*

*S = Masa de la muestra de ensayo, saturada y superficialmente seca*

*H = Contenido de agua %*

*Mh = Muestra húmeda*

*Ms = Muestra seca*

Formulas:

Densidad relativa, seca al horno, Saturada Superficialmente Seca (SSS), Relatividad Aparente y Absorción. (ASTM C-128)

**Fórmula 2** Densidad relativa (seca al horno):

$$S = \frac{A}{(B + S - C)}$$

Donde:

$$A = 185 \text{ gramos}$$

$$B = 1280 \text{ gramos}$$

$$C = 1600 \text{ gramos}$$

$$S = 200 \text{ gramos}$$

Sustituyendo:

$$S = \frac{185}{(1280 + 200 - 1600)}$$

$$S = \frac{185}{-120}$$

$$S = 1.54$$

**Fórmula 3** Densidad relativa

$$SSS = \frac{S}{(B * S - C)}$$

Sustituyendo:

$$SSS = \frac{200}{(1280 + 200 - 1600)}$$

$$SSS = \frac{200}{120}$$

$$SSS = 1.66$$

**Fórmula 4** Densidad relativa aparente

$$DRA = \frac{A}{(B + A - C)}$$

Sustituyendo:

$$DRA = \frac{185}{1280 + 185 - 1600}$$

$$DRA = \frac{185}{-135}$$

$$DRA = 1.37$$

**4. Método estándar para la determinación del porcentaje de absorción**

La determinación del porcentaje de absorción se obtiene con forma a la norma antes mencionada y se aplica la siguiente fórmula: obtiene el porcentaje de absorción por medio de la siguiente fórmula:

**Fórmula 5** Porcentaje de absorción:

$$\text{Absorción \%} = 100 \left( \frac{S - A}{A} \right)$$

Sustituyendo:

$$\text{Absorción \%} = 100 \left( \frac{200 - 185}{185} \right)$$

$$\text{Absorción} = 100\% (0.176)$$

$$\text{Absorción} = 1.17\%$$

### 5. Método estándar para la determinación del contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad se empleó el método rápido obteniendo los resultados por diferencia de peso. (Figura 3.13)



Figura 3.13 Agregado fino seco en cristal de reloj.

**Fórmula 6**

$$H = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Dónde:

$H = \text{Contenido de humedad en \%}$

*Mh = Masa de la muestra húmeda*

*Ms = Masa de la muestra seca*

Sustituyendo:

$$H = x$$

$$Mh = 100 \text{ gramos}$$

$$Ms = 90 \text{ gramos}$$

$$H = \frac{100 - 90}{90} \times 100$$

$$H = \frac{10}{90} \times 100$$

$H = 11.1 \%$
---------------

La absorción y humedad superficial de los agregados se debe determinar de acuerdo con las normas ASTM C-70 (ASTM C 70-94, 2001), C-127 (ASTM C 127-01, 2001), C-128 (ASTM C 128-01, 2001) y C-566 (ASTM, 2013) de manera que se pueda controlar el contenido neto de agua en el concreto y se puedan determinar los pesos correctos de cada mezcla.

### **6. Método estándar para la determinación de pesos volumétricos: sueltos y compactados.**

El peso volumétrico (también llamado peso unitario o densidad en masa) de un agregado, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen al que se hace referencia, es ocupado por los agregados y los vacíos entre las partículas de agregado.

**Suelto y seco:**

**Fórmula 7**

$$P.V.S.S. = \frac{Wm}{Vr}$$

Donde:

$Wm =$  *Peso del material (kilogramos)*

$Wm =$  *(Peso del recipiente + material) – (Peso recipiente)*

$Vr =$  *Volúmen del recipiente (m<sup>3</sup>)*

Sustituyendo:

$$P.V.S.S. = \frac{6.170 \text{ kgs.} - 3.64 \text{ kgs.}}{0.0017 \text{ m}^3}$$

$$P.V.S.S. = \frac{2.53}{0.0017}$$

$P.V.S.S. = 1488 \text{ kgs/m}^3$



**Figura 3.14** Determinación de peso suelto del agregado fino

**Seco y compactado**

Se calculó el peso volumétrico del material seco y compactado, con la siguiente fórmula:

**Fórmula 8**

$$P.V.S.C. = \frac{Wm}{Vr}$$

Donde:

*Wm = Peso del material en kilogramos*

*Vr = Volúmen del recipiente en metros cúbico*

Sustituyendo:

$$P.V.S.C. = \frac{6.405 \text{ kgs.} - 3.64 \text{ kgs.}}{.0017m^3}$$

$$P.V.S.C. = \frac{2.76 \text{ kgs.}}{.0017m^3}$$

$P.V.S.C. = 1623 \text{ kgs}/m^3$
-----------------------------------

Agregado grueso.

Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.

Los agregados gruesos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

### 1. Análisis granulométrico

Requisitos de granulometría para los agregados gruesos ASTM C-33.

El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual todo el agregado debe pasar. El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño. Por ejemplo, el agregado de número de tamaño 67 tiene un tamaño máximo de 25 mm y un tamaño máximo nominal de 19 mm. De 90% a 100% de este agregado debe pasar la malla de 19 mm y todas sus partículas deberán pasar la malla de 25 mm.

### 2. Método estándar para la determinación del peso específico y absorción de material grueso.

Se realizó la caracterización del agregado grueso para determina el peso específico y el porcentaje de absorción con base en la norma ASTM C-127

### 3. Contenido de humedad

**Fórmula 9** 
$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de gravas secas}} \times 100$$

Sustituyendo:

$$\omega = \frac{100}{2935} \times 100$$

$$\omega = 3.40$$

Se empleó el método rápido aplicando la siguiente fórmula

$$w = \frac{(T + Sh) - (T + S's)}{(T + S's) - T} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Sustituyendo:

**Fórmula 10** 
$$w = \frac{(50 + 520) - (50 + 500)}{(50 + 500) - 1} \times 100 = \frac{20}{549} \times 100$$

$$w = 3.64$$

Además de la prueba convencional para la determinación del porcentaje de absorción que requiere sumergir en agua el agregado seco durante 24 horas, para evaluar si dicho porcentaje de absorción incrementa o se mantiene al sumergir el agregado por 48 y 72 horas.

Paralelo a dicha prueba se realizan tres mediciones más para determinar el porcentaje de absorción, empleando una cámara al vacío. Estas mediciones se harán al sumergir el agregado por 30, 60 y 90 minutos en una cámara al vacío.

**4. Método estándar para determinar la densidad aparente, peso unitario y vacíos en agregados gruesos.**

El método estándar para las siguientes determinaciones de basaron en el procedimiento de la norma ASTM C-29 (Figura 3.15), aplicando en el procedimiento las normas ASTM D-75 Y ASTM 702.



**Figura 3.15** Peso del agregado grueso

Cálculo para la obtención de la densidad aparente

**Fórmula 11** 
$$m = (g - t)/v$$

O

**Fórmula 12** 
$$m = (g - t) * f$$

Dónde:

g= masa de los agregados más el recipiente

t= masa del recipiente (kgs)

v= volumen del recipiente (m<sup>3</sup>)

f= factor para recipiente (m<sup>3</sup>)

Sustituyendo:

$$m = (19.160 - 4.830) * 205.72$$

$$m = 14.33 * 205.72$$

$$m = 2948 \text{ kgs.}$$

### 5. Método estándar para la determinación de la densidad aparente, peso unitario y vacíos en agregados gruesos.

Se aplicó el método estándar descrito en la norma ASTM C-29. Y en el procedimiento se incluyeron las normas ASTM D-75 y ASTM 702.

#### Fórmula 13 Densidad

$$m = \frac{(g - t)}{V}$$

Ó

$$m = (g - t) f$$

Dónde:

m = densidad aparente de los agregados

g= masa de los agregados + recipiente = 19.160

t= masa de recipiente kg = 4.830

v= volumen del recipiente m<sup>3</sup> =

f= factor para recipiente m<sup>3</sup>

Sustituyendo:

$$m = \frac{(19.160 - 4.83)}{.010}$$

$$m = 1,433$$

Contenido de vacíos

Calcula el contenido de vacíos en los agregados usando la densidad aparente determinada mediante varillado

**Fórmula 14** Porcentaje de vacíos.

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{100((s \times w) - m)}{(s \times w)}$$

Dónde:

m= densidad aparente de los agregados ((kg/m3)

s= densidad relativa (base seca ASTM C 127)

w= densidad del agua = 996.25 kg m3

Sustituyendo:

$$\% \text{ Vacíos} = 38.43$$

**i. Caracterización del cemento.**

Materiales	Composición (%)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI	
Cemento	Portland	Ordinario						

ii. Caracterización del Silicato de Sodio

<b>Material</b>	<b>Propiedades</b>				
	<i>Fórmula</i>	<i>Mw</i> ( <i>g/mol</i> <sup>1</sup> )	<i>Densidad</i> ( <i>g/ml</i> )	<i>Viscosidad</i> ( <i>cps</i> )	<i>pH</i>
<b>Silicato de sodio</b>	$Na_2O$ $(SiO_2)_x XH_2O$				11.60

## 1. Etapa dos

### 1. Dsecación de las muestras de agregado grueso

#### Equipo y Material:

- Horno que permita una temperatura aproximada de 110°C por 24 horas
- Dsecador al vacío.
- Cámara de vacío de acrílico
- Bolsas de plástico

#### Procedimiento:

1. Mantener el agregado grueso en el horno o mufla a una temperatura de 110° durante  $24 \pm 4$  horas hasta obtener un agregado en estado seco.
2. Dejar enfriar en condiciones normales. (Figura 3.16)
3. Una vez pasado el tiempo, resguardar al vacío el agregado grueso en condición seca para evitar la absorción de la humedad del ambiente.
4. Registrar su peso (Figura 3.17)



Figura 3.16 Pesaje de agregado grueso seco.



Figura 3.17 Resguardo al vacío del agregado grueso seco

## 2. Elaboración de solución de Silicato de Sodio

### Material y equipo:

- Vaso de ensaye
- Balanza con precisión de 0.000 gramos
- Espátula
- Cristal de reloj
- Agitador magnético

### Procedimiento:

La solución de Silicato de sodio se preparará con agua desionizada en un porcentaje del 10% en peso.

1. Pesar 10 gramos por cada litro de solución, es decir, se requieren 15 litros de solución para impregnar el agregado grueso, por lo tanto, se ocupan 150 gramos de Silicato de Sodio (Figura 3.19)



Figura 3.18 Material de laboratorio

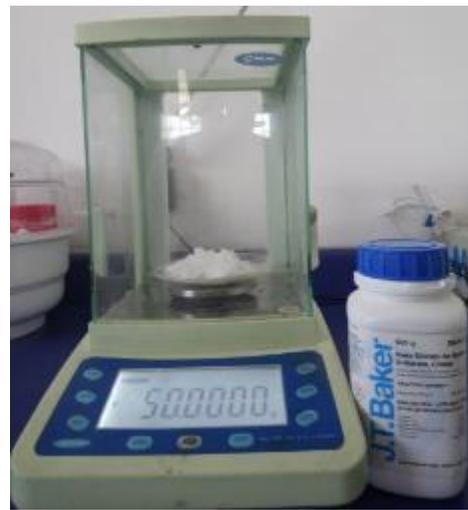


Figura 3.19 Pesaje del Silicato de Sodio

2. Disolver el Silicato de Sodio en agua desionizada con ayuda del agitador magnético a 40 rpm durante 15 minutos (Figura 3.21).



Figura 3.20 Balanza con aproximación de 0.0000 gramos



Figura 3.21 Mezcla de la solución con agitador magnético

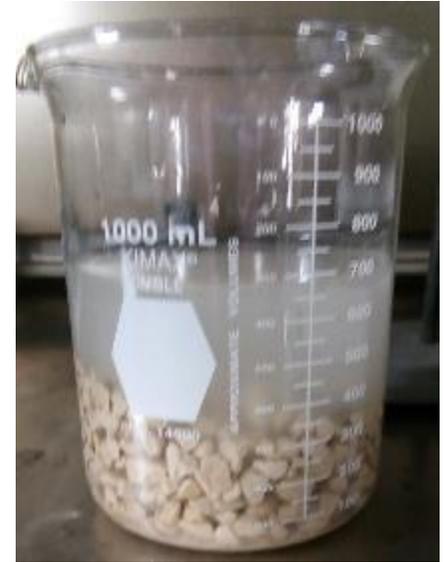


Figura 3.22 Agregado grueso sumergido en solución de Silicato sodio

### 3. Determinación de pH de la solución

Tomar parte de la solución y con ayuda de un peachímetro determinar el índice de alcalinidad o basicidad de la solución.

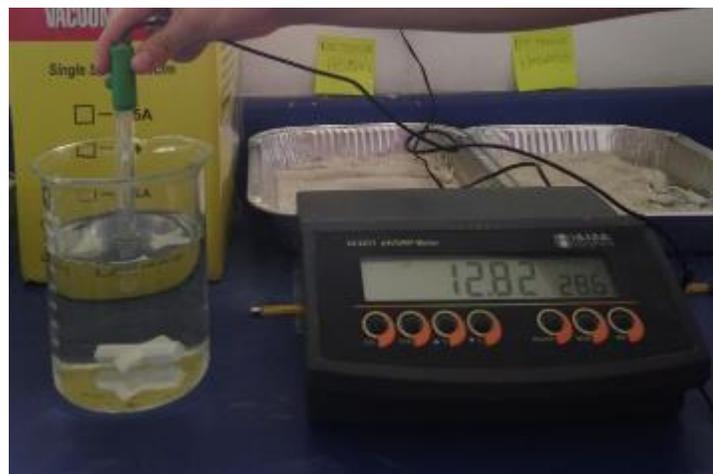


Figura 3.23 Lectura del pH de la solución de silicato de sodio

#### 4. Impregnación del agregado grueso con la solución de Silicato de Sodio

##### Material y equipo:

- Bomba de vacío
- Cámara al vacío con tres puertos (vacío, ventilación y barómetro)
- Agregado grueso en condición seca.

##### Procedimiento:

De acuerdo a los porcentajes de absorción evaluados en la caracterización del agregado grueso, se optará por dejarlo sumergido en la cámara de vacío durante 72 horas  $\pm$  4 horas a -3 bar.

1. Pesar los agregados.
2. Depositar los agregados en la cámara de vacío.
3. Depositar la solución de silicato de sodio al 10% en la cámara. El nivel de silicato de sodio en la cámara debe sobrepasar el nivel del agregado aproximadamente por 30 mm para asegurar que todos los agregados estén inmersos
4. Cerrar herméticamente y presurizar hasta -0,3 bar durante 72 horas  $\pm$  4 horas.



Figura 3.24 Agregado grueso cubierto por solución de Silicato de sodio en cámara al vacío



Figura 3.25 Cámara de impregnación al vacío con tres

5. Una vez que finalice el tiempo estimado, retirar los agregados de la cámara y secar con un paño para eliminar la humedad superficial y obtener un agregado: Saturado superficialmente seco (Figura 3.27).



**Figura 3.26 Agregado grueso saturado con solución de silicato de sodio**



**Figura 3.27 Secado manual del agregado grueso para obtener un estado superficialmente seco**

## 5. Encapsulación del agregado grueso

Para prevenir cualquier fuga potencial o cualquier interacción prematura con la matriz de cemento de la solución de Silicato de Sodio, los agregados impregnados se recubrirán con un revestimiento basado en alcohol de polivinilo (PVA) usando el método de revestimiento por inmersión. Después de que el agregado impregnado con silicato de sodio quede encapsulado se almacenará en un recipiente de plástico hermético hasta su empleo.

### Material y equipo:

- Vaso de ensaye
- Balanza con precisión de 0.000 gramos
- Espátula
- Cristal de reloj
- Agitador magnético

### Procedimiento:

1. Una vez seco superficialmente el agregado, colocar en una canastilla de metal y sumergir en la solución de PVA durante un minuto.



Figura 3.28 Agregado recubierto con PVA

2. Retirar y sumergir de manera continua en tres ocasiones para que, por acción del viento, la película de PVA se vaya formando sobre el agregado (Figura 3.29).
3. Una vez formada la película, retirar de la canastilla y resguardar el material hasta su empleo.



**Figura 3.29** Inmersión del agregado grueso en solución de PVA



**Figura 3.30** Muestra de agregado grueso encapsulado con PVA

#### 4. Etapa tres

##### 1. Diseño de mezclas para los especímenes de control y experimentales.

El diseño de mezclas se hará en consideración a las variables mencionadas anteriormente y a los resultados obtenidos en la caracterización de los agregados.

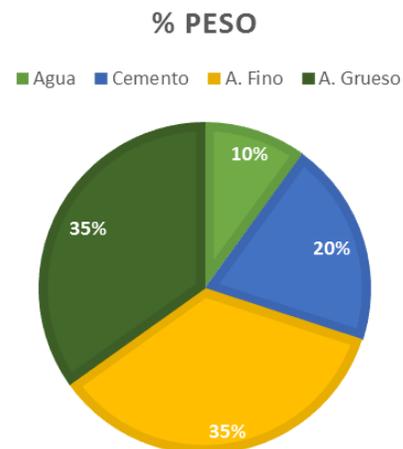
---

**Porcentaje de agregado impregnado por** 100%  
**el total de volumen de agregado**

---

Diseño de mezcla	
Datos	
Resistencia del concreto	280 kg/cm <sup>2</sup>
Relación A/C	0.5
Relación A/C por peso	0.57
Revenimiento	2.5 a 7.5
TMA	3/8"

Componente	Peso (kgs)
Agua	228
Cemento	456
A. Fino	800.73
A. Grueso	795.27
<b>Total</b>	<b>2280</b>



*El peso de los componentes corresponde a la dosificación para un metro cúbico de concreto.*

## 6. Etapa cuatro

### 1. Elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto.

Para la elaboración de especímenes de concreto, para concreto consolidado por varillado se utiliza la prueba ASTM C-192.

#### Preparación de materiales:

- *Cemento*: Adquirir el cemento a pocos días de realizar el colado y resguardar para protegerlo de la humedad y factores ambientales que pudiesen modificarlo.
- *Agregados*: Cuantificar y mezclar para tener un estado de humedad homogéneo y evitar la segregación.

#### Mezcla del concreto

Mezclar el concreto en una revolvedora a 40 rpm, humedeciéndola previamente antes de iniciar la rotación de los materiales para evitar la segregación o la absorción del agua de la dosificación.

1. Agregar el agregado grueso y el 40% del agua de mezclado, según el diseño de mezcla, encender la revolvedora y verter el agregado fino, posteriormente el cemento y por último 40% del agua.
2. Dejar 3 min en la revolvedora, para después dejarlo reposar 3 min con un paño húmedo sobre la boca de la revolvedora para que este no pierda humedad.
3. Mezclar por última vez 2 min y si se es necesario agregar el 20% del agua restante.



**Figura 3.31 Mezcla de concreto fresco en revolvedora**

Tomar parte de la mezcla para realizar las pruebas de peso volumétrico ASTM C-138 (Astm:C138/C138M-13, 2013), para el revenimiento ASTM C 143/C 143 y contenido de aire ASTM C-231 (Figura 3.32)



**Figura 3.32 Prueba de asentamiento plástico en concreto fresco**

a. Método de Ensayo Normalizado para la determinación del asentamiento del concreto hidráulico. ASTM C-143.

Una vez realizadas las mezclas de concreto fresco para los cilindros testigo y experimentales se procedió a realizar la prueba de revenimiento con base en la norma ASTM C-143 (Figura 3.33 y 3.34)



**Figura 3.33 Lectura de revenimiento en concreto experimental**



**Figura 3.34 Prueba de revenimiento en concreto de control**

- b. Método de ensayo normalizado para la Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) y rendimiento (volumen de concreto producido) ASTM C-138



Figura 3.35 Determinación del rendimiento del concreto fresco

- c. Método de Ensayo Normalizado para Contenido de Aire del Concreto Recién Mezclado Mediante el Método por Presión. ASTM C-231

La lectura del contenido de aire de las mezclas de concreto se realiza con base en la norma ASTM C-231 (American Society of Testing Materials, 2010) , en la cual se utiliza el concreto recién mezclado y una olla de presión. Esta medición determina el aire contenido en la mezcla, específicamente el aire que se encuentra dentro de las partículas del agregado.



