



**UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

## **TESIS**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CARBONATACIÓN Y  
CAMBIO DE PH DEL CONCRETO EN EL CANAL DEL  
TÚNEL - RÍO ASANA, 2018**

**PRESENTADO POR**

**BACHILLER NEYVA YASIRA CATARI FALCÓN**

**ASESOR**

**MGR. FABRIZIO DEL CARPIO DELGADO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

**MOQUEGUA – PERÚ**

**2021**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Página de jurado .....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimientos .....	iii
Contenido .....	iv
CONTENIDO DE TABLAS.....	viii
CONTENIDO DE FIGURAS .....	x
CONTENIDO DE ECUACIONES .....	xiii
CONTENIDO DE APÉNDICES .....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT .....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	xx

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema .....	1
1.2. Definición del problema .....	5
1.2.1. Problema general .....	5
1.2.2. Problemas específicos .....	5
1.3. Objetivos de la investigación.....	6
1.3.1. Objetivo general .....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Justificación .....	6
1.4.1. Justificación práctica .....	6
1.4.2. Justificación social .....	7
1.4.3. Justificación económica .....	7

1.4.4. Justificación teórica.....	7
1.5. Alcances y limitaciones .....	8
1.5.1. Alcances .....	8
1.5.2. Limitaciones .....	8
1.6. Variables.....	8
1.6.1. Variable independiente.....	8
1.6.2. Variable dependiente.....	8
1.6.3. Operacionalización de variables.....	9
1.7. Hipótesis de la investigación .....	9
1.7.1. Hipótesis general .....	9
1.7.2. Hipótesis específicas .....	10

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.....	11
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	11
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	17
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. Escala de pH.....	18
2.2.2. Ph del concreto .....	20
2.2.3. Concreto .....	20
2.2.3.1. Cemento portland.....	20
2.2.3.2. Agua.....	23
2.2.3.3. Agregados.....	24
2.2.4. Carbonatación.....	25

2.2.4.1. Proceso de carbonatación.....	25
2.2.4.2. Factores que intervienen en la carbonatación. ....	26
2.2.4.3. Efectos de la carbonatación. ....	31
2.2.4.4. Método de ensayo de la fenolftaleína. ....	38
2.2.4.5. Modelos de predicción de la carbonatación.....	39
2.2.4.6. Carbonatación natural y acelerada. ....	41
2.2.5. Aspectos generales del proyecto túnel del río Asana. ....	42
2.2.5.1. Ubicación geográfica. ....	42
2.2.5.2. Ingeniería del proyecto. ....	43
2.3. Definición de términos .....	53

### CAPITULO III

#### MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación.....	55
3.2. Diseño de la investigación.....	55
3.3. Población y muestra.....	57
3.3.1. Población.....	57
3.3.2. Muestra.....	57
3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos.....	58
3.4.1. Técnica para la recolección de datos.....	58
3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos.....	58
3.4.2.1. Registro de inspección de fisuras.....	59
3.4.2.2. Registro de monitoreo de condiciones de exposición de probetas. ....	59
3.4.2.3. Registro de monitoreo de pH de agua de infiltración. ....	60
3.4.2.4. Registro de recolección de datos de ensayo.....	60

CAPÍTULO IV .....	62
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	62
4.1. Presentación de resultados .....	62
4.2. Contractación de hipótesis .....	81
4.3. Discusión de resultados .....	92

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	96
5.2. Recomendaciones .....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101
APÉNDICES .....	110
MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	123
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	125

## CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Esquema de la matriz de operacionalización de variables.....	9
Tabla 2 Características del concreto $f'c = 45$ Mpa .....	22
Tabla 3 Materiales del concreto $f'c = 45$ Mpa .....	23
Tabla 4 Valores máximos de la composición del agua potable .....	24
Tabla 5 Límites máximos permisibles de calidad física y química del agua para consumo .....	24
Tabla 6 Los efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación..	28
Tabla 7 Calificación de daños materiales.....	34
Tabla 8 Guía de anchos de fisuras razonables hormigón armado bajo cargas de servicio.....	35
Tabla 9 Porcentaje de tipo de espesores de fisuras en los muros.....	62
Tabla 10 Presencia de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0.30 mm.	63
Tabla 11 Relación de la altura de muro y cantidad de fisuras .....	64
Tabla 12 Muestras expuestas a 77 días .....	65
Tabla 13 Muestras expuestas a 95 días .....	66
Tabla 14 Porcentajes de los valores de pH del agua de infiltración.....	68
Tabla 15 Variación cualitativa de PH de infiltración en túnel .....	69
Tabla 16 Medidas de profundidad de carbonatación y pH .....	70
Tabla 17 Estadísticos descriptivos por cada muestra de concreto .....	72
Tabla 17 Estadísticos descriptivos por cada muestra de concreto .....	73
Tabla 18 Estadísticos de Profundidad de carbonatación.....	73

Tabla 19 Estadísticos de los valores del pH del concreto .....	74
Tabla 20 Tabla de correlación de Pearson - profundidad de carbonatación y espesor de fisura .....	81
Tabla 21 Correlaciones de Rho de Spearman de las alturas de los muros y espesor de fisura .....	82
Tabla 22 Prueba de regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa ....	83
Tabla 23 Análisis de varianza entre la temperatura y humedad relativa.....	84
Tabla 24 Análisis de varianza de la temperatura y humedad relativa.....	85
Tabla 25 Estadísticos de correlación de Pearson de la profundidad de carbonatación y pH .....	86
Tabla 26 Comparaciones múltiples de la profundidad de carbonatación .....	87
Tabla 27 Comparaciones múltiples de valores del Ph del concreto.....	88
Tabla 28 Profundidad de carbonatación con HSD de Tukey.....	89
Tabla 29 Valores del pH del concreto con HSD de Tukey.....	90
Tabla 30 Coeficientes de regresión de la temperatura y humedad relativa.....	90
Tabla 31 Análisis de los residuales para el pronóstico de la humedad .....	91

## CONTENIDO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Escala de pH .....	19
Figura 2. Escala de colores con el indicador de la fenolftaleína .....	19
Figura 3. Humedad del concreto- poro seco .....	28
Figura 4. Humedad del concreto - poro saturado .....	29
Figura 5. Humedad del concreto - poro parcialmente lleno.....	29
Figura 6. Representación de la carbonatación.....	32
Figura 7. Esquema del avance de frente de carbonatación .....	34
Figura 8. Causas que producen problemas de durabilidad.....	38
Figura 9. Fórmula internacional de Hamada.....	41
Figura 10. Ubicación del tajo, depósito de roca estéril y túnel del río Asana.....	43
Figura 11. Ubicación de los trabajos en el túnel principal de desvío.....	43
Figura 12. Planta geológica del túnel de desvío río Asana .....	45
Figura 13. Sección A del canal del túnel.....	46
Figura 14. Sección B del canal del túnel.....	47
Figura 15. Sección B del canal del túnel.....	47
Figura 16. Diseño de la investigación .....	56
Figura 17. Presencia de fisuras en el concreto .....	63
Figura 18. Presencia de fisuras en el concreto .....	64
Figura 19. Profundidad de carbonatación y Espesor de fisura.....	65
Figura 20. Muestras expuestas a 77 días .....	66
Figura 21. Muestras expuestas a 95 días .....	67

Figura 22. Muestras expuestas a 95 días .....	69
Figura 23. Variación cualitativa de PH de infiltración en túnel.....	70
Figura 24. Promedio de la profundidad de carbonatación (mm) .....	74
Figura 25. M-01, pH=9 .....	75
Figura 26. M -02, pH=9 .....	75
Figura 27. M-03, pH=9 .....	75
Figura 28. M-04, pH=9 .....	75
Figura 29. M-05, pH=9 .....	76
Figura 30. M-06, pH=9 .....	76
Figura 31. M-07, pH=9 .....	76
Figura 32. M-08, pH=9 .....	76
Figura 33. Figura 33. M-09, pH=9.....	76
Figura 34. M-10, pH=9 .....	76
Figura 35. M-11, pH=9 .....	77
Figura 36. M-12, pH=9 .....	77
Figura 37. M-13, pH=9 .....	77
Figura 38. M-14, pH=9 .....	77
Figura 39. M-15, pH=8 .....	77
Figura 40. M-16 pH=8 .....	77
Figura 41. M-17, pH=8 .....	78
Figura 42. M-18, pH=8 .....	78
Figura 43. M-19, pH=8 .....	78
Figura 44. M-20, pH=8 .....	78
Figura 45. M-21, pH=8 .....	78