Figura 3.36 Lectura del contenido de aire en concreto fresco

## 2. Elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra

Después de elaborar el concreto y sus realizar sus pruebas correspondientes, se procede al colado de cilindros, para ello se aplicaron las normas ASRM C 470 / 470 M



Figura 3.37 Cilindros de concreto experimental de 30 cms.



Figura 3.38 Cilindros de concreto experimental 15 cms.



Figura 3.39 Curado de cilindros de 30 y 15 cms. en tanque de agua.



**Figura 3.40 Cilindros de concreto experimental de 30 y 15 cms.**



**Figura 3.41 Cilindros de concreto de control de 30 y 15 cms.**

## Pruebas en concreto endurecido

### 1. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Norma ASTM C39/C39

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que la falla ocurra. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen.

Las probetas cilíndricas se sometieron a ensayo de acuerdo a la norma ASTM C39/C39, “Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto”. El diámetro de los cilindros utilizado fue de 15cmX30cm.

El cabeceo de los cilindros fue conforme a la norma ASTM C1231 con tapas de almohadillas de neopreno.

Proceso de medición y pesaje de cilindros para verificar que cumplieran con las medidas normadas para someterse a la prueba de compresión axial.



Figura 3.42 Pesaje de cilindros

Colocación del espécimen.

Velocidad de carga.



Figura 3.43 Prueba de compresión en cilindros de 30 cms

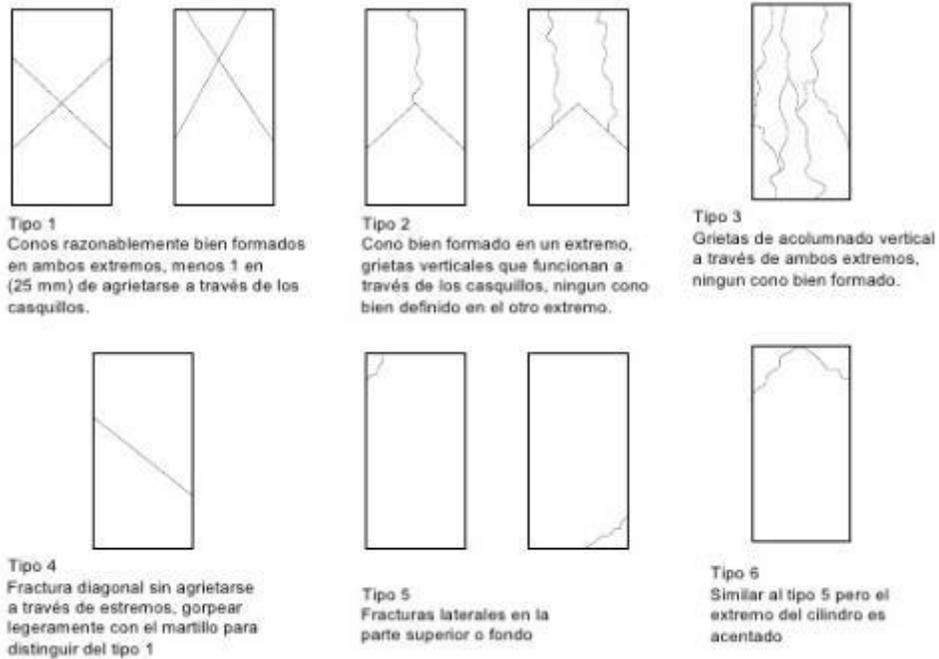


Figura 3.44 Tipos de fracturas en cilindros

1. Los resultados de la resistencia del concreto se obtienen automáticamente a través de la máquina, la cual proporciona el cálculo.

Se sometieron a prueba cinco cilindros de la misma edad de curado y se reportó la resistencia promedio.



**Figura 3.45 Cilindros experimentales sometidos a prueba de compresión**



**Figura 3.46 Cilindros de control sometidos a la prueba de compresión**

2. Método estándar para la determinación de la absorción, densidad y porosidad. Norma ASTM C-642.

La porosidad indica la calidad del concreto y será así un índice indirecto de su permeabilidad. Los ensayos fueron realizados en probetas de 10x20cm. (ASTM C-642).



**Figura 3.47** Cilindros en tanque de agua para prueba de absorción

*Masa saturada después de ebullición en agua:*



**Figura 3.48** Cilindros sumergidos en agua hirviendo

*Masa sumergida aparente:*



**Figura 3.49** Pesaje de cilindros sumergidos

*Masa seca al horno:*

Formulas:

**Fórmula 15** Porosidad total:

$$\text{Porosidad total} = \frac{C - A}{C - D} \times 100$$

**Fórmula 16** Densidad total:

$$\text{Densidad total} = \frac{A}{B - D} \times 100$$

**Fórmula 17** Absorción:

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Dónde:

*A = Peso seco al horno*

$B = \text{Peso saturado}$

$C = \text{Peso saturado, después de hervir.}$

$D = \text{Peso sumergido}$

## 2. Etapa cinco

### 1. Evaluación del proceso de Auto-reparación

#### 1.1 Prueba de Dureza de Vickers

#### Preparación de muestras en resina

1. Obtener las muestras de concreto a los 28, 14 y 7 días de curado de las pruebas a compresión. Procurando que en las mismas haya agregado grueso y pasta cementante (Figura 3.50)
2. De las muestras obtenidas reducir su tamaño hasta  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  con ayuda de un cincel o un esmeril.



Figura 3.50 Recuperación de muestras de cilindros tronados.

3. Preparar la resina con catalizador en una proporción 100:2, es decir, por cada 100 gramos de resina se emplearán 2 gramos de catalizador.
4. Engrasar los moldes con cera desmoldante y colocar las muestras seleccionadas.

5. Verter la resina y esperar a que endurezca.
6. Desmoldar las muestras.
7. Desbastar las muestras con lijas de agua que vayan de un rango del número 50 al número 2000



**Figura 3.51** Desbaste con lijas de agua de las muestras en resina

8. Desbastar y pulir las muestras con silica y pasta de diamante en una pulidora rotatoria por 20 min (Figura 3.52) y posteriormente dejarlas limpiar en un limpiador ultrasónico por 10 min.



Figura 3.52 Pulidora rotatoria

Las muestras preparadas previamente se someterán a la prueba de Vickers

2. Colocar la muestra en la prensa y ubicar una zona en la cual se aplicarán las cargas (Figura 3.53)



Figura 3.53 Indentador Vickers para prueba de dureza

3. Aplicar las cargas en un rango de 1-5 kgs o hasta lograr la huella de indentación deseada
4. Medir la dureza y longitud de las diagonales obtenidas.

5. Realizar la Difracción de Rayos X: de las muestras preparadas con anterioridad, seleccionar una de cada tiempo de curado para efectuarle la difracción.

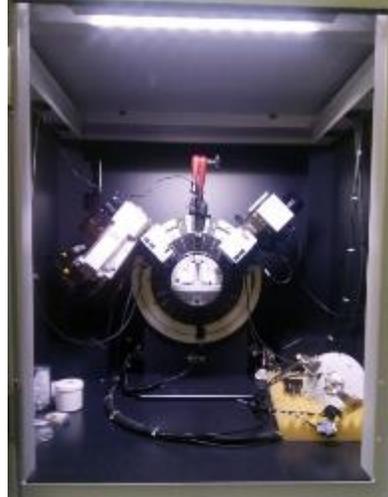


Figura 3.54 Difractor de Rayos X

6. Realizar el mapeo químico
7. Realizar el MEB-EDS
  - 1.1 Para la realización de la microscopía electrónica de barrido se cortarán las muestras preparadas en resina de tal manera que quepan siete piezas en el porta muestras. Mantenerlas en el desecador hasta su preparación para el MEB (Figura 3.55) y entintar las muestras con carbón y metalizarlas con cobre (Figura 3.56).



Figura 3.55 Desecador de silica con muestras preparadas



Figura 3.56 Muestras metalizadas con cobre para el MEB

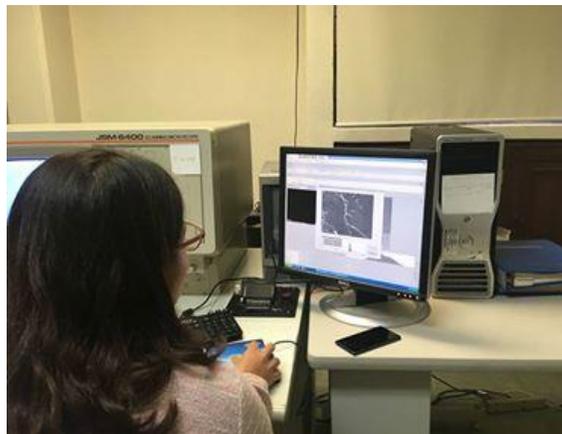


**Figura 3.57 Colocación de las muestras en el Microscopio**



**Figura 3.58 Preparación de muestras en el MEB para hacer el vacío**

8. Colocación de muestras en MEB (Figura 3.57 y 3.58) y observación mediante el microscopio de la formación de productos de hidratación a los 7, 28 y 90 días del fisuramiento inducido (Figura 3.59)



**Figura 3.59 Localización de huellas de indentación y medición de micro fisuramiento**

## **CAPÍTULO 4**

### Resultados y discusiones

---

CAPÍTULO 4

Análisis y resultados

1.1 Caracterización del material en estado natural

1.1.1 Agregado grueso

El agregado grueso que se empleó para este estudio es aquel que pasó por las mallas 3/8" con un porcentaje que pasa del 53.83% hasta la retenida en el tamiz Núm. 4 con un porcentaje que pasa del 21%, resultando un porcentaje retenido acumulado de 76%. (Tabla 4.1)

Tabla 4.1 Análisis granulométrico de los agregados gruesos

Análisis granulométrico del agregado grueso							
Tipo de muestra: Roca caliza triturada							
Numero de tamaño: 7							
Tamaño de la muestra: 3000 gramos							
Tamiz (Núm..)	Tamiz (mm)	Malla (W-grs.)	% Retenido	% Ret. Acum	% que pasa	Límite superior	Límite inferior
1 1/2"	37.500	0	0	0	100		
1"	25.000	0	0	0	100		
3/4"	19.000	245	8.16666667	8.16666667	91.83333333	100	
1/2"	12.500	675	22.5	30.66666667	77.5	100	90
3/8"	9.500	465	15.5	46.16666667	53.83333333	70	40
4	4.750	985	32.83333333	79	21	15	0
8	2.360	375	12.5	91.5	8.5	5	0
16	1.180	105	3.5	95	5		
	Fondo	150	5	100	0		
	Total	3000	100	100			

Para determinar el tratamiento que permitiera una mayor absorción del agregado se aplicaron dos ensayos, el primero a través de la inmersión del agregado en agua, durante 1,2 y 3 días. El segundo mediante una cámara al vacío por 30, 60 y 90 minutos, el porcentaje de absorción del 20 % se logró al quedar en la cámara al vacío durante 60 mín., sin embargo la retención del líquido no era suficiente para permitir trabajar con el agregado, por lo que se sometió a la impregnación al vacío por un periodo de 72 horas ± 4 horas para lograr la migración de las partículas de agua a la matriz de los

agregados, obteniendo así la retención y el porcentaje de absorción deseados, sometiendo por tanto el resto de los agregados del estudio a este tratamiento en la solución de Silicato de Sodio (Tabla 4.2)

Tabla 4.2 Pruebas de absorción en el agregado grueso

Porcentaje de absorción del agregado grueso (%)						
Condiciones del tratamiento	TIEMPO					
	1 día	2 días	3 días	30 mín. /VACÍO	60 mín. /VACÍO	90 mín./ VACÍO
Sumergido en agua	2%	3%	6%			
En cámara de impregnación al vacío				15%	20%	15%

### 1.1.2 Agregado fino

Tabla 4.3 Resultados de la caracterización del agregado fino

Tipo de muestra: Arena de roca caliza triturada		
Caracterización	Norma ASTM	Resultado
Módulo de finura	ASTM C33 y C117	2.965
Densidad relativa (Seca al horno)	ASTM C128	1.54
Densidad relativa SSS	ASTM C128	1.66
Densidad relativa aparente	ASTM C128	1.37
Porcentaje de absorción	ASTM C128	1.17
Contenido de humedad	ASTM C128	11.10%
Peso volumétrico suelto	ASTM 29	1488 kg/m <sup>3</sup>
Peso volumétrico compactado	ASTM 29	1623 kg/m <sup>3</sup>

### 1.1.3 Cemento

Cemento Portland Ordinario Marca Cruz Azul

1.1.4 Agua

Las características visuales del agua empleada se describen en la siguiente tabla

Característica	Resultado
Olor	Inodora
Color	Incolora
Presencia de materia orgánica	Negativo
Presencia de materia inorgánica	Negativo
pH	7

1.1.5 Solución de silicato de sodio

Característica	Resultado
pH	12.80
Concentración %	10%
Color	Incolora

1.2 Pruebas en concreto fresco

1.2.1 Diseño de mezcla

Diseño de mezcla	
Datos	
Resistencia del concreto	280 kg/cm <sup>2</sup>
Relación A/C	0.45
Relación A/C por peso	0.57
Revenimiento	2.5 a 7.5
TMA	3/8"

Tabla 4.4 Resultados del diseño de mezcla teórico

Pasos del diseño de mezclas	Resultado
1. Determinación del revenimiento	2.5 a 7.5
2. Selección del tamaño máximo de agregado	3/8"
3. Determinación de la relación agua-cemento	0.5
4. Cantidad de cemento	456
5. Cantidad de agregado grueso	795.27
6. Cantidad de agregado fino	800.73
<b>Total</b>	<b>2280</b>

Tabla 4.5 Características de los materiales para el diseño de mezclas

Características de los datos seleccionados			
	Cemento Portland Ordinario	Agregado grueso	Agregado fino
Peso específico	3.15	1.24	1.58
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	3150	1623	1587
Peso unitario varillado en seco (kg/m <sup>3</sup> )		1623	
Módulo de finura			2.9
Humedad total		11	11
Absorción de humedad %		4.56	1.17

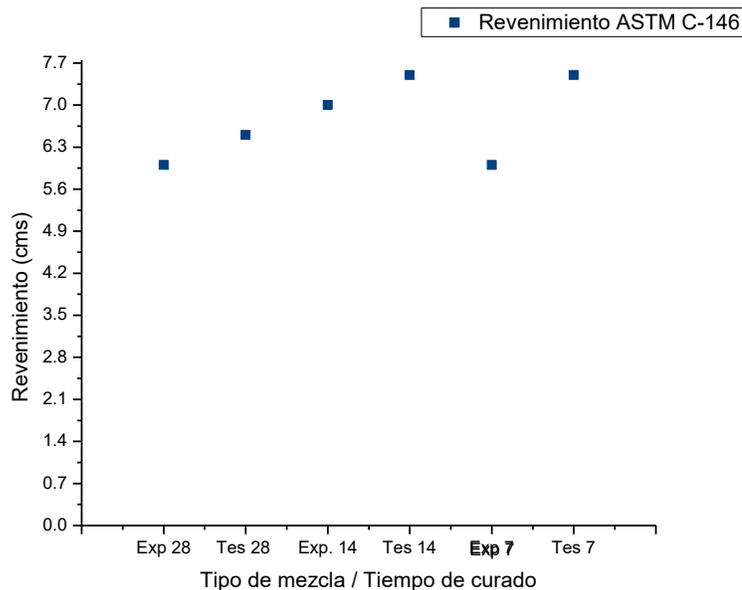
1.2.2 Determinación de asentamiento hidráulico (Revenimiento)

En la elaboración de concreto fresco se respetó el mismo orden para la adición de los agregados, además se verificó que la mezcla quedara homogénea y con las cantidades del diseño teórico de mezcla.

El revenimiento obtenido (Tabla 4.6) en las seis mezclas realizadas varió de 6 a 7.5 cm, quedando dentro del rango máximo deseable en el diseño de mezcla.

Tabla 4.6 Tabla de revenimientos obtenidos en obra

Tipo de mezcla	Revenimiento (cms.)
Experimental 28 días de curado	6
Testigo 28 días de curado	6.5
Experimental 14 días de curado	7
Testigo 14 días de curado	7.5
Experimental 7 días de curado	6
Testigo 7 días de curado	7.5



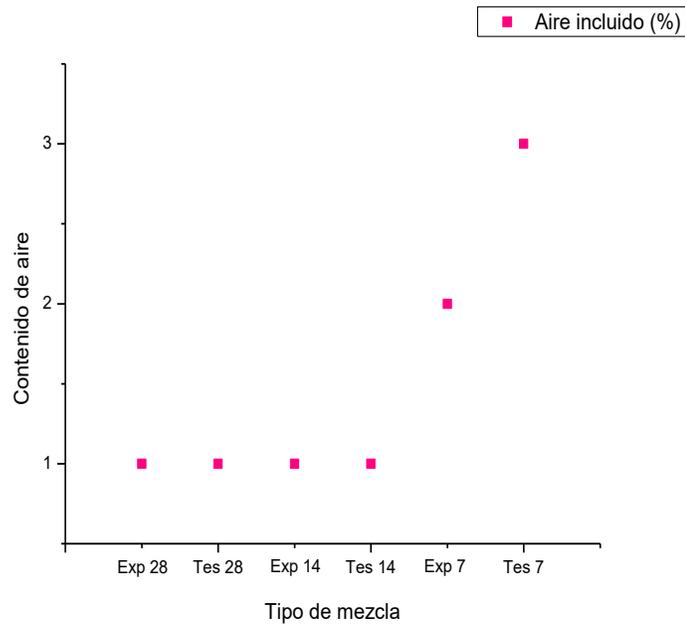
Gráfica 4.1 Revenimiento de concreto fresco elaborado en obra

1.2.3 Determinación de contenido de aire

Las mezclas de concreto experimental y testigo para siete días de curado muestran un porcentaje de aire incluido del 2% y 3% respectivamente (Gráfica 4.2), que es diferente al resto de mezclas debido a que, por las condiciones climáticas (humedad) del día de su elaboración se dejó minutos más en la revolvedora.

**Tabla 4.7 Resultados de aire incluido en concreto fresco elaborado en obra**

Tipo de mezcla	Aire incluido (%)
Experiemental 28 días de curado	1%
Testigo 28 días de curado	1%
Experiemental 14 días de curado	1%
Testigo 14 días de curado	1%
Experiemental 7 días de curado	2%
Testigo 7 días de curado	3%



**Gráfica 4.2 Porcentaje de aire incluido en concreto fresco elaborado en obra**

1.3 Pruebas mecánicas en concreto endurecido

1.3.1 Resistencia a la compresión

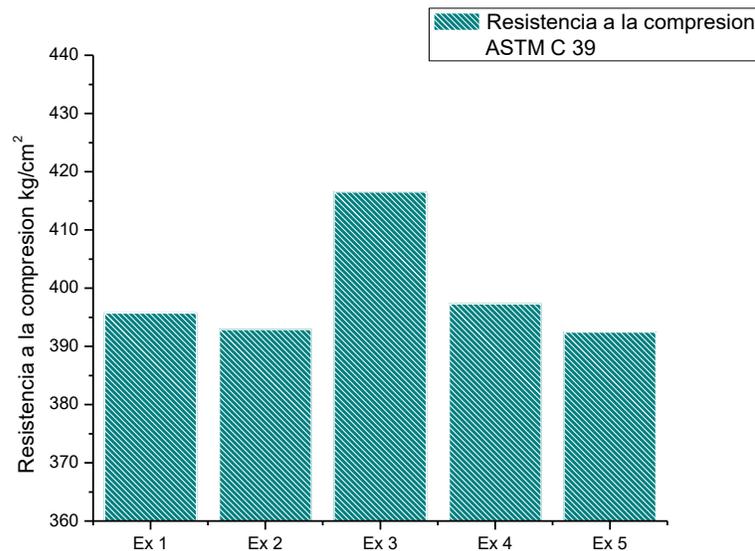
El tiempo de curado húmedo suele afectar la resistencia y la durabilidad del concreto en un clima tropical ya que el curado ayuda a las reacciones químicas de hidratación de los componentes del cemento, principalmente los silicatos y aluminatos.

Un experimento realizado en la península de Yucatán (Solís-Carcaño & Moreno, 2006)., donde existe un clima cálido subhúmedo, utilizó una relación A/C de 0.50 alcanzó una resistencia a la compresión en un rango entre 30 y 40 MPa a los 28 días de curado. Dado que las condiciones climáticas de ambas regiones son catalogadas como cálido subhúmedas y los agregados son calizos, se observa que las resistencias alcanzadas son similares para la misma relación A/C.

En los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión axial en cilindros testigo con 28 días de curado (Gráfica núm. 4.3), los resultados arrojan un valor máximo de 416.50 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo es de 392.46kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 4.8 Prueba de compresión axial en concreto testigo

Resistencia a la compresión		
28 días de curado - Testigo	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de falla
Testigo 1	395.7	Tipo 6
Testigo 2	392.884764	Tipo 3
Testigo 3	416.508472	Tipo 6
Testigo 4	397.314209	Tipo 3
Testigo 5	392.462912	Tipo 6



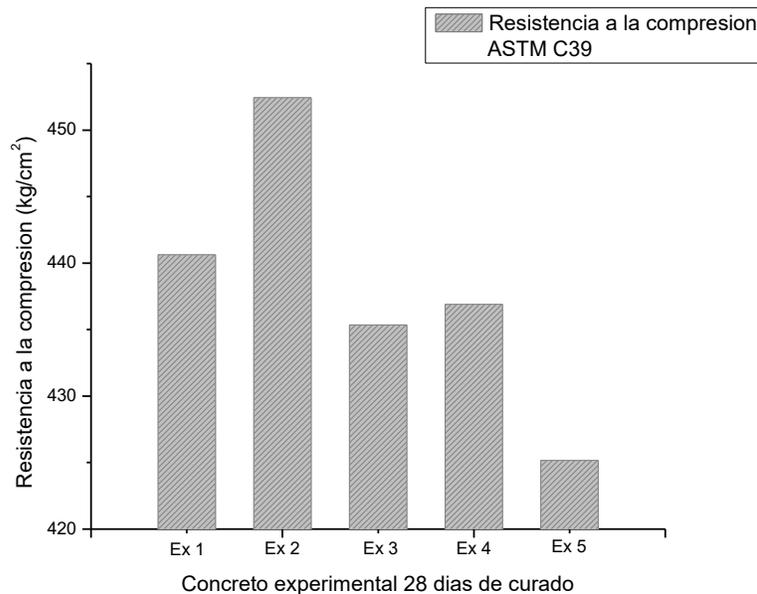
Gráfica 4.3 Resistencia a la compresión en concreto testigo

En los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión axial en cilindros experimentales con 28 días de curado en agua (Gráfica núm. 4.4), los resultados arrojan un valor máximo de 452.43 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo es de 425.15 kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores rebasan el 50% del valor del diseño.

Para las mezclas con 28 días de curado se observó una diferencia de más de 30 kg/cm<sup>2</sup> entre el concreto experimental y el testigo para los valores máximos, correspondiente a un 10% del valor de diseño.

Tabla 4.9 Prueba de compresión axial en concreto experimental

Resistencia a la compresión		
28 días de curado - Experimental	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de falla
Experimental 1	440.624341	Tipo 3
Experimental 2	452.436195	Tipo 3
Experimental 3	435.351192	Tipo 3
Experimental 4	436.897982	Tipo 3
Experimental 5	425.156437	Tipo 6



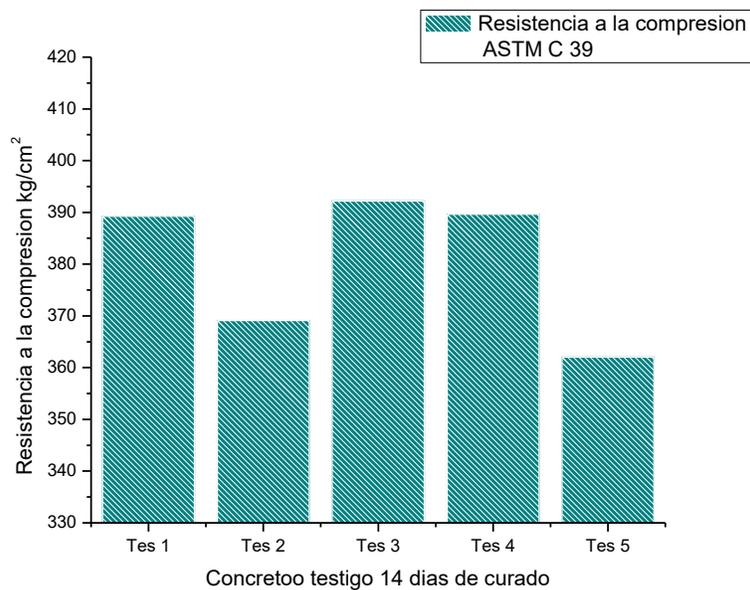
Gráfica 4.4 Resistencia a la compresión en concreto experimental

En los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión axial en cilindros testigo con 14 días de curado (Gráfica núm. 4.5), se obtuvo un valor máximo de 392.18 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo fue de 362.01 kg/cm<sup>2</sup>.

Para las mezclas con 14 días de curado se observó una diferencia de poco más de 5 kg/cm<sup>2</sup> o 1.7% del valor de diseño entre el concreto experimental y el testigo para los valores máximos y poco más de 10 kg/cm<sup>2</sup> o 3.5% para los valores mínimos.

Tabla 4.10 Prueba de compresión axial en concreto testigo

Resistencia a la compresión		
14 días de curado - Testigo	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de falla
Testigo 1	389.227124	Tipo 3
Testigo 2	369.118246	Tipo 3
Testigo 3	392.184312	Tipo 6
Testigo 4	389.645209	Tipo 3
Testigo 5	362.010797	Tipo 3

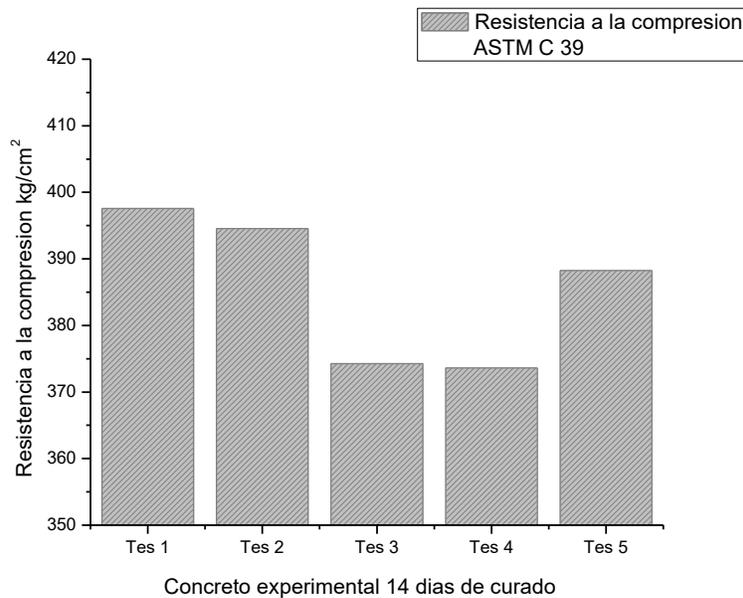


Gráfica 4.5 Resistencia a la compresión en concreto testigo

En los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión axial en cilindros experimentales con 14 días de curado en agua (Gráfica núm. 4.6), los resultados arrojan un valor máximo de 397.58 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo es de 373.61 kg/cm<sup>2</sup>. Dichos valores corresponden a más del 30% del diseño teórico de la mezcla.

Tabla 4.11 Prueba de compresión axial en concreto experimental

Resistencia a la compresión		
14 días de curado - Experimental	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de falla
Experimental 1	397.588828	Tipo 3
Experimental 2	394.570457	Tipo 6
Experimental 3	374.247437	Tipo 3
Experimental 4	373.615211	Tipo 3
Experimental 5	388.237996	Tipo 6

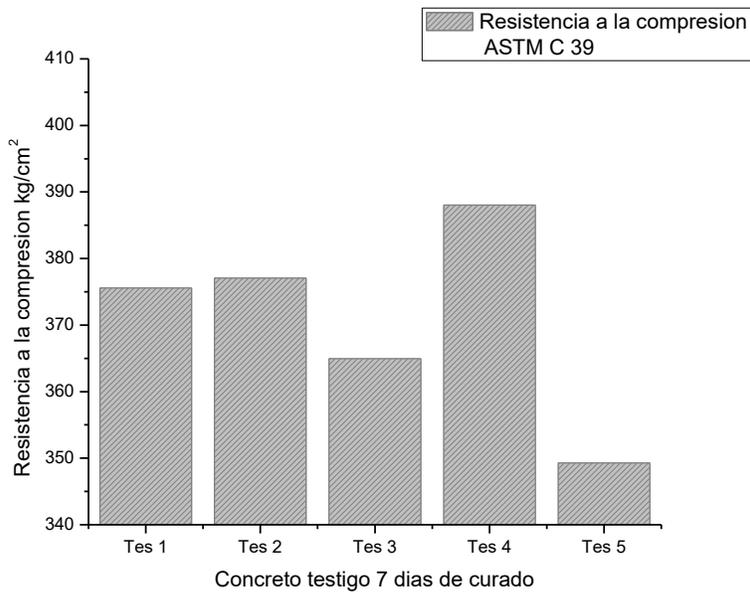


Gráfica 4.6 Resistencia a la compresión en concreto experimental

En los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión axial en cilindros testigo con 7 días de curado en agua (Gráfica núm. 4.7), los resultados muestran un valor máximo de 388.02 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo es de 349.28 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 4.12 Prueba de compresión axial en concreto testigo

Resistencia a la compresión		
7 días de curado - Testigo	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de falla
Testigo 1	375.58327	Tipo 3
Testigo 2	377.061864	Tipo 6
Testigo 3	364.947591	Tipo 6
Testigo 4	388.023854	Tipo 3
Testigo 5	349.284692	Tipo 3



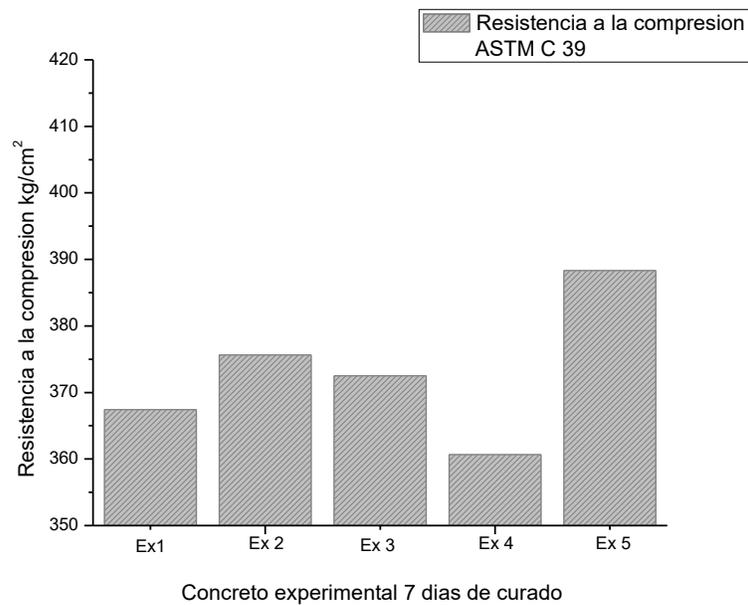
Gráfica 4.7 Resistencia a la compresión en concreto testigo

En los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión axial en cilindros experimentales con 7 días de curado en agua (Gráfica núm. 4.8), se obtuvo un valor máximo de 388.30 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo fue de 360.67 kg/cm<sup>2</sup>, valores que corresponden a un 38% y un 28% más de la resistencia de diseño.

Para las mezclas con 7 días de curado no se observa una diferencia notable entre el concreto experimental y el testigo para los valores máximos, sin embargo, existe una diferencia de poco más de 10 kg/cm<sup>2</sup> para los valores mínimos.

Tabla 4.13 Prueba de compresión axial en concreto experimental

Resistencia a la compresión		
7 días de curado - Experimental	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de falla
Experimental 1	367.42551	Tipo 3
Experimental 2	375.654651	Tipo 3
Experimental 3	372.493519	Tipo 3
Experimental 4	360.674964	Tipo 6
Experimental 5	388.309376	Tipo 3



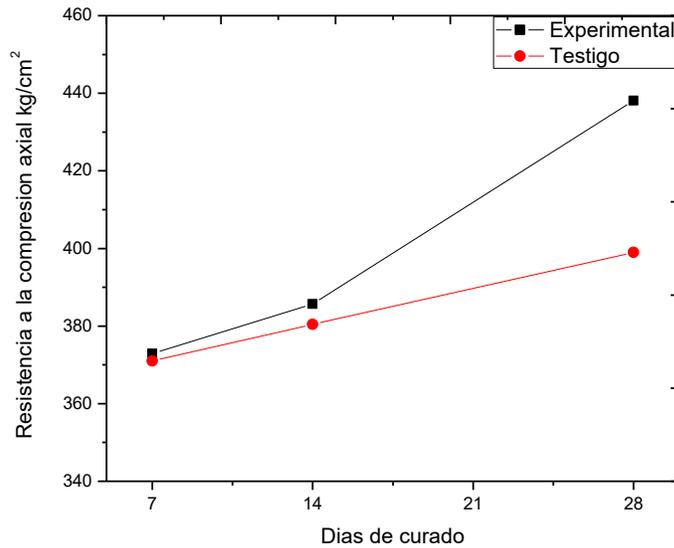
Gráfica 4.8 Resistencia a la compresión en concreto experimental

En la tabla núm. 4.14 se muestran los valores promedio para la prueba ASTM C 39 – C 39 Resistencia a la compresión axial. En las tres mezclas experimentales se aprecia una resistencia mayor que en las mezclas testigo, dicha diferencia aumenta en función del tiempo de curado de cada mezcla (Gráfica núm. 4.9)

El incremento en la fuerza a la compresión axial de los concretos con agregado impregnado con solución de silicato de sodio pudo ser dado por: (i) El silicato de sodio mejoró el desempeño mecánico del agregado grueso debido a que relleno los poros del mismo y propició la formación de cristales CH y  $\text{CaCO}_3$  en su interior. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en 2011 por Haoliang Huang y Guang Ye quienes reportaron mejoras en las propiedades mecánicas de un ECC con adición de silicato de sodio como agente para la auto reparación con más del 20% de recuperación de fuerza en comparación con las muestras sin silicato de sodio. (ii) El PVA mejoró las propiedades y el desempeño mecánico del agregado grueso debido a que impidió la fuga del silicato de sodio y a la vez relleno los poros exteriores de su estructura, esto sería consistente con los resultados reportados por Shi-Cong Kou en 2010 y con Mansur et al. en 2014 quienes concluyeron que la adición de PVA redujo la fragilidad de los poros en la zona de transición entre la pasta de cemento y los agregados (reciclados, para ese estudio).

Tabla 4.14 Resultados promedio de la prueba de compresión axial para cilindros testigo y experimentales

Tipo de mezcla	Resistencia a la compresión promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
Experimental 28 días de curado	438.09
Testigo 28 días de curado	398.97
Experimental 14 días de curado	385.65
Testigo 14 días de curado	380.44
Experimental 7 días de curado	372.91
Testigo 7 días de curado	370.98



**Gráfica 4.9 Comparación de la resistencia promedio para cilindros testigos y experimentales**

### 1.3.2 Determinación de absorción, densidad aparente y porosidad total

Algunas de las técnicas de medición cuantitativas de reparación de micro grietas en la matriz del concreto son las pruebas no destructivas de absorción, densidad y porosidad.

Las tablas 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 corresponden al concreto testigo y experimental curado por 28 días, de acuerdo a los valores obtenidos de peso seco al horno, peso saturado, peso saturado después de hervir y peso sumergido es que se llegó a los resultados de porosidad total, densidad total y absorción.

Para dichas pruebas se evaluaron cuatro cilindros por cada mezcla, bajo las mismas condiciones medioambientales. Con respecto a la porosidad el concreto testigo es un 3% más poroso que el experimental y su absorción es 2% mayor. Lo anterior indica que el concreto experimental aparte de ser más poroso su superficie es más permeable.

Tabla 4.15 Determinaciones en concreto testigo 28 días de curado

Concreto testigo a 28 días de curado					PROMEDIO
Determinación	T1	T2	T3	T4	
Porosidad total %	14	14.2857143	15.5405405	14.9659864	14.6980603
Densidad total	1.972789116	1.97916667	2.05	1.986111111	1.99701672
Absorción %	6.206896552	6.31578947	5.22648084	6.64335664	6.09813088

Tabla 4.16 Valores obtenidos en concreto testigo 28 días de curado

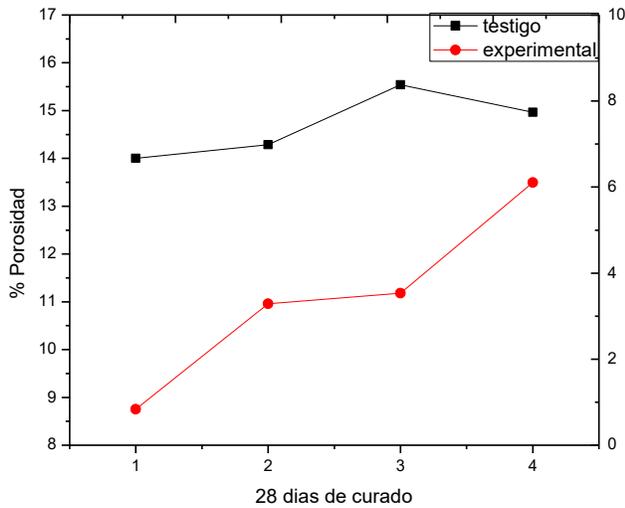
TES 28	Valores obtenidos (gramos)	T1	T2	T3	T4
A	Peso seco al horno	1450	1425	1435	1430
B	Peso saturado	1540	1515	1510	1525
C	Peso saturado, después de hervir	1555	1530	1550	1540
D	Peso sumergido	805	795	810	805

Tabla 4.17 Determinaciones en concreto experimental 28 días de curado

Concreto experimental a 28 días de curado					PROMEDIO
Determinación	EX1	EX2	EX3	EX4	
Porosidad total %	8.75	10.95890411	11.1801242	13.4969325	11.0964902
Densidad total	1.85350318	1.979310345	1.85806452	1.8164557	1.87683344
Absorción %	3.78006873	5.226480836	4.16666667	5.92334495	4.77414029

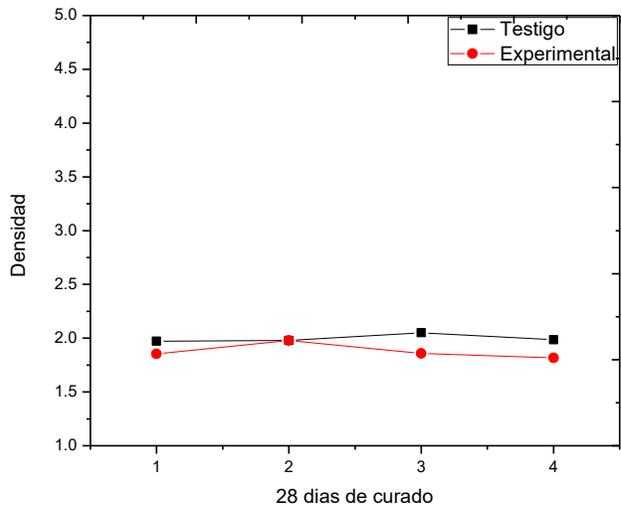
Tabla 4.18 Valores obtenidos en concreto testigo 28 días de curado

EX 28	Valores obtenidos (gramos)	EX1	EX2	EX3	EX4
A	Peso seco al horno	1455	1435	1440	1435
B	Peso saturado	1510	1510	1500	1520
C	Peso saturado, después de hervir	1525	1515	1530	1545
D	Peso sumergido	725	785	725	730

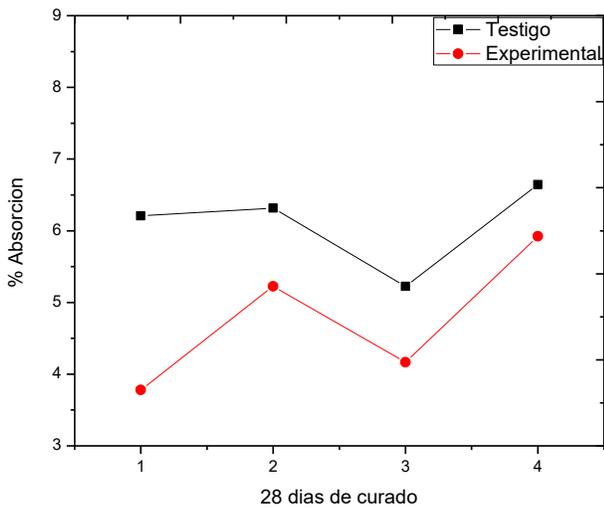


**Gráfica 4.10** Porcentaje de porosidad 28 días de curado

Para los valores de densidad total los datos varían de manera no representativa en ambos concretos. Quedando en un rango de 1.81 a 2.05 para las dos mezclas (Gráfica 4.11)



**Gráfica 4.11** Densidad total 28 días de curado



**Gráfica 4.12** Porcentaje de absorción 28 días de curado

En el concreto curado a 28 días se obtuvo una porosidad máxima del 13.49 % para el concreto experimental, para el concreto testigo fue de 15.54% (Gráfica 4.10)

En la prueba de absorción para el concreto testigo el valor máximo obtenido fue de 6.64 % mientras que para el concreto experimental fue de 5.92% (Gráfica 4.12)

Las tablas 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 corresponden a los valores y determinaciones realizadas al concreto testigo y experimental curado por 14 días.