Figura 46. M-22, pH=8 .....	78
Figura 47. M-23, pH=8 .....	79
Figura 48. M-25, pH=8 .....	79
Figura 49. M-26, pH=9 .....	79
Figura 50. M-28, pH=9 .....	79
Figura 51. M-29, pH=9 .....	79
Figura 52. M-31, pH=12 .....	79
Figura 53. M-32, pH=12 .....	80
Figura 54. M-33, pH=12 .....	80
Figura 55. M-34, pH=12 .....	80
Figura 56. M-36, pH=11 .....	80
Figura 57. M-37, pH=11 .....	80
Figura 58. M-38, pH=11 .....	80
Figura 59. M-41, pH=11 .....	81
Figura 60. M-43, pH=12 .....	81
Figura 61. Profundidad de carbonatación y Espesor de fisura.....	82
Figura 62. Prueba de regresión lineal.....	84
Figura 63. Correlación entre el promedio de profundidad de carbonatación y el valor de pH .....	86
Figura 64. Profundidad de carbonatación con HSD de Tukey.....	89
Figura 65. Residuales de temperatura .....	91

## CONTENIDO DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1 Concepto de pH.....	19
Ecuación 2 Concepto de ph desarrollado.....	19
Ecuación 3 Agua y cal libre.....	25
Ecuación 4 Ácido carbónico.....	25
Ecuación 5 Carbonato de calcio+ agua.....	26
Ecuación 6 Carbonatación.....	26
Ecuación 7 Expresión Vereck.....	39
Ecuación 8 Expresión Josiel.....	39
Ecuación 9 Expresión Kishitani.....	40
Ecuación 10 Expresión kishitani desarrollada.....	40
Ecuación 11 Relación a/c .....	40
Ecuación 12 Constante k .....	40
Ecuación 13 Valor de R .....	40
Ecuación 14 Factor K .....	40
Ecuación 15 Profundidad de Carbonatación.....	40

## CONTENIDO DE APÉNDICES

### APÉNDICE A. FOTOGRAFÍAS

Fotografía A 1. Medición de fisuras .....	110
Fotografía A 2. Medición de PH del agua de infiltración .....	110
Fotografía A 3. Filtración de agua subterránea sobre el muro de canal.....	110
Fotografía A 4. Medición de temperatura y humedad relativa .....	110
Fotografía A 5. Traslado de concreto H45 en carmix .....	111
Fotografía A 6. Preparado de probetas con concreto H45 .....	111
Fotografía A 7. Colocación de varilla de acero a la probeta.....	111
Fotografía A 8. Probetas de H45 etiquetadas.....	111
Fotografía A 9. Probeta de concreto H45 etiquetada .....	111
Fotografía A 10. Probeta de concreto H45 etiquetada .....	111
Fotografía A 11. Recolección de datos del ambiente de exposición.....	112
Fotografía A 12. Impermeabilización de las muestras de concreto .....	112
Fotografía A 13. Corte de muestras de concreto.....	112
Fotografía A 14. Muestra de concreto codificada.....	112
Fotografía A 15. Clasificación de muestras .....	112
Fotografía A 16. Clasificación de muestras que contienen varilla de acero .....	112
Fotografía A 17. Medición de las dimensiones de la probeta .....	113
Fotografía A 18. Materiales para realizar el ensayo .....	113
Fotografía A 19. Vertimiento de agua destilada en embase con medida.....	113
Fotografía A 20. Medición de fenolftaleína disuelta en alcohol etílico .....	113
Fotografía A 21. Preparación del indicador de fenolftaleína .....	113