En la prueba de porosidad existe una diferencia de poco más del 1% entre los dos concretos y del 4% entre el concreto experimental de 28 días de curado y el de 14 días, de tal modo que el porcentaje de porosidad disminuyó con respecto al tiempo.

La densidad es similar para ambos concretos y disminuye hasta .4 puntos con respecto a la densidad de los cilindros con 28 días de curado.

Con respecto a los porcentajes de absorción, varía poco menos del 1% entre el concreto testigo y el experimental y con respecto al de 28 días de curado este valor permanece casi igual variando menos del 1%.

**Tabla 4.19 Determinaciones en concreto testigo 14 días de curado**

Concreto testigo a 14 días de curado					PROMEDIO
Determinación	T1	T2	T3	T4	
Porosidad total	5.20231214	6.7961165	7.10382514	4.46927374	5.89288188
Densidad total	1.57692308	1.4097561	1.57065217	1.56451613	1.53046187
Absorción	6.271777	4.4982699	4.84429066	5.15463918	5.19224418

**Tabla 4.20 Valores obtenidos en concreto testigo 14 días de curado**

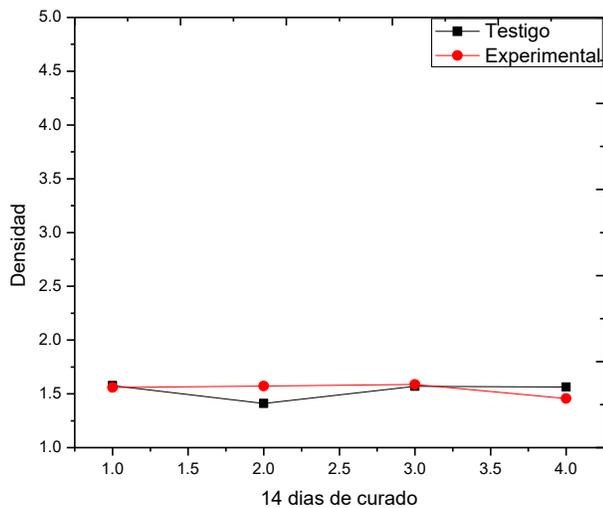
TES 14	Valores obtenidos (gramos)	T1	T2	T3	T4
A	Peso seco al horno	1435	1445	1445	1455
B	Peso saturado	1525	1510	1515	1530
C	Peso saturado, después de hervir	1480	1515	1510	1495
D	Peso sumergido	615	485	595	600

Tabla 4.21 Determinaciones en concreto experimental 14 días de curado

Concreto experimental a 14 días de curado					PROMEDIO
Determinación	EX1	EX2	EX3	EX4	
Porosidad total %	7.65027322	5.94594595	6.66666667	7.53768844	6.95014357
Densidad total	1.55978261	1.57297297	1.58791209	1.45685279	1.54438012
Absorción %	5.22648084	3.78006873	4.84429066	4.52961672	4.59511424

Tabla 4.22 Valores obtenidos en concreto testigo 14 días de curado

EX 14	Valores obtenidos (gramos)	EX1	EX2	EX3	EX4
A	Peso seco al horno	1435	1455	1445	1435
B	Peso saturado	1510	1510	1515	1500
C	Peso saturado, después de hervir	1505	1510	1505	1510
D	Peso sumergido	590	585	605	515

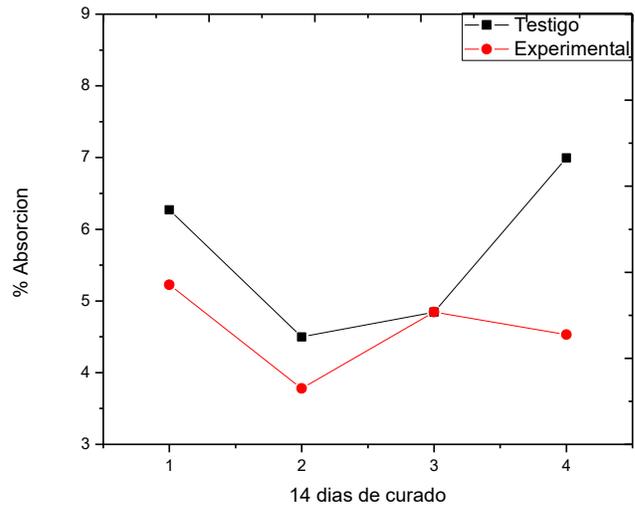


Gráfica 4.13 Densidad total 14 días de curado

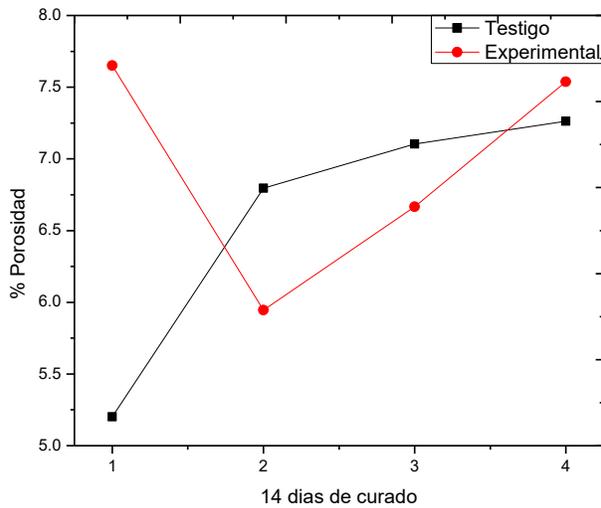
Para los valores de densidad total los resultados varían de manera no representativa en ambos concretos. Quedando en un rango de 1.40 a 1.58 para las dos mezclas (Gráfica 4.13), valores que son menores al rango inferior de la densidad obtenida a los 28 días de curado, es decir, la densidad aumentó en función del tiempo.

## Capítulo 4. Resultados y discusiones

En el concreto curado a 14 días se obtuvo una absorción máxima del 5.22 % para el concreto experimental, para el concreto testigo fue de 6.27% (Gráfica 4.15)



**Gráfica 4.14** Porcentaje de absorción 14 días de curado



**Gráfica 4.15** Porcentaje de porosidad 14 días de curado

En el concreto curado a 14 días se obtuvo una porosidad máxima del 7.65 % para el concreto experimental, para el concreto testigo fue de 7.10% (Gráfica 4.15)

Finalmente, para las pruebas de densidad, porosidad y absorción de los cilindros curados a 7 días, se obtuvo una diferencia de más del 3% en porosidad y poco más de 1% en absorción entre ambos concretos (Tablas 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26)

De acuerdo a la hipótesis planteada, las propiedades del concreto se verían beneficiadas con la solución de silicato de sodio y el PVA, demostrando así que el porcentaje de porosidad sí disminuyó en el concreto experimental en función del tiempo, los porcentajes de densidad son similares en los tres tiempos de curado, sin embargo, aunque el porcentaje de absorción incrementa, éste es mayor en el concreto testigo

**Tabla 4.23 Determinaciones para el concreto testigo con 7 días de curado**

Concreto testigo a 7 días de curado					PROMEDIO
Determinación	T1	T2	T3	T4	
Porosidad total %	12.5	9.63302752	11.7021277	11.4427861	11.3194853
Densidad total	1.47120419	1.29357798	1.52688172	1.45177665	1.43586014
Absorción %	8.18505338	7.44680851	7.04225352	6.64335664	7.32936801

**Tabla 4.24 Valores obtenidos en concreto testigo con 7 días de curado**

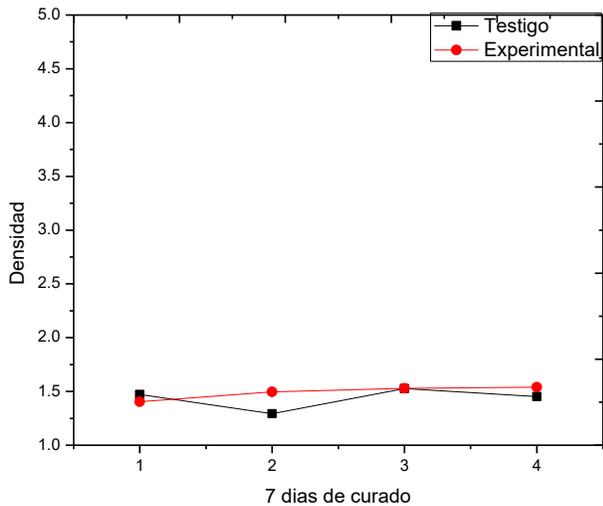
TES 7	Valores obtenidos (gramos)	T1	T2	T3	T4
A	Peso seco al horno	1405	1410	1420	1430
B	Peso saturado	1520	1515	1520	1525
C	Peso saturado, después de hervir	1525	1515	1530	1545
D	Peso sumergido	565	425	590	540

**Tabla 4.25** Determinaciones para el concreto testigo con 7 días de curado

Concreto experimental a 7 días de curado					PROMEDIO
Determinación	EX1	EX2	EX3	EX4	
Porosidad total %	9.85221675	6.95187166	9.13978495	9.57446809	8.87958536
Densidad total	1.40394089	1.49484536	1.52910053	1.53968254	1.49189233
Absorción %	7.01754386	6.89655172	6.92041522	6.52920962	6.84093011

**Tabla 4.26** Valores obtenidos en concreto testigo con 7 días de curado

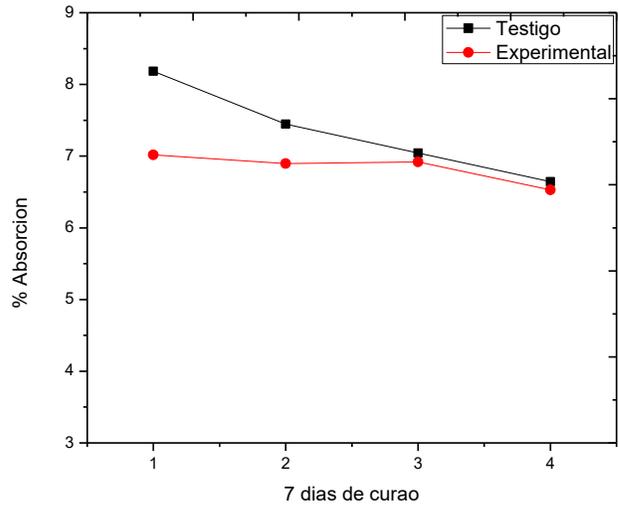
EX 7	Valores obtenidos (gramos)	EX1	EX2	EX3	EX4
A	Peso seco al horno	1425	1450	1445	1455
B	Peso saturado	1525	1550	1545	1550
C	Peso saturado, después de hervir	1525	1515	1530	1545
D	Peso sumergido	510	580	600	605



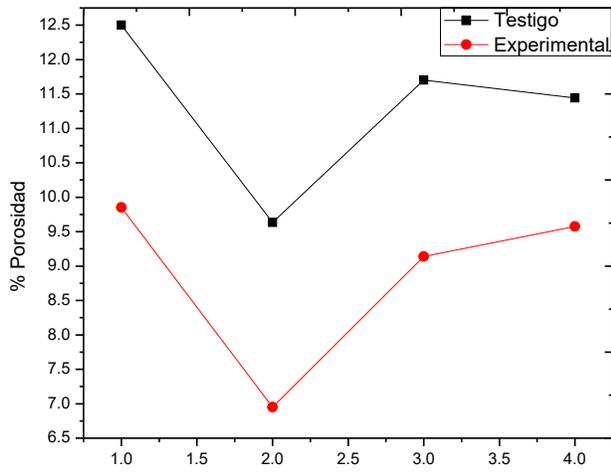
**Gráfica 4.16** Densidad total 7 días de curado

Para los valores de densidad total los resultados varían de manera no representativa en ambos concretos y en relación con los valores de densidad para el concreto curado a 14 días (Gráfica 4.16),

En la prueba de absorción para el concreto testigo el valor máximo obtenido fue de 8.18 % mientras que para el concreto experimental fue de 7.01% (Gráfica 4.17).



Gráfica 4.17 Porcentaje de absorción total 7 días de curado

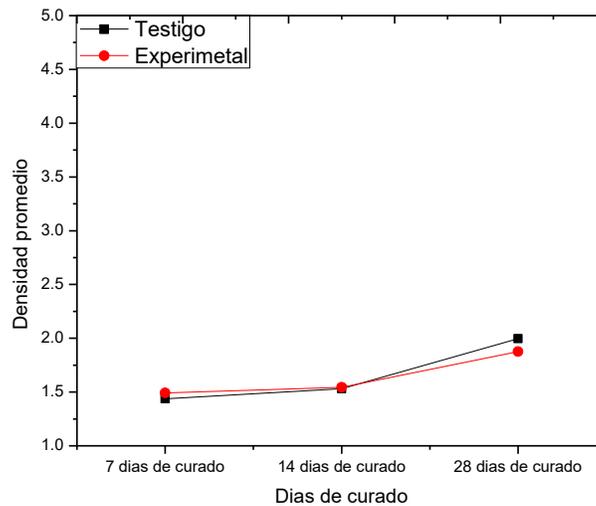


Gráfica 4.18 Porcentaje de porosidad 7 días de curado

### Densidad total promedio

Para los valores obtenidos en la prueba de densidad se observa que tanto el concreto experimental como testigo, entran en el rango  $\geq 2.25$  que de acuerdo a Cerón, (Cerón, M.; Duarte, F.; Castillo, 1996) es una densidad óptima por lo que factores como la resistencia a la compresión se ven favorecidos.

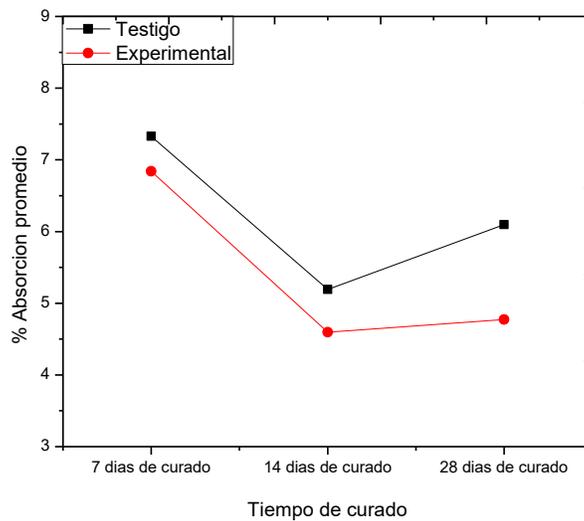
Se puede concluir por lo tanto que el silicato de sodio y el PVA no afectaron la densidad del concreto de manera significativa.



**Gráfica 4. 19 Densidad total promedio para cilindros experimentales y testigo en tres tiempos de curado**

### Absorción promedio

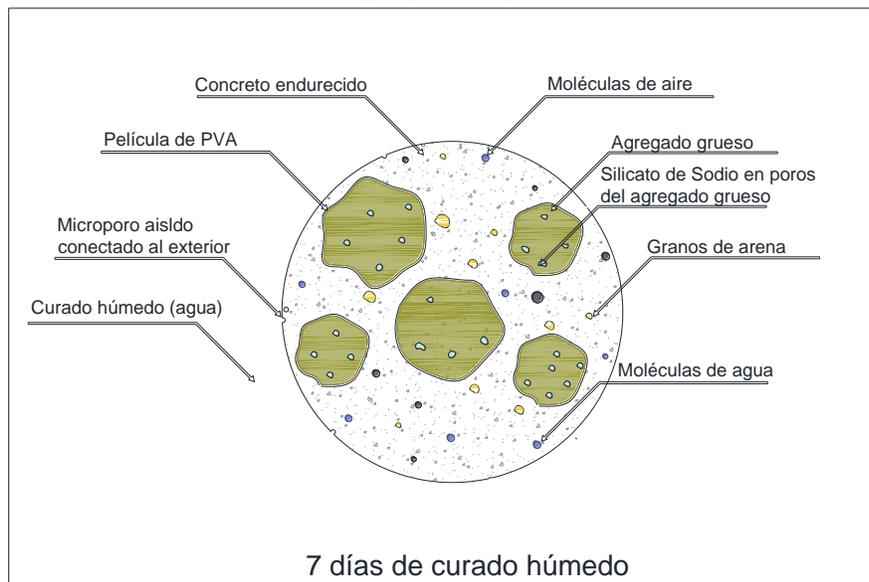
La absorción es el proceso por el cual un material es sumergido en agua y ésta tiende a penetrar y llenar sus poros permeables, lo que origina un aumento en la masa de dicho material (ASTM C 125-03, 2005), en éste caso las probetas de concreto. El incremento del peso de la masa tiende a ser mayor en cuanto mayor es el número de poros aislados e interconectados al interior de la matriz del cemento. En la gráfica 4.20 se observa un porcentaje de absorción que tiende a disminuir de los 7 a los 14 días de curado y posteriormente incrementa a los 28 días de curado, sin embargo, es más evidente su aumento en el concreto testigo. Esto puede ser debido a que en el concreto experimental, por acción del silicato de sodio y el PVA se ha incrementado la cantidad de cristales de hidratación que rellenan las micro-grietas y micro-poros que se forman al inicio del fraguado en el concreto por la contracción plástica que sufre.



**Gráfica 4.20** Porcentaje de absorción promedio para cilindros experimentales y testigo con tres tiempos de curado

**Porosidad promedio**

Para los resultados de absorción promedio entre el concreto experimental y el concreto testigo (Gráfica 4.21) se observa una diferencia de hasta 4% más porosidad para el concreto testigo, datos que concuerdan con los resultados obtenidos por Jae-Ho Kim et al. Quienes reportan que la zona de transición porosa entre la pasta de cemento y la grava y arena fue reducida en número y tamaño (de poros) por acción del PVA, lo cual redujo el porcentaje de porosidad. La tendencia de ambos concretos en disminuir su porosidad a los 14 días e incrementarla a los 28 días puede ser debido a que tan pronto como el concreto comienza a endurecer, a los 7 días comienza la formación interna de poros y huecos, en éste momento el concreto aún no ha alcanzado su resistencia máxima y existe gran cantidad de cemento sin reaccionar (Figura 4a), a los 14 días el concreto ha disminuido su porosidad por la cristalización del cemento ocupando poros de aire al interior y exterior (Figura 4b), a los 28 días la solución de silicato de sodio comienza a liberarse, y dado que se considera un compuesto hidrófilo, comienza a atraer partículas de agua, creando así canales por los cuales se interconectan con los agregados gruesos y los micro-poros del exterior (Figura 4c). El enunciado expuesto anteriormente respalda los resultados de las pruebas mecánicas, pues para los cilindros con 28 días de curado, se obtuvo una mayor diferencia entre el resultado promedio experimental y el testigo, asumiendo por tanto que el silicato de sodio potencio la resistencia de los agregados y por tanto del concreto.



**Figura 4a Esquema del proceso de curado húmedo en un cilindro experimental**

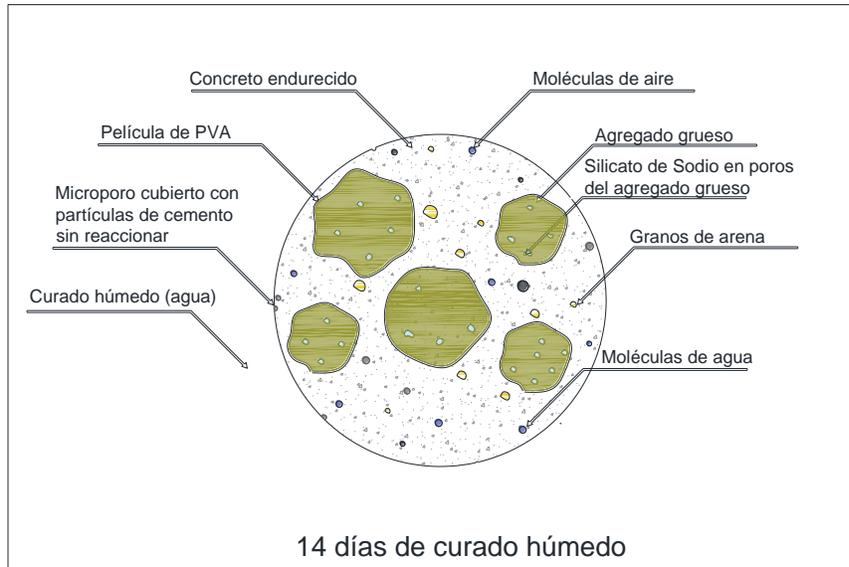


Figura 4b Esquema del proceso de curado húmedo en un cilindro experimental

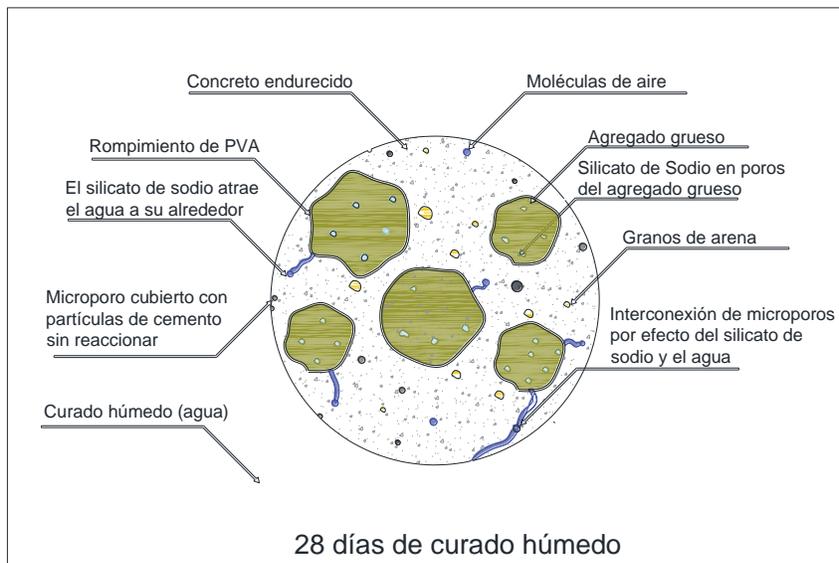
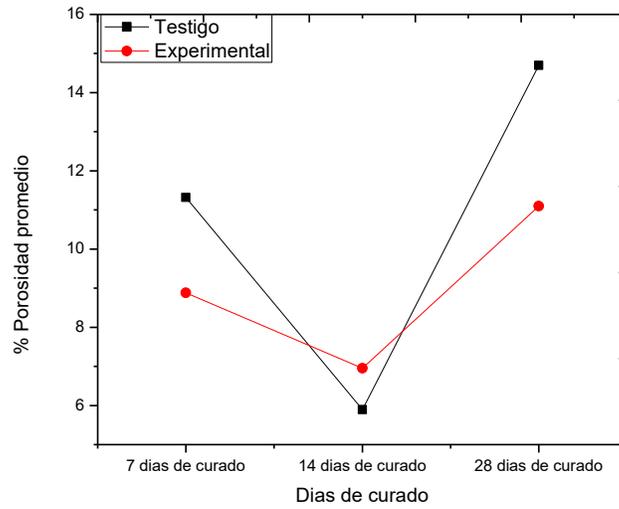


Figura 4c Esquema del proceso de curado húmedo en un cilindro experimental

La gráfica obtenida y las imágenes del SEM pueden ser comparadas para respaldar la diferencia de porosidad entre el concreto testigo y experimental.



Gráfica 4.21 Porcentaje de porosidad promedio de cilindros experimentales y testigo con tres tiempos de curado

## Auto reparación

### Prueba de dureza de Vickers

Para los ensayos realizados con el indentador Vickers, se evaluó la dureza de una preparación para los 28, 14 y 7 días de curado de concreto experimental y una de 28 días de curado de concreto testigo respectivamente, en cada muestra se llevaron a cabo en promedio cuatro indentaciones en diferentes partes de la misma hasta obtener la huella deseada para el monitoreo.

Los resultados de dureza varían de  $Hv=27.6$  hasta  $Hv=228$ , esta diferencia de durezas está dada por la región en la cual se aplicó la carga, pues algunas regiones pertenecían a la pasta cementante (Concreto experimental de 14 días de curado) o entre el agregado grueso y la pasta cementante (Concreto testigo de 28 días de curado)

Mezcla de concreto experimental 28 días de curado	
No. Marca	Dureza (Hv)
1	59.5
2	37.9
3	35.2
4	44.7

Mezcla de concreto testigo 28 días de curado	
No. Marca	Dureza (Hv)
1	27.6
2	46.3
3	43
4	36.2

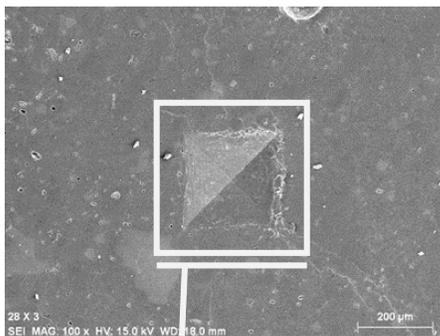


Figura 4.1 Prueba de dureza Vickers en concreto experimental curado por 28 días.

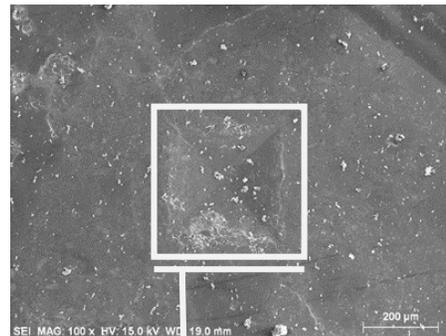


Figura 4.2 c

Mezcla de concreto experimental 14 días de curado	
No. Marca	Dureza (Hv)
1	149.6
2	171.5
3	129.4
4	228.5

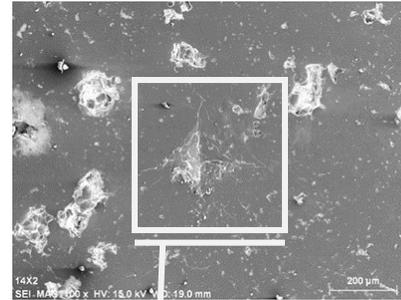


Figura 4.3 Prueba de dureza Vickers en concreto experimental curado por 14 días.

Mezcla de concreto experimental 7 días de curado	
No. Marca	Dureza (Hv)
1	42.8
2	208.1
3	43.2
4	36.5

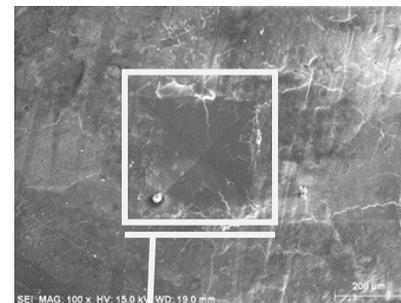


Figura 4.4 Prueba de dureza Vickers en concreto experimental curado por 7 días.

### Monitoreo del proceso de Auto Reparación

Con el propósito de monitorear el proceso de auto reparación en el concreto, se seleccionaron dos muestras por cada tiempo de curado en el concreto experimental y una en el concreto testigo. Se llevó a cabo la indentación y se seleccionó una huella de indentación, mediante el uso del microscopio electrónico de barrido se observaron dichas huellas y el agrietamiento provocado, en ampliaciones de 100x, 500x, 1000x, 5000x, 10 000x y 40 000x.

Las tablas presentadas en ésta sección indican las medidas obtenidas en cada huella. Para la ampliación 100x se considera el área de la huella, para las ampliaciones de 500x a 5 000x se considera la longitud de la grieta, para las ampliaciones 10 000x y 40 000x, se mide el ancho promedio de la grieta en micrómetros y nanómetros respectivamente.

Las muestras fueron evaluadas en cuatro fechas, las cuales corresponden a la fecha en que se provocó el agrietamiento a los 14 días posteriores, a los 28 días y finalmente a los 90 días. Durante el periodo del monitoreo las muestras se resguardaron en un desecador de sílica a condiciones normales de humedad y temperatura del laboratorio de cerámicos en la UMICHSNH.

En cada fecha se desecaron y metalizaron las muestras con cobre, éste es inerte a la reacción del proceso de auto-reparación y no perjudica las muestras.

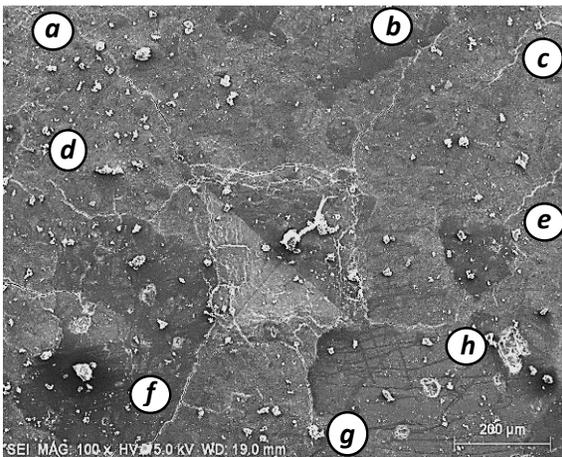
Es importante mencionar que la segunda muestra de 14 días de curado no pudo ser monitoreada debido a causas ajenas a la investigación, por lo que la información presentada corresponde a una única muestra.

**7 días de curado (Muestra Núm. 1)**

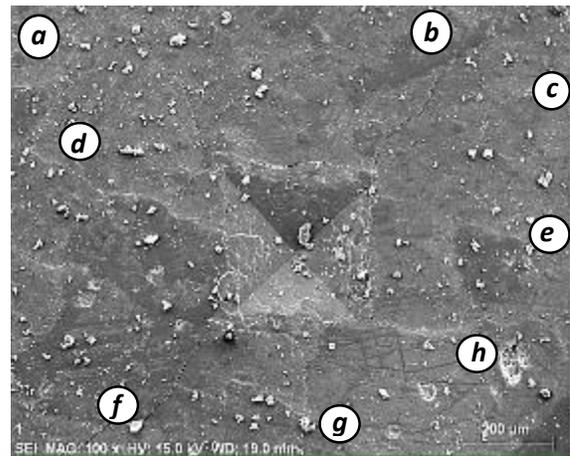
La figura 4.5 representa la huella generada en el concreto de 7 días de curado mediante la prueba Vickers en el primer monitoreo, la figura 4.6 corresponde al cuarto monitoreo.

En la tabla 4.27 se registran las longitudes obtenidas en el agrietamiento inducido en un concreto experimental curado por 7 días. En las grietas **a**, **d** y **g** se observa una disminución en longitud de hasta 196  $\mu\text{m}$ . Las grietas **c** y **e** dejan de observarse en el cuarto monitoreo, por lo que se presume se han reparado.

La huella aquí mostrada fue generada en la zona más cercana al agregado grueso, sin embargo, por la preparación de la muestra, no se aprecia la diferencia entre el agregado y la pasta cementante, pero dado que el agregado es quien transporta la solución de silicato de sodio se puede decir que al aplicar la fuerza para generar la huella se propició la liberación de la solución, es por ello que la reparación se produjo aunque el concreto tuviera solamente 7 días de curado y por tanto la liberación no se dió naturalmente, como se esquematizó en las pruebas de porosidad.



**Figura 4.5** Huella en concreto curado por 7 días – PRIMER MONITOREO



**Figura 4.6** Huella en concreto curado por 7 días – CUARTO MONITOREO

Tabla 4.27 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento

Identificación	Longitud aparente ( $\mu\text{m}$ )	
	1° monitoreo	4° Monitoreo
a	376	180
b	393	393
c	157	se repara
d	348	322
e	177	se repara
f	312	313
g	193	181
h	223	222
Promedio	272.375	201.375

Las tablas 4.28 y 4.29 corresponden al primer y cuarto monitoreo general del concreto experimental curado por siete días. El crecimiento corresponde a la grieta indicada con la letra f.

Tabla 4.28 Primer monitoreo - 7 EXP

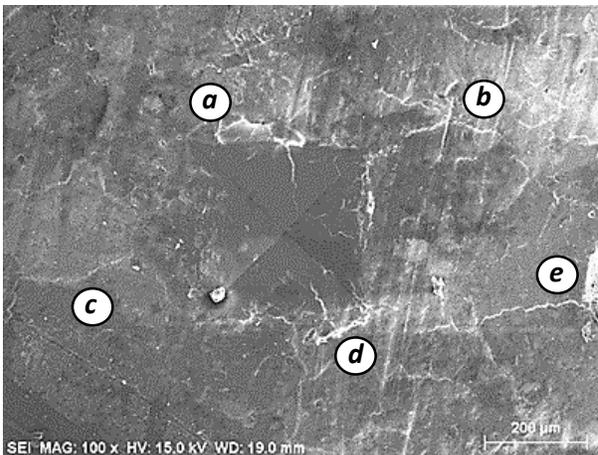
Diseño experimental, 7 días de curado		
1° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta (longitud/área)	
25 x	s/e	$\mu\text{m}$
100 x	12029	$\mu\text{m}^2$
500x	148.05	$\mu\text{m}$
1000 x	19.536	$\mu\text{m}$
5000 x	30.2	$\mu\text{m}$
10 000 x	0.4555	$\mu\text{m}$
40 000 x	389.925	nm

Tabla 4.29 Cuarto monitoreo – 7 EXP

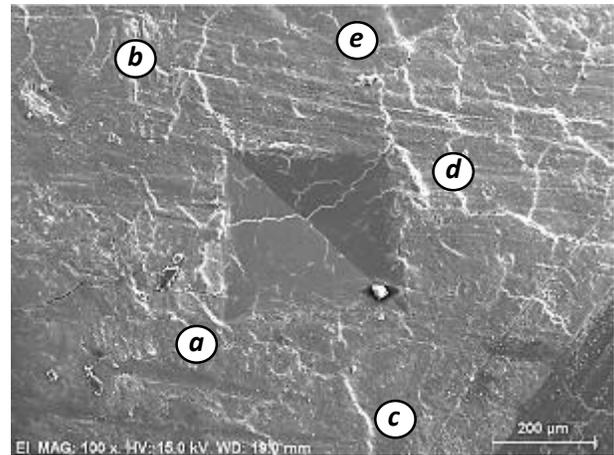
Diseño experimental, 7 días de curado		
4° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	$\mu\text{m}$
100 x	s/e	$\mu\text{m}^2$
500x	159.07	$\mu\text{m}$
1000 x	24.0525	$\mu\text{m}$
5000 x	27.22	$\mu\text{m}$
10 000 x	0.591	$\mu\text{m}$
40 000 x	496.45	nm

**7 Días de curado (Muestra Núm. 2)**

Las figuras 4.7 y 4.8 corresponden al monitoreo de la segunda muestra de concreto curado por 7 días, en ellas se identificaron siete agrietamientos representativos, en la marca **c** se observa la mayor disminución con 64  $\mu\text{m}$  con respecto a la longitud, sin embargo, así como se presenta una disminución en tres puntos, se observa la aparición de nuevas grietas al interior y en la periferia de la huella. Para este tiempo de curado se presume que aún no hay liberación de solución de silicato de sodio.



**Figura 4.7** Huella en concreto curado por 7 días – PRIMER MONITOREO



**Figura 4.8** Huella en concreto curado por 7 días – CUARTO MONITOREO

**Tabla 4.30** Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento

Identificación	Longitud aparente ( $\mu\text{m}$ )	
	1° monitoreo	4° Monitoreo
a	123	109
b	184	166
c	230	156
d	156	281
e	202	0
Promedio	179	142.4

Las tablas 4.31 y 4.32 corresponden al primer y cuarto monitoreo para una muestra de concreto curado por 7 días. En la amplificación 10 000x se observa una disminución del 99% con respecto a la huella inicial, ésta grieta corresponde a la identificada con la letra e en las figuras anteriores.

Tabla 4.31 Primer monitoreo - 7 EXP

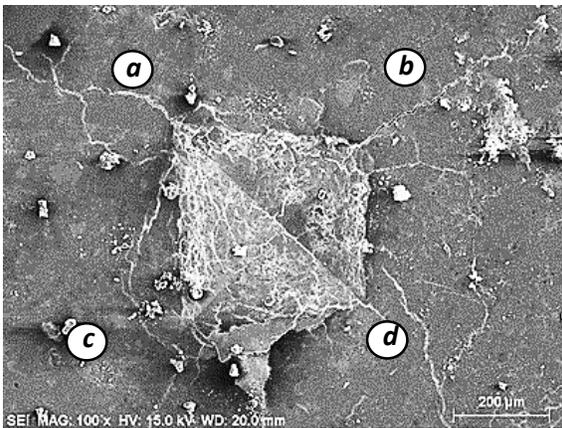
Diseño experimental, 7 días de curado		
1° Visualización		
Muestra 2		
Aumento	Tamaño promedio de grieta (longitud/área)	
25 x	s/e	µm
100 x	869.25	µm <sup>2</sup>
500x	26.36333333	µm
1000 x	21.782	µm
5000 x	8.715	µm
10 000 x	14.43	µm
40 000 x	128.5	nm

Tabla 4.32 Cuarto monitoreo - 7 EXP

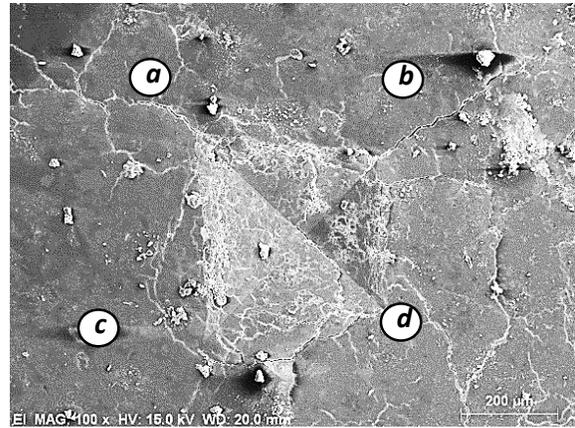
Diseño experimental, 7 días de curado		
4° Visualización		
Muestra 2		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	µm
100 x	s/e	µm <sup>2</sup>
500x	25.79333333	µm
1000 x	22.636	µm
5000 x	10.51666667	µm
10 000 x	0.0373	µm
40 000 x	161.425	nm

**14 días de curado (Muestra Núm. 1)**

Las figuras 4.9 y 4.10 son representativas del primer y cuarto monitoreo efectuado a una muestra de concreto curado por 14 días. En éstas imágenes se puede apreciar un aparente desvanecimiento del agrietamiento al interior de la huella, resultando más evidente en ésta zona que en la periferia de la misma huella. En la grieta indicada con la letra **d** se observa una disminución de longitud del 4% entre el primer y cuarto monitoreo.



**Figura 4.9 Huella en concreto curado por 14 días – PRIMER MONITOREO**



**Figura 4.10 Huella en concreto curado por 14 días – CUARTO MONITOREO**

**Tabla 4.33 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento**

Identificación	Longitud aparente ( $\mu\text{m}$ )	
	1° monitoreo	4° Monitoreo
a	208	212
b	362	366
c	363	367
d	326	314
Promedio	314.75	314.75

En las tablas 4.34 y 4.35 se indican las longitudes y anchos de grietas obtenidos en una muestra de concreto curado por 14 días en la primera y cuarta visualización en el

MEB, a excepción de la última magnificación que incrementa en un 4%, las demás magnificaciones muestran una disminución, principalmente en la longitud determinada a 10 000x con una reducción del 96%.