Fotografía A 22. Disposición en envase la disolución de fenolftaleína.....	113
Fotografía A 23. Prueba inicial en diferentes elementos de concreto.....	114
Fotografía A 24. Roceado de indicador sobre muestra de concreto .....	114
Fotografía A 25. Control de tiempo de .....	114
Fotografía A 26. Probetas con diferentes tiempos de aplicado la fenolftaleína..	114
Fotografía A 27. Medición con pie de rey la profundidad de carbontación .....	114
Fotografía A 28. Medición de Ph la muestra .....	114
Fotografía A 29. EPP utilizados para el ensayo de indicador de fenolftaleína ....	115
Fotografía A 30. Culminación de la aplicación de la Norma: UNE 11211:2011	115

#### **APÉNDICE B. CERTIFICADOS**

Certificado B 1. Certificado de calibración de termohidrómetro.....	116
Certificado B 2. Certificado del medidor de PH .....	117
Certificado B 3. Certificado del cemento tipo HE .....	118
Certificado B 4. Certificado de la fenolftaleína .....	119

#### **APÉNDICE D. REGISTROS**

Registro D 1 Monitoreo de condiciones de exposición de probetas. ....	125
Registro D 2. Recolección de datos de ensayo - Determinación de la profundidad de carbontación.....	133
Registro D 3. Registro de inspección de fisuras .....	139

## RESUMEN

La investigación desarrollada tuvo por objetivo evaluar el proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana, ubicado en el proyecto Quellaveco distrito de Torata, región Moquegua.

Se realizó muestras cilíndricas, de 100 mm de diámetro y 40 mm de altura elaborados con concreto  $f'c = 45$  Mpa, sometidos a un ambiente natural en el interior del túnel del río Asana, a una atmósfera con valores máximos de 47 % de humedad relativa y una temperatura mínima de 15° C, son dos series de muestras que expuestas a 95 días (30 muestras) y a 77 días (15 muestras), todas las muestras expuestas a un mismo ambiente de exposición. Se recolectó información periódicamente de la temperatura y humedad relativa, para finalmente medir el avance de la carbonatación y pH de las muestras expuestas aplicando el método de ensayo de la fenolftaleína.

De la recolección de datos, se obtuvieron resultados de la aparición de fisuras en los muros del canal, concluyendo que el 53 % tienen fisuras mayores a 0,30 mm y el 47 % tienen fisuras menores a 0,30 mm. Además se obtuvo resultados de los valores obtenidos de las infiltraciones del agua del túnel llegando a valores de hasta un máximo de 10,91pH y en los resultados del método de ensayo de fenolftaleína se evidencia que el promedio de la profundidad de carbonatación en las muestras, del M1 al M29 tienen profundidades entre tres milímetros a 5,7 mm registrando mayores profundidades de carbonatación en comparación a las muestras del M30 a M45.

Finalmente se concluyó que la aparición de fisuras en los muros del canal no es consecuencia de la carbonatación. Se comprobó que existe una correlación entre la profundidad de carbonatación y el valor de PH donde la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación es mayor a menor PH del concreto.

Esta investigación ha permitido brindar el conocimiento de la evaluación del proceso de carbonatación y cambio de pH usando el método de ensayo de fenolftaleína, los resultados dependió de la evaluación de factores ambientales y factores químicos como las aguas de esorrentía y el tiempo de exposición.

*Palabras clave: Carbonatación, pH, concreto, corrosión, acero, durabilidad concreto*

## **ABSTRACT**

The objective of the research carried out was to evaluate the carbonation process and change of pH of the concrete in the tunnel channel - Asana river, located in the Quellaveco project, Torata district, Moquegua region.

Cylindrical samples, 100 mm in diameter and 40 mm in height, were made with concrete  $f'c = 45$  Mpa, subjected to a natural environment inside the Asana River tunnel, to an atmosphere with maximum values of 47% humidity Relative temperature and a minimum temperature of  $15^{\circ} C$  are two series of samples that are exposed to 95 days (30 samples) and 77 days (15 samples), all samples exposed to the same exposure environment. Information was collected periodically on temperature and relative humidity, to finally measure the progress of carbonation and pH of the exposed samples by applying the phenolphthalein test method.