Tabla 4.34 Primer monitoreo 14 - EXP

Diseño experimental, 14 días de curado		
1° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta (longitud/área)	
25 x	s/e	µm
100 x	s/e	µm <sup>2</sup>
500x	30.245	µm
1000 x	35.7725	µm
5000 x	29.3	µm
10 000 x	0.4555	µm
40 000 x	86.65	nm

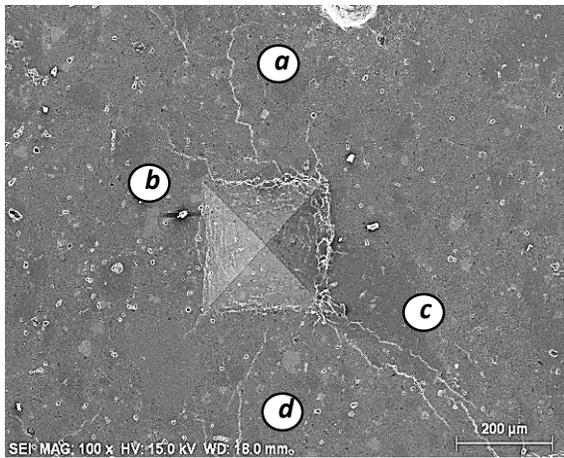
Tabla 4.35 Cuarto monitoreo 14 -EXP

Diseño experimental, 14 días de curado		
4° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	µm
100 x	s/e	µm <sup>2</sup>
500x	26.2275	µm
1000 x	35.4275	µm
5000 x	25.7	µm
10 000 x	0.0183	µm
40 000 x	90.075	nm

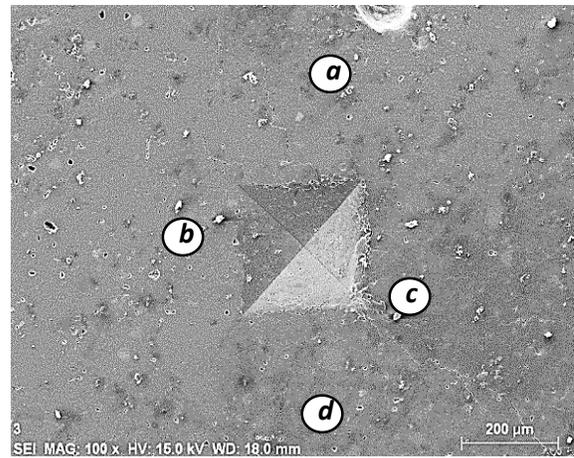
**28 días de curado (Muestra Núm. 1)**

En las figuras 4.11 y 4.12 se indicaron cuatro grietas representativas en la periferia de una huella generada. A excepción de la indicada con la letra **c**, el desvanecimiento de las grietas es evidente, incluso en el contorno de la misma huella.

Ésta imagen que corresponde al concreto curado por 28 días es la obtenida en una huella generada en la zona cercana al agregado grueso, que aún no es la ITZ, por lo que es presumible que la liberación del silicato de sodio ocurrió entre los 14 y 28 días de curado y que ya estando en la pasta cementante comenzó a reaccionar.



**Figura 4.11** Huella en concreto curado por 28 días – PRIMER MONITOREO



**Figura 4.12** Huella en concreto curado por 28 días – CUARTO MONITOREO

**Tabla 4.36** Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento

Identificación	Longitud aparente (µm)	
	1º monitoreo	4º Monitoreo
a	237	se repara
b	156	se repara
c	270	se repara
d	339	se repara
Promedio	250.5	0

Las tablas expuestas a continuación muestran el seguimiento dado a la grieta cercana a la anteriormente indicada con la letra **c**, la cual es la única que se alcanza a percibir.

En esta grieta se observa una disminución del 56% con respecto a la primera longitud determinada en la amplificación 40 000x.

Tabla 4.37 Primer monitoreo 28 - EXP

Diseño experimental, 28 días de curado		
1° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	µm
100 x	674.5	µm <sup>2</sup>
500x	81.41666667	µm
1000 x	92.42	µm
5000 x	14.315	µm
10 000 x	0.001045	µm
40 000 x	98.37	nm

Tabla 4.38 Cuarto monitoreo 28 - EXP

Diseño experimental, 28 días de curado		
4° Visualización		
Muestra 1		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	µm
100 x	643	µm <sup>2</sup>
500x	76.31	µm
1000 x	81.85	µm
5000 x	13.415	µm
10 000 x	0.000530255	µm
40 000 x	53.65	nm

### 28 Días de curado (Muestra Núm. 2)

Las figuras 4.13 y 4.14 representan una ampliación de 40 000x en una grieta de concreto curado durante 28 días. Ésta grieta se visualizó en la parte última, en donde se esperaba se encontraría la mayor cantidad de producto de hidratación reparándola, sin embargo, se puede observar que las grietas se repararon en grosor, disminuyendo hasta un 44% y no en longitud (Tabla 4.39)

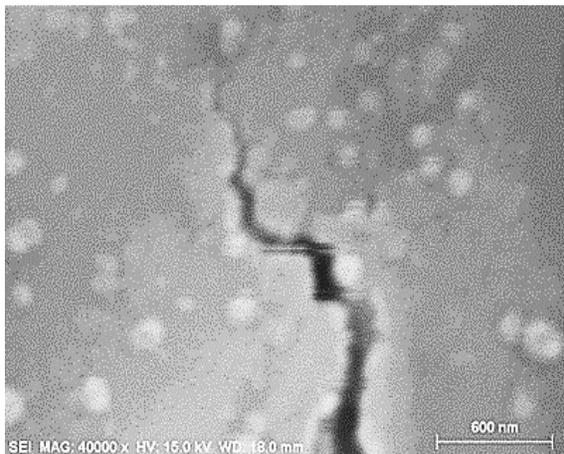


Figura 4.13 Huella en concreto curado por 28 días – PRIMER MONITOREO

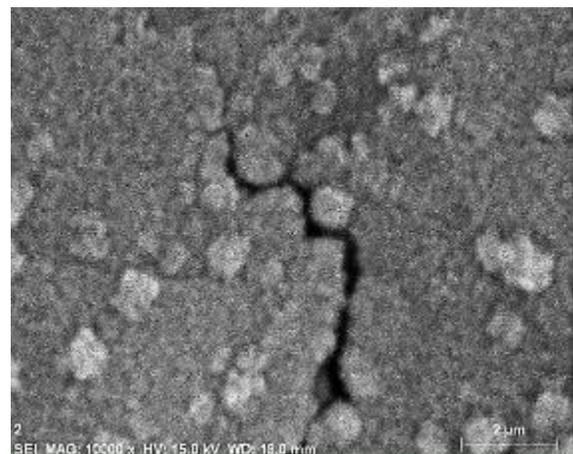


Figura 4.14 Huella en concreto curado por 28 días – CUARTO MONITOREO

Tabla 4.39 Comparación entre el primer y cuarto monitoreo en agrietamiento

Identificación	Longitud aparente ( $\mu\text{m}$ )	
	1° monitoreo	4° Monitoreo
a	77	63
b	124	79
c	105	65
d	145	91
Promedio	112.75	74.5

Tabla 4.35 Primer monitoreo 28 - EXP

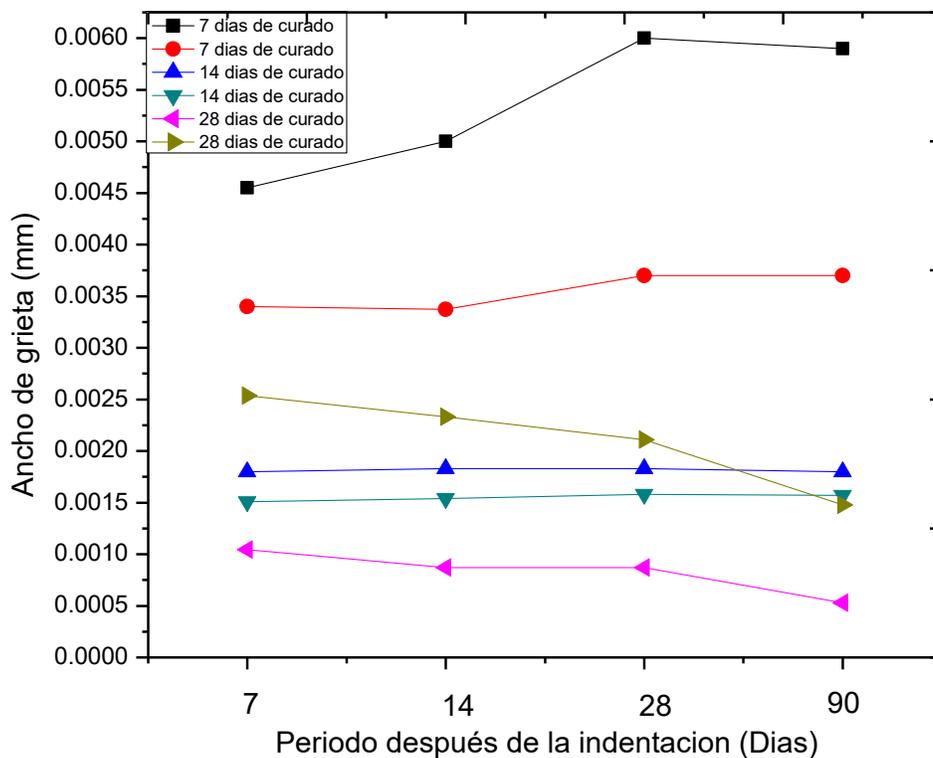
Diseño experimental, 28 días de curado		
1° Visualización		
Muestra 2		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	$\mu\text{m}$
100 x	1202.34	$\mu\text{m}^2$
500x	39.92666667	$\mu\text{m}$
1000 x	21.782	$\mu\text{m}$
5000 x	s/e	$\mu\text{m}$
10 000 x	0.0025375	$\mu\text{m}$
40 000 x	98.625	nm

Tabla 4.36 Cuarto monitoreo 28 - EXP

Diseño experimental, 28 días de curado		
4° Visualización		
Muestra 2		
Aumento	Tamaño promedio de grieta	
25 x	s/e	$\mu\text{m}$
100 x	958.13	$\mu\text{m}^2$
500x	39.92666667	$\mu\text{m}$
1000 x	21.782	$\mu\text{m}$
5000 x	s/e	$\mu\text{m}$
10 000 x	0.00147775	$\mu\text{m}$
40 000 x	30.3275	nm

La gráfica 4.22 corresponde al monitoreo efectuado al concreto experimental. Para cada tiempo de curado se monitorearon dos muestras, a un aumento de 10 000x se observa una grieta máxima de .0060 micrómetros para el concreto experimental de siete días. En función del tiempo se observa un agrietamiento menor, considerando que el agrietamiento fue inducido con la misma carga para todas las muestras.

Si se comparan éstos valores de agrietamiento con los resultados de la prueba mecánica a compresión axial se puede ver una significancia conforme avanza el proceso de hidratación del cemento, pues a medida que la resistencia aumenta, el tamaño de grietas que se generan en el concreto es menor, como se observa en ésta gráfica presentada.

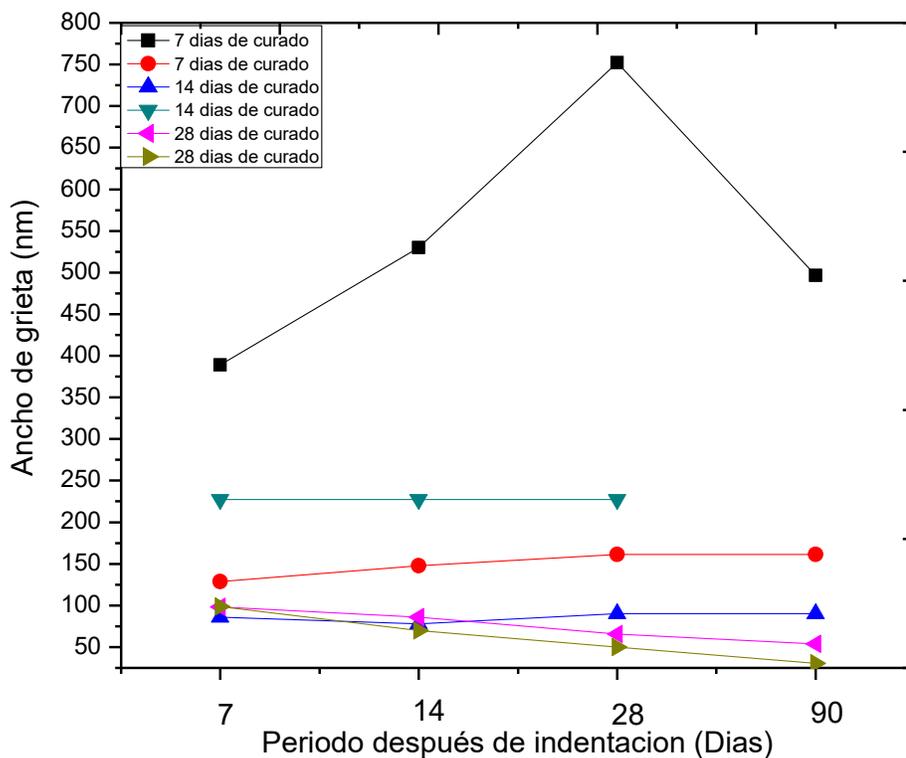


Gráfica 4.22 Ancho promedio de grieta en concreto curado a diferentes tiempos

La gráfica 4.23 corresponde al monitoreo mencionado con anterioridad, sin embargo, éste es a 40 000 X de magnificación.

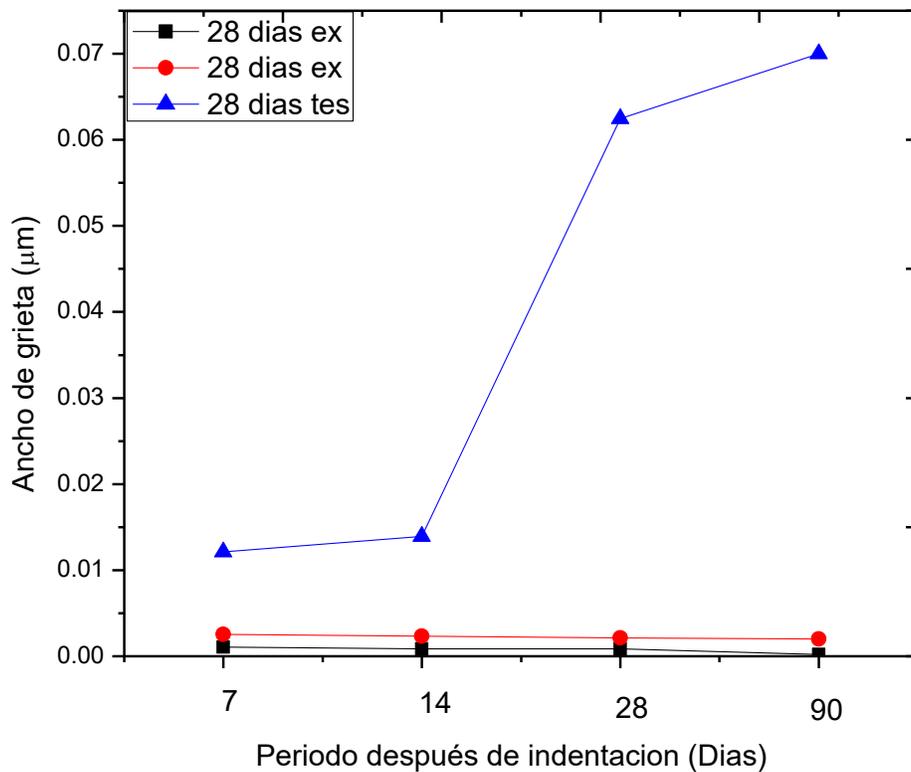
En ésta gráfica se observa la tendencia de la mitad de las muestras a disminuir en tamaño el agrietamiento, éstas mezclas corresponden al concreto curado por más tiempo. Para la primera muestra curada a los 28 días se observa una disminución del 50% en relación con la primera medida registrada.

Para la segunda muestra curada a los 28 días se observa una disminución de más del 30% en relación con el primer dato obtenido de longitud.



Gráfica 4.23 Ancho promedio de grieta en concreto curado a diferentes tiempos

Para las muestras de concreto testigo y experimental curadas a 28 días se graficó el ancho promedio de las grietas generadas, para el concreto experimental se obtuvieron grietas con un valor máximo de menos de 0.05 nm y una disminución de la misma en función del tiempo de más del 50%, para el concreto testigo, el ancho promedio de grieta es más del 100% mayor al inicio del monitoreo y crece hasta un 700% más en relación con la longitud inicial.



Gráfica 4.24 Ancho promedio de grieta en concreto testigo y experimental curado a 28 días

### **Resultados de la visualización en el Microscopio Electrónico de Barrido**

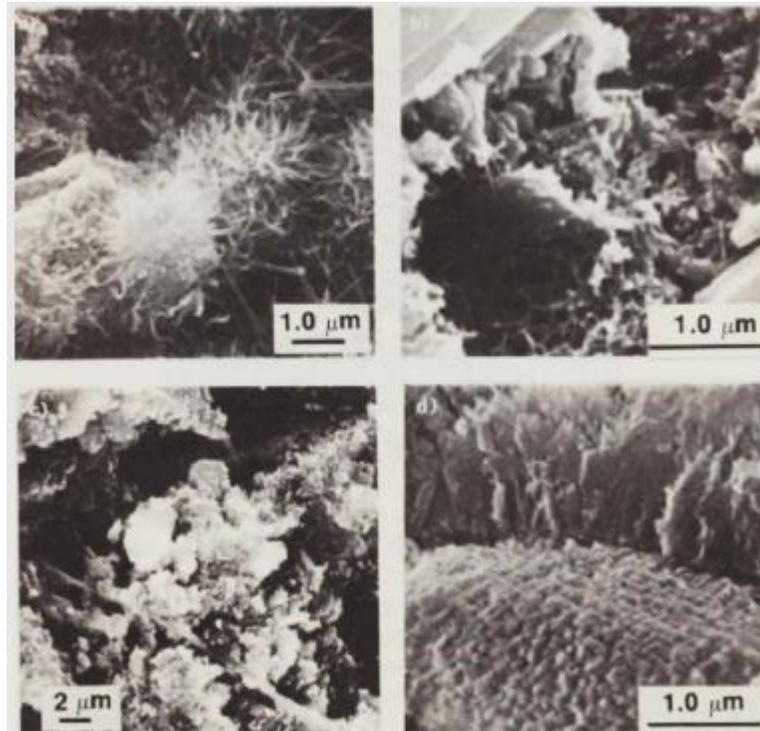
El análisis microscópico es utilizado para determinar el tamaño y la morfología de los agentes reparadores. De esta manera, la información sobre la superficie de los materiales puede ser visualizada.

El MEB combinado con el EDS es una técnica común para estudiar las propiedades de un agente de reparación a una micro escala y permite estudiar, además, la morfología, tamaño y forma de los agentes reparadores (Snoeck et al., 2018).

Un Microscopio Electrónico de Barrido o MEB es un tipo de microscopio electrónico que arroja las imágenes de una muestra mediante el escaneo con un haz de electrones de alta energía en un patrón de escaneo ráster, el MEB revela niveles de detalle y complejidad incapaces de observar con un microscopio óptico. Los electrones interactúan con los átomos de la muestra, produciendo señales que contienen información sobre la topografía de la superficie de la muestra, la composición y otras propiedades como la conductividad eléctrica.

El SEM puede producir imágenes de resolución muy alta de la superficie de una muestra, que revela detalles de menos de 1 a 5 nm de tamaño. Para obtener imágenes las muestras deben estar secas y recubiertas con oro o carbono (para ser eléctricamente conductoras).

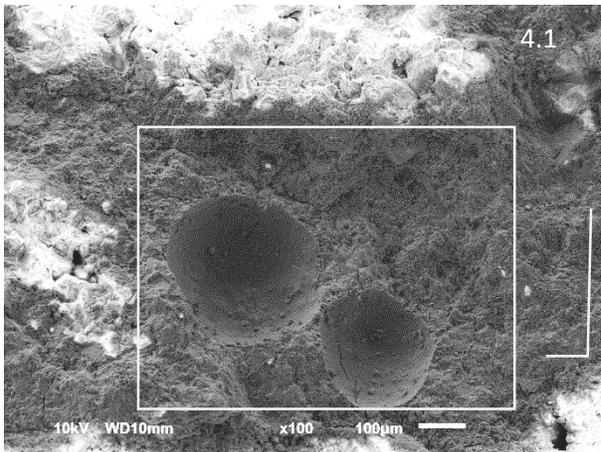
La imagen muestra la morfología del gel C-S-H, que para éste estudio es importante localizar.



(Blanco, 2013.)

Las siguientes imágenes corresponden a la visualización del concreto curado durante 7 días en agua, obtenidas en el Microscopio Electrónico de Barrido, las muestras analizadas se recuperaron de los cilindros sometidos a la prueba de compresión axial y el proceso de curado natural no se detuvo durante 90 días posteriores a la prueba.

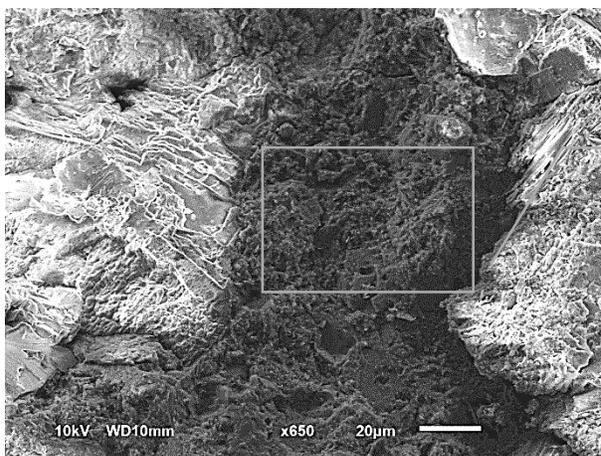
**Concreto experimental 7 días de curado.**



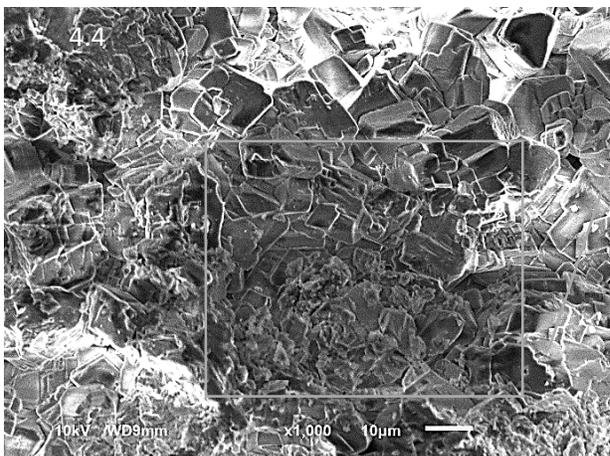
En la imagen 4.1 con amplificación de 100x son observables micro poros en el concreto (de agua), así como micro agrietamiento en la interfaz pasta-agregado (Ver esquemas 4a, 4b y 4c en resultados de porosidad)



En la imagen 4.2 se observa un grano de grava rodeado de pasta cementante, del lado derecho no se distingue la Zona de Transición (ZT), por lo que se presume que la adherencia obtenida es por el PVA que recubrió ése lado del agregado, mientras de que del lado izquierdo si se aprecia una separación (ZT) entre el agregado y la pasta



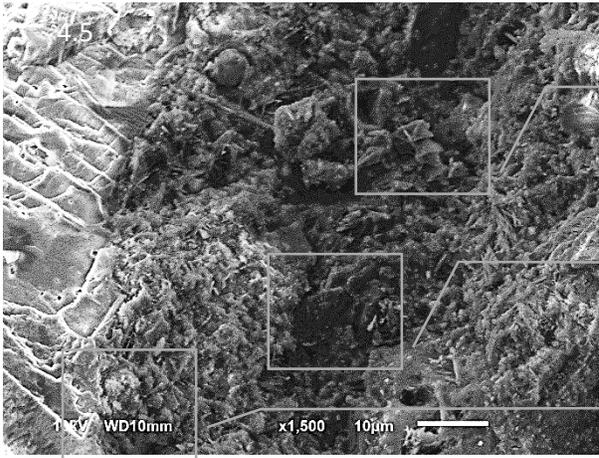
En la imagen 4.3 que es una ampliación de la imagen 4.2, se observa la Hidratación del cemento en la fase C-S-H en la unión de dos agregados.



Estructura cristalina del agregado grueso.

La estructura del agregado grueso que se observa asemeja al de la piedra dolomítica con formas trigonales o romboédricas.

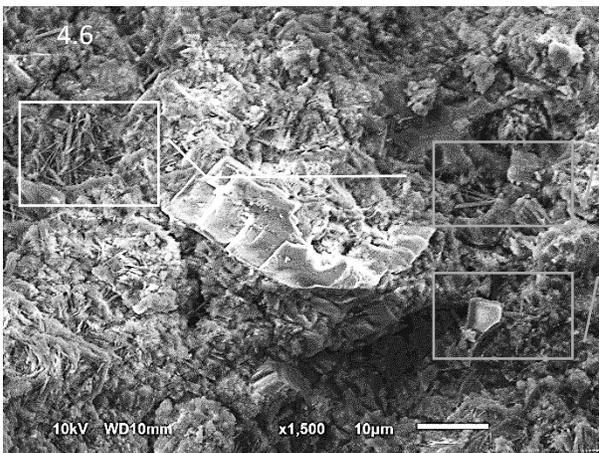
## Capítulo 4. Resultados y discusiones



Cristales de Portlandita

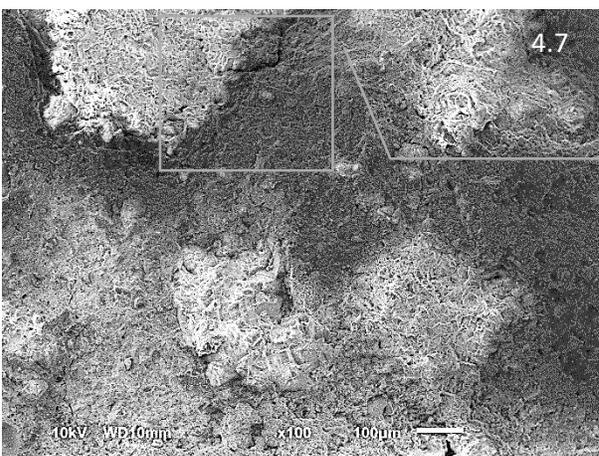
Cristales de Portlandita

ZT Pasta-agregado



Agujas de Etringita

Placas de Portlandita



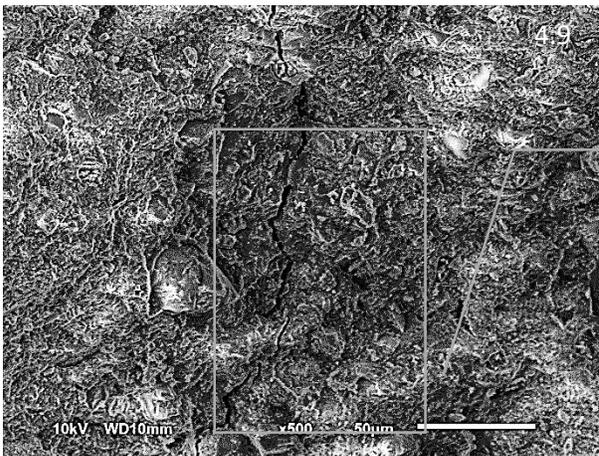
Micro-agrietamiento entre pasta cementante y grano de arena

**Concreto experimental 14 días de curado.**

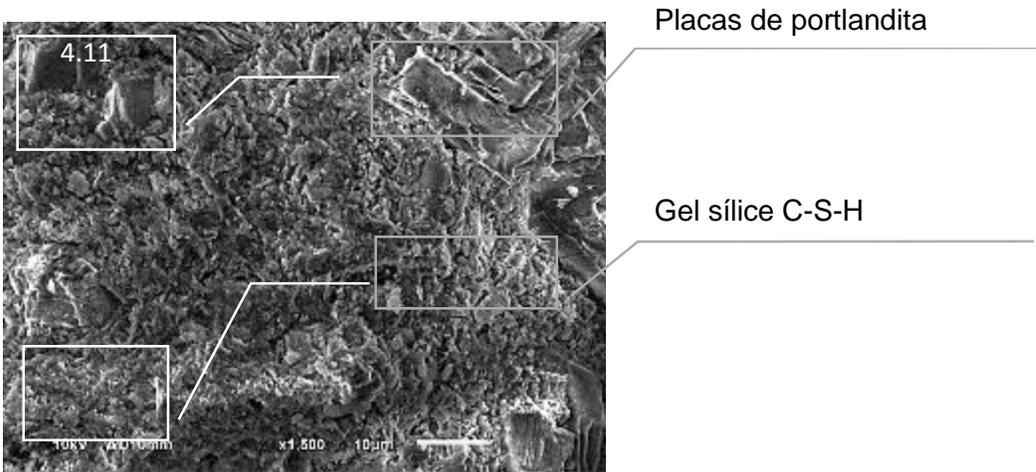
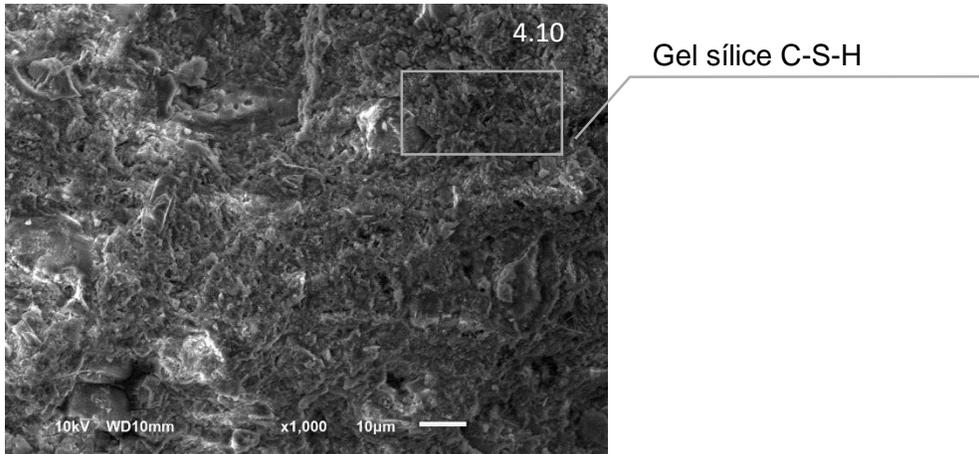
Las siguientes imágenes corresponden a la visualización del concreto curado durante 14 días en agua, obtenidas en el Microscopio electrónico de barrido, las muestras analizadas en el MEB se recuperaron de los cilindros sometidos a la prueba de compresión axial y el proceso de curado natural no se detuvo durante 90 días posteriores a la prueba.



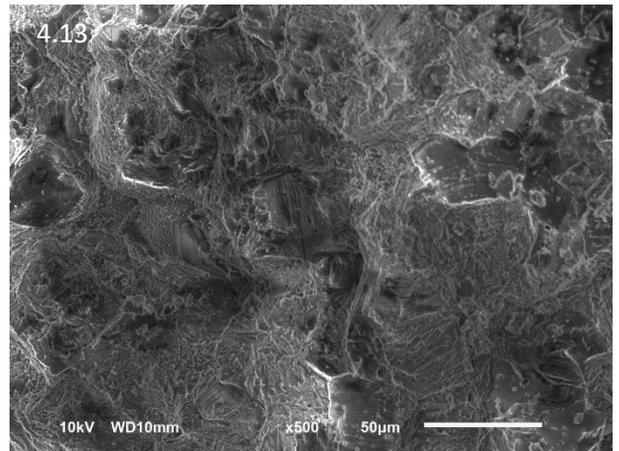
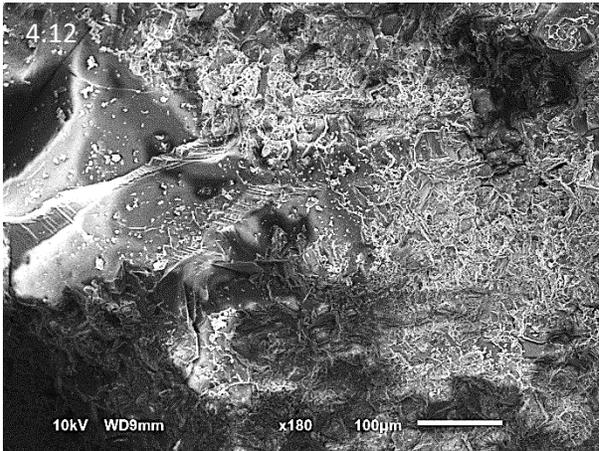
Porosidad en el agregado grueso



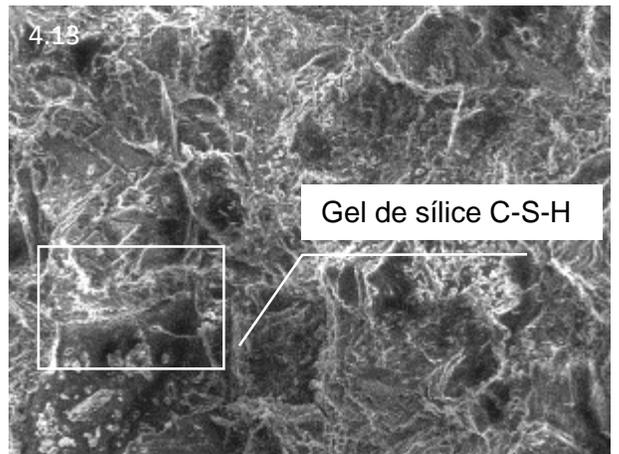
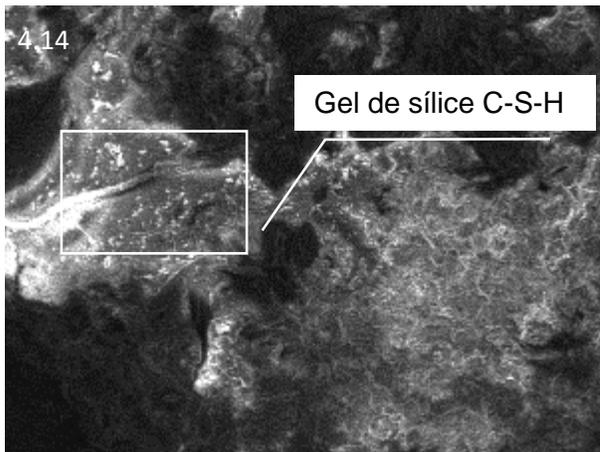
Micro agrietamiento en la interfaz cemento-agregado



Las imágenes mostradas a continuación, corresponden a la visualización del concreto curado durante 28 días en agua, obtenidas en el Microscopio electrónico de barrido, las muestras analizadas fueron recuperadas de los cilindros sometidos a la prueba de compresión axial y el proceso de curado natural no se detuvo durante 90 días posteriores a la prueba.

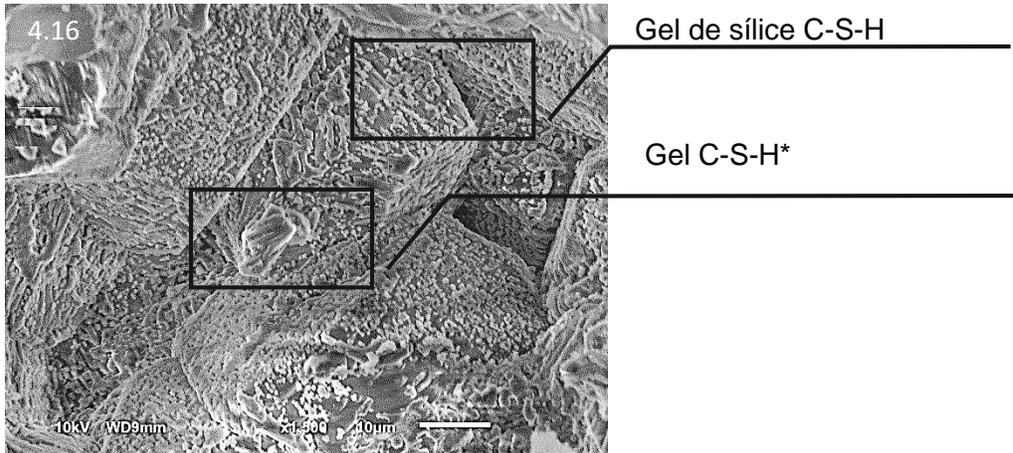


En las imágenes 4.12 y 4.13 con amplificaciones de 180x y 500x se observa el agregado grueso, sin embargo, su porosidad característica no es tan evidente, es presumible que el silicato de sodio o el alcohol de polivinilo hayan rellenado y cubierto los poros.



En las imágenes 4.14 y 4.16 con amplificaciones de 1500x y 2500x respectivamente se observa una densificación en la pasta cementante, aparentemente de la fase tobermorita y del gel sílice C-S-H, causantes de que este concreto adquiriera una

resistencia mayor que la de diseño como se demostró en las pruebas de resistencia a la compresión axial.



### Diferencia en la porosidad

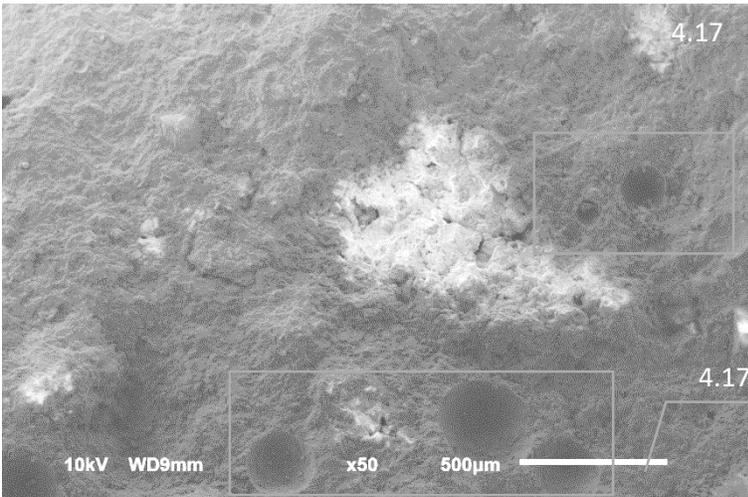
La porosidad de la pasta de cemento es la suma del volumen de los huecos capilares y de los huecos del gel, y representa el espacio no llenado por los componentes sólidos de la pasta de cemento hidratado (Neville y Brooks, 1998): depende principalmente de la relación agua/cemento ( $a/c$ ) y del grado de hidratación alcanzado por el cemento.

En una pasta de cemento hidratada, el agua de mezclado es, en primera instancia, la responsable de su permeabilidad, porque su contenido determina el espacio no llenado por los sólidos, ya sea porque es utilizada por las reacciones de hidratación del cemento o debido a la evaporación en el medio ambiente (Solís y Moreno, 2005).

Las moléculas de agua que quedan atrapadas en el concreto antes de que fragüe, son las responsables de los micro poros, (característicos por su forma redondeada, Figura 4.18), ésta agua posteriormente se incorpora a la pasta cementante dejando el espacio que ocupaba libre.

La diferencia de porosidad observada entre el concreto experimental (Figura 4.18) y el testigo (Figura 4.17) para el mismo tiempo de curado, puede ser dada por las características hidrófilas del Silicato de sodio, que retienen las partículas de agua, evitando que éstas permanezcan en la matriz mientras el concreto fragua, provocando ésta porosidad, así como por la formación de cristales de hidratación por acción del silicato de sodio y su precipitación en los micro poros, características que también se asocia a los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión.