From the data collection, results of the appearance of cracks in the canal walls were obtained, concluding that 53% have cracks greater than 0.30 mm and 47% have cracks smaller than 0.30 mm. In addition, results were obtained from the values obtained from the infiltrations of the tunnel water reaching values of up to a maximum of 10.91pH and in the results of the phenolphthalein test method it is evidenced that the average depth of carbonation in the samples, from M1 to M29 have depths between three millimeters to 5.7 mm registering greater depths of carbonation compared to the samples from M30 to M45.

Finally, it was concluded that the appearance of cracks in the canal walls is not a consequence of carbonation. It was found that there is a correlation between the carbonation depth and the PH value where the variation in time of the carbonation depth is greater at the lower PH of the concrete.

This research has allowed to provide the knowledge of the evaluation of the carbonation process and pH change using the phenolphthalein test method, the results depended on the evaluation of environmental factors and chemical factors such as runoff water and exposure time.

Keywords: Carbonation, pH, concrete, corrosion, steel, concrete durability.

## INTRODUCCIÓN

La investigación que se presenta desarrolla el tema de la carbonatación del concreto endurecido y Ph, se aborda en la presente tesis lo descrito por el autor indicando que el proceso de carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. (Montani, 2000, pág. 1)

La carbonatación genera un impacto económico negativo, causando deterioro a las estructuras de concreto armado de todo el mundo, su avance es lento pero continuo, que termina con la corrosión del acero llegando a producir una falla inesperada de la estructura (Montani, 2000).

La presente investigación fue realizada con el propósito de evaluar el proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel del río Asana, evaluando factores físicos y químicos que intervienen en el proceso de carbonatación, para finalmente determinar la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto.

Se sometió muestras cilíndricas de 100 mm de diámetro y 40 mm de altura elaborados con Concreto  $f'_c = 45$  Mpa, fueron sometidos a un ambiente natural del interior del túnel del río Asana, a una atmósfera variada con valores máximos de 47 % de HR y una temperatura mínima de 15 °C.

Utilizando dos series de muestras a 95 días (30 muestras) y a 77 días (15 muestras) expuestas a un mismo ambiente de exposición. El avance de la carbonatación y pH

fue medido con el ensayo de fenolftaleína comparando las dos series de muestras con diferentes tiempos de exposición.

La presente investigación está estructurada de la siguiente manera: en el capítulo I se realizó el planteamiento y formulación del problema general y específicos, incluyendo los objetivos y la justificación, alcances y limitaciones, se desarrolla la matriz de operacionalización de variables y por último la hipótesis general e hipótesis derivadas.

En el capítulo II están desarrollados los antecedentes bibliográficos, las bases teóricas y el glosario de términos.

En el capítulo III se desarrolla el diseño de investigación, determinando la población y muestra considerando los criterios de inclusión y exclusión para la delimitación poblacional, se nombra los instrumentos que se emplearon para la recolección y análisis de datos.

En el capítulo V, se da a conocer los resultados de la investigación realizando la contrastación de la hipótesis y la discusión de los resultados.

Finalmente se presenta las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, apéndices y anexos.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Descripción de la realidad del problema**

La calidad de las construcciones de concreto armado están sujetas a sufrir el proceso de carbonatación, que va afectando progresivamente al acero que está en su interior, esto puede ocasionar que el elemento constructivo o la estructura termine en colapso. Al respecto es necesario evaluar las estructuras de concreto armado que presenten indicios de los efectos de carbonatación, de tal forma que permita determinar cuales son los factores que intervienen y aceleran este proceso, para ello es necesario identificar como se desarrolla el proceso de carbonatación en un canal del túnel del río Asana, considerando que este canal es de vital importancia, trasladando agua para consumo humano y agrícola para el valle de Tumilaca y Samegua.

Existen estudios sobre la carbonatación en estructuras expuestas a ambientes urbanos, marinos y con cámaras de carbonatación acelerada obteniendo resultados en menor tiempo, pero no se ha encontrado un estudio que describa la carbonatación desarrollada en el interior del túnel, donde los factores físicos y químicos son diferentes a las características de los demás estudios realizados en ciudades de diferentes países.