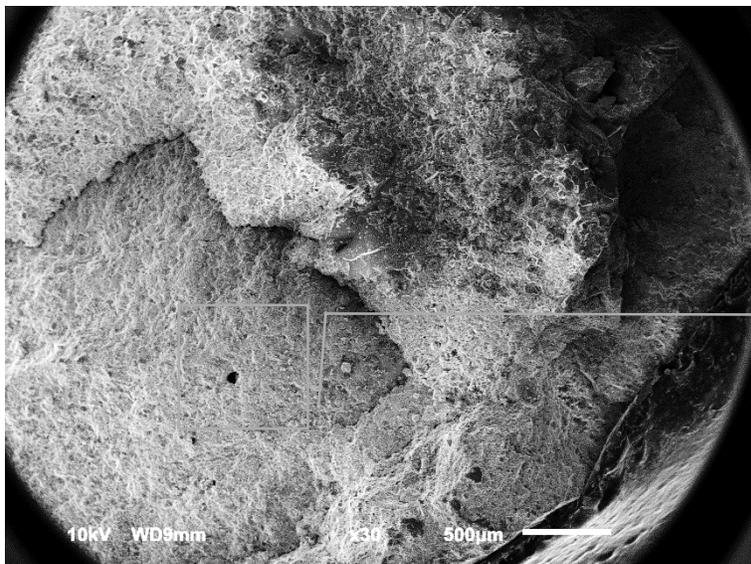
Finalmente se discute que, si bien la presencia de poros en sí no afecta la propiedad de durabilidad del concreto, si por causa del agrietamiento o por causas naturales estos poros se interconectan quedando como poros capilares, la durabilidad del concreto puede verse comprometida, pues el ingreso de agentes nocivos dañarían no solamente al concreto sino al acero con el que se llaga a reforzar.



Concreto testigo 28 días de curado

Micro poros de hasta 150 µm de diámetro

Micro poros de hasta 250 µm de diámetro



Concreto experimental 28 días de curado

Micro poros de hasta 50 µm de diámetro

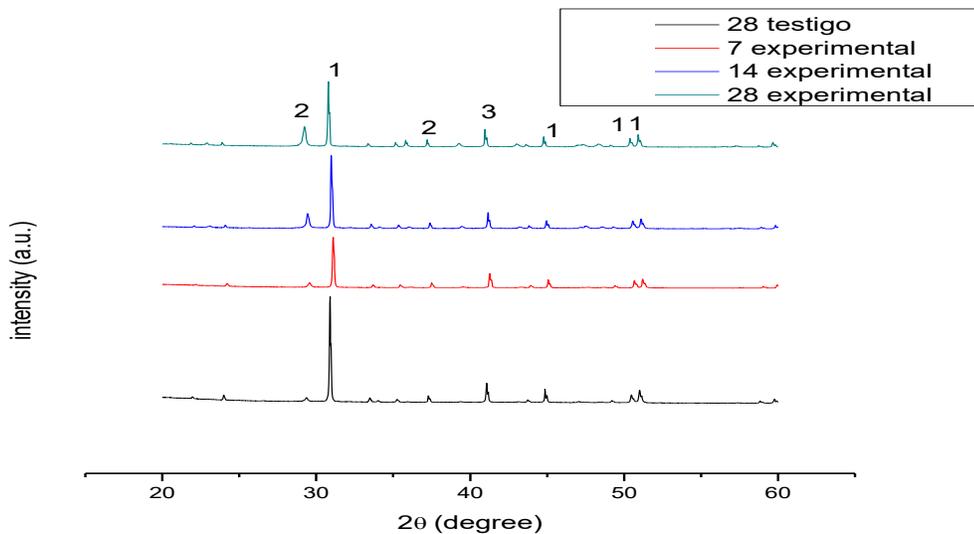
### Difracción de Rayos X

La microestructura de un material, es decir, el tipo, cantidad y distribución de las fases que lo constituyen, es el enlace fundamental entre los procesos que forman el material y sus propiedades. (Scrivener, Füllmann, Gallucci, Walenta, & Bermejo, 2004)

La difracción de rayos X es un método conveniente para determinar el tamaño medio de los cristales en materiales cristalinos a granel (Monshi, Foroughi, & Monshi, 2012).

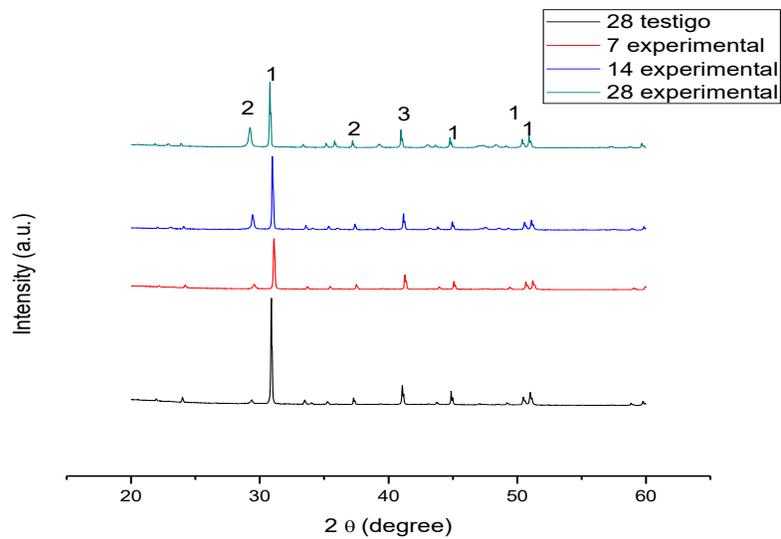
A menudo la cristalinidad varía en el tamaño y mientras más finas son las partículas de una especie, mayor imperfección pueden tener los cristales, por lo que las difracciones son más débiles y anchas, dificultando la determinación de la posición exacta de las mismas.

La gráfica 4.25 corresponde a la difracción de rayos X para el primer monitoreo efectuado a tres muestras de concreto experimental por cada día de curado y una muestra testigo de 28 días de curado, los picos más representativos (1 y 2) corresponden a la formación de cristales de dolomita y calcita, respectivamente. En función del tiempo de curado se observa un crecimiento en el pico del componente calcita y una disminución en el pico de dolomita.

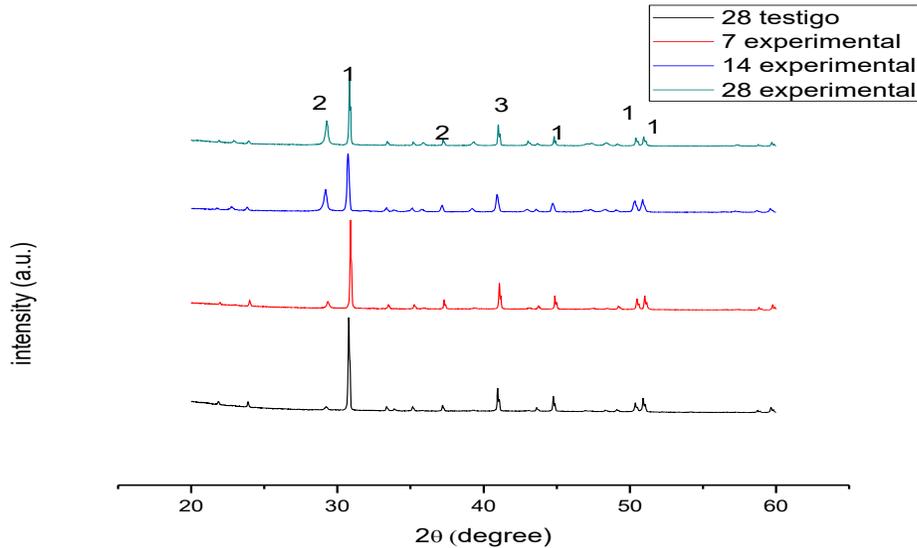


Gráfica 4.25 Primer monitoreo DRX [1] Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [2] Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) [3] Minrecordita ( $\text{CaZn}(\text{CO}_3)_2$ )

En la gráfica 4.26 que corresponde al segundo monitoreo para las muestras, se observa un ligero crecimiento en el pico 2, correspondiente a la cristalización de la Calcita. De acuerdo Edvardsen (Edvardsen, 1999), el principal mecanismo para la auto-reparación es la precipitación de cristales de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), por lo anterior es presumible que los cristales que se estén precipitando en las regiones micro-agrietadas correspondan a la formación de dicho carbonato.



Gráfica 4.26 Segundo monitoreo DRX [1] Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [2] Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) [3] Minrecordita ( $\text{CaZn}(\text{CO}_3)_2$ )



Gráfica 4.27 Tercer monitoreo DRX [1] Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [2] Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) [3] Minrecordita ( $\text{CaZn}(\text{CO}_3)_2$ )

En la Península de Yucatán se utilizan agregados para concreto que se obtienen de la trituración de piedra caliza geológicamente formada de sedimentos calcáreos marinos del Cenozoico. Esta caliza está compuesta, fundamentalmente, por carbonato de calcio (77%) y carbonato de magnesio (13%) (Pacheco y Alonzo, 2003). Éste enunciado permite hacer un diferenciación entre la composición de la calcita a la dolomita, siendo ésta la que prevalece en las muestras recuperadas, resultaría conveniente hacer un análisis de la microestructura del agregado así como una difracción de rayos X para verificar que realmente el producto comercializado en ña Ciudad de Chetumal cumple con las características de la piedra caliza, pues tanto el EDS como el DRX muestran mayor prevalencia de magnesio que lo reportado en literatura.

## CONCLUSIONES

La técnica de impregnación y encapsulación del agregado grueso ha demostrado ser una solución prometedora para el agrietamiento del concreto como lo demuestra la mejora del rendimiento mecánico y la aparente disminución de grietas en zonas afectadas. De acuerdo a los ensayos físico-químicos y mecánicos realizados en las muestras de concreto experimental y concreto de control se ha llegado a las siguientes conclusiones.

1. El proceso de impregnación al vacío y encapsulación del agregado grueso es una técnica que puede ser aplicada para la mejora de la calidad del agregado, incrementando la resistencia del concreto.
2. La resistencia a la compresión axial mejoró en relación con la resistencia de diseño y en comparación con la resistencia obtenida en el concreto testigo, obteniendo hasta un 56% más de fuerza a la esperada..
3. La porosidad alcanzó una diferencia del 4% menor en el concreto experimental que en el testigo.
4. En los resultados obtenidos con la visualización del Microscopio Electrónico de Barrido se observó que el Silicato de sodio y el Poli-vinyl Alcohol no afectaron la propiedad de adherencia entre la pasta cementante y los agregados gruesos, por el contrario, se observa un mejor desempeño en la zona de transición. También se corrobora por medio de éste estudio que la presencia de poros es menor en cuanto a cantidad y tamaño.
5. El MEB arrojó imágenes de una cristalinidad y morfología del agregado grueso característico de las piedras dolomíticas que a las piedras calizas, pero que en su composición tienen más del 77% de magnesio.
6. En la evaluación del comportamiento químico a través de la difracción de Rayos X se observa la presencia de Calcio y Magnesio como los principales elementos químicos en las muestras recuperadas.

7. El proceso de auto-reparación es observable en las muestras de concreto curadas a 7 y 28 días. Éste proceso se le atribuye a la formación de cristales de calcita y del gel sílice C-S-H.

## RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se evaluó el desempeño del concreto con el agregado grueso impregnado con solución de silicato de sodio y encapsulado con PVA, verificando si el agrietamiento inducido tenía un comportamiento positivo cerrando grietas de tamaño micrométrico.

Para aquel que quisiera darle continuidad al trabajo, resultará conveniente estudiar el comportamiento específico del agregado grueso como medio de transporte, pues si bien se obtuvieron mejoras en el desempeño físico mecánico del mismo, es conveniente estudiar el tiempo que el agregado es capaz de retener la solución de silicato de sodio y desarrollar una técnica de encapsulación que permita que la liberación de la solución ocurra hasta el momento en que el agregado falle.

Se sugiere realizar además de las pruebas realizadas en éste estudio, la prueba de absorción capilar o sorptividad, con el fin de obtener más datos estadísticos sobre la mejora de la densidad del concreto y la disminución de micro poros y micro grietas por acción de la solución de silicato de sodio.

Además, es recomendable prolongar el tiempo de curado hasta los noventa días con el fin de que el concreto llegue al pico máximo de resistencia y con ello tener valores más exactos en cuanto a la diferencia de resistencia a la compresión axial entre el concreto testigo y el experimental.

Otro aspecto importante a considerar es la evaluación del proceso de auto-reparación mediante una prueba no destructiva que permita agrietar las muestras de concreto y monitorear el proceso de auto-reparación en condiciones medioambientales propias de la región Sur de México, pues las pruebas analizadas se sometieron a un proceso de metalización que pudo haber interferido en la absorción de agua y por lo tanto en el desencadenamiento de la reacción del silicato de sodio con los cationes de Calcio liberados del cemento.

## REFERENCIAS

- A.M., N. (1999). *Tecnología del concreto* (1a.). Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C.
- Aggregates, C. (2012). Standard Test Method for Materials Finer than 75-  $\mu$  m ( No . 200 ) Sieve in Mineral. *ASTM Standard Guide, 04(200)*, 4–7.  
<https://doi.org/10.1520/C0117-13.2>
- Ahn, T., & Kishi, T. (2010). Crack self-healing behaviour of cementitious composites incorporating various minerals admixtures. In *Advances Concrete Technology* (pp. 171–186).
- Alaejos P., F. M. (1996). High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. *ACI Materials Journal*, 236.
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 910–921.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>
- American Society of Testing Materials. (2010). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. *ASTM International, i*, 1–10.  
<https://doi.org/10.1520/C0231>
- ASTM:C138/C138M-13. (2013). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric). *ASTM International, i*, 23–26.  
<https://doi.org/10.1520/C0138>
- ASTM:C702/C702M-11. (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. *ASTM International, 98(Reapproved)*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1520/C0702>
- ASTM. (2013). ASTM C566: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture

- Content of Aggregate by Drying. *Annual Book of ASTM Standards*, 8–10.  
<https://doi.org/10.1520/C0566-13.2>
- ASTM C 125-03. (2005). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, 1–4. <https://doi.org/10.1520/C0125-18.2>
- ASTM C 127-01. (2001). Standard Test Method for Density , Relative Density ( Specific Gravity ), and Absorption. *ASTM Standard*, 1–6.
- ASTM C 128-01. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM Standard*, 6.
- ASTM C 70-94. (2001). Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate (Reapproved 2001). *ASTM Standard*, 94(Reapproved), 3.  
<https://doi.org/10.1520/D3638-12.2>
- Blanco, F. (2013). Hidratación del cemento portland. *Universidad de Oviedo*, 41.  
 Retrieved from  
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>
- Cerón, M.; Duarte, F.; Castillo, W. (1996). *Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida*.
- Chan, P. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. *ACI Materials Journal*, 357.
- de Rooij, M., & Schlangen, E. (2011). *Self-healing phenomena in cement-based materials. State-of-the-Art*.
- Dry, C. (1996). Procedures Developed for Self-Repair of Polymeric Matrix Composite Materials. *Composite Structures*, 35, 263–269.
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogeneous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 96(4), 448–454. <https://doi.org/10.14359/645>
- Ezeldin A.S., A. P. C. (1991). Effect of coarse aggregate on the behavior of normal and high-strength concretes. In *Cement and concrete aggregates* (pp. 121–124).

U.S.A.

- Hernández Hernández D.C. (2003). *Caracterización de la roca caliza, producto de la explotación en los bancos de material pétreo en el Municipio de Othon P. Blanco, Tesis inédita, Cd. de Chetumal, México*. Instituto Tecnológico de Chetumal.
- Huang, H., & Ye, G. (2011). Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials. *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, (1993), 530–536. <https://doi.org/978-2-35158-116-9>
- INEGI. (2016). Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&c=124&e=23>
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>
- Li, V. C., & Herbert, E. N. (2013). Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites (ECC) under a natural environment. *Materials*, 6(7), 2831–2845. <https://doi.org/10.3390/ma6072831>
- Martínez, J., & Salomón, L. (2003). Caracterización del material calizo de la Formación Carrillo Puerto en Yucatán. *Ingeniería*, 7, 7–19.
- Mehta, K.; Monteiro, P. (1998). Concreto, estructura, propiedades y materiales. In *IMCyC* (p. 38). México.
- Mihashi, H., & Niwhiwaki, T. (2012). *Development of engineered self-healing and self-repairing concrete- State-of-the-art*.
- Monshi, A., Foroughi, M. R., & Monshi, M. R. (2012). Modified Scherrer Equation to Estimate More Accurately Nano-Crystallite Size Using XRD. *World Journal of*

- Nano Science and Engineering*, 02(03), 154–160.  
<https://doi.org/10.4236/wjnse.2012.23020>
- Özturan, T.; Çeçen, C. (1997). Effect coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. In *Cement and concrete research* (p. 165). U.S.A.
- Pabol, L. (1996). Optimización de los agregados para concreto (p. 30). México.
- Pelletier, M. M., Brown, R., Shukla, A., & Bose, A. (2010). Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent. *University of Rhode Island, Kingston, USA*, (C).
- Rodríguez, F. G. (2002). *Evaluación de estructuras de concreto.pdf*.
- Schlangen, E. (2010). *Self Healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in concrete repair system*. Delft University of Technology.
- Scrivener, K. L., Füllmann, T., Gallucci, E., Walenta, G., & Bermejo, E. (2004). Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1541–1547. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.014>
- Snoeck, D., Malm, F., Cnudde, V., Grosse, C. U., & Van Tittelboom, K. (2018). Validation of Self-Healing Properties of Construction Materials through Nondestructive and Minimal Invasive Testing. *Advanced Materials Interfaces*, 1800179, 1800179. <https://doi.org/10.1002/admi.201800179>
- Solís-Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Revista de La Facultad de Ingeniería*, 21(3), 57–68.
- Statements, B., & Ag-, C. (2015). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates 1, 04, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0136>
- Tasong, W. (1999). Aggregate-cement paste interface, Part I; Influence of aggregate geochemistry. In *Cement and concrete research* (U.S.A., p. 109).

- Uribe, R. (1991). El control de calidad en los agregados para concreto 3ra. parte. In *Construcción y tecnología* (p. 34).
- Van Tittelboom, K.; de Belie, N. (2010). Self healing concrete: Suitability of different healing agents. In *Int. J. 3R's* (pp. 12–21).
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). *Self-healing in cementitious materials-a review. Materials* (Vol. 6). <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
- Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., & De Belie, N. (2012). Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. *Construction and Building Materials*, 37, 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.026>
- Vélez, L. M. (2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto. *Revista Tecno Lógicas*, (25), 169–187. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5062984&info=resumen&idioma=SPA>
- Yang, Y., Yang, E., & Li, V. (2011). Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. In *Cement and Concrete Research* (pp. 176–183).

## APÉNDICE

---

## Análisis granulométrico del agregado fino

Análisis granulométrico del agregado fino							
Tipo de muestra: Arena de roca triturada							
Tamaño de la muestra: 500 grs.							
Tamiz (Núm.)	Tamiz (mm)	Malla (W-grs.)	% Retenido	% Ret. Acum	% Que pasa	Límite superior	Límite inferior
3/8"	9.52	0	0	0	100	100	100
4	4.75	0.025	5	5	95	100	95
8	2.36	0.13	26	31	69	100	80
16	1.18	0.115	23	54	46	85	50
30	0.6	0.06	12	66	34	60	25
50	0.3	0.045	9	75	25	30	5
100	0.15	0.04	8	83	17	10	0
200		0.04	8	91	9	5	0
Fondo		0.045	9	100	0	0	0
	Total	0.5	100	100			
		$\Sigma=$	100	314			

## Caracterización del agregado fino

Tipo de muestra: Arena de roca caliza triturada		
Caracterización	Norma ASTM	Resultado
Módulo de finura	ASTM C33 y C117	2.965
Densidad relativa (Seca al horno)	ASTM C128	1.54
Densidad relativa SSS	ASTM C128	1.66
Densidad relativa aparente	ASTM C128	1.37
Porcentaje de absorción	ASTM C128	1.17
Contenido de humedad	ASTM C128	11.10%
Peso volumétrico suelto	ASTM 29	1488 kg/m <sup>3</sup>
Peso volumétrico compactado	ASTM 29	1623 kg/m <sup>3</sup>

## Características de los materiales para el diseño de mezclas

Características de los datos seleccionados			
	Cemento Portland Ordinario	Agregado grueso	Agregado fino
Peso específico	3.15	1.24	1.58
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	3150	1623	1587
Peso unitario varillado en seco (kg/m <sup>3</sup> )		1623	
Módulo de finura			2.9
Humedad total		11	11
Absorción de humedad %		4.56	1.17