Los factores que se observó en el interior del túnel son características características de una iniciación o efecto de la carbonatación tales como, presencia de fisuras en los muros del canal del río Asana, filtraciones de aguas subterráneas en las paredes del túnel y en algunos casos se observo filtraciones por medio de las fisuras en los muros, todo esto expuesto a humedades relativas altas.

En el proceso de construcción donde a su vez se utilizaba en el interior del túnel equipos que motorizados que emitían humos como monóxido de carbono. Al verificar este entorno agresivo para el concreto y signos de deterioro del concreto se genera la preocupación de garantizar una buena durabilidad del concreto para esto es necesario hacer una evaluación de avance de carbonatación al elemento de concreto armado.

Es importante conocer como inicia el proceso de carbonatación en que culmina y el perjuicio que ocasiona. La carbonatación es un proceso de avance lento pero continuo que culmina con la corrosión del acero en el concreto reforzado y llega a dañar seriamente a la estructura. El perjuicio y el costo que esto puede acarrear son razones suficientes para reconocer el valor de esta información (Montani, 2000,p.1).

A partir de estudios existentes donde explican los efectos de la carbonatación sobre la estructuras de concreto, donde indican que la corrosión de las armaduras es una de las causas más habituales del deterioro de las estructuras de concreto, convirtiéndose en un problema económico de cuantiosos gastos en reparación y mantenimiento, lo que implica preocupación tanto para las empresas privadas e inversiones públicas.

Troconis (2011) Da a conocer el estudio que llevo a cabo la Asociación internacional de Corrosión (NACE Internacional), menciona que el estudio realizado por (Veleva y Alpuches, 2002) donde se estimó un costo anual directo por corrosión de 276 billones de dólares en Estados Unidos, correspondiendo 50 billones a estructuras de puentes, en tal sentido el departamento de transporte de Estados Unidos reporto el 25 % de los mismos (uno de cada cuatro), siendo estos calificados como deficientes, identificando la corrosión de la armadura como uno de los factores principales que contribuyen a este deterioro. En este artículo también se refiere a los países que conforman Iberoamérica indicando que no se dispone de información económica definida, sin embargo indican que se ha demostrado que en climas tropicales que la agresividad para materiales metálicos, es mayor que en países que no lo son cita a (Morcillo *et al.*, 1998). Resaltando que el impacto económico que genera la corrosión en las estructuras es muy importante refiriéndose a los resultados de la evaluación técnica en algunos países de Iberoamérica donde muestran que los daños por corrosión de la armadura se encuentran dentro de las tres primeras causas de deterioro de las estructuras de concreto como referencia cita a los siguientes autores (GEHO, 1992); (Dal Molin, 1992); (Magalhaes, Folloni y Furman, 1989); (Aranha, 1994); (Nince, 1996) ; (Carmona y Marega, 1988). En Venezuela, el Centro de Estudios de Corrosión (CEC) de la Universidad del Zulia mencionando a (Fernández et al, 2005). Citó como ejemplo del costo que implica reparar una estructura de concreto armado como es el puente "General Rafael Urdaneta", también conocido como el "puente sobre el lago de Maracaibo" donde su construcción en 1962 costo aproximadamente 77 millones de dólares y solo el cambio de guayas (1980). Dada su corrosión costo

la misma cantidad; esta cifra no alcanzaría para su reparación y rehabilitación integral, como así lo requiere; ya que reparar solo una de las 135 pilas con criterios de durabilidad cuesta aproximadamente medio millón de dólares.

Rio (2007) En el Perú existe evidencia de estructuras que sufrieron un estado de corrosión como lo indica el informe ICP/INF-046/2007 solicitado por la empresa CESEL S.A al instituto de corrosión y Protección de la Pontificia Universidad Católica del Perú (ICP-PUCP) la inspección, evaluación y el diagnóstico del estado de corrosión del acero de refuerzo en cuatro decantadores de la planta; como antecedentes de la estructura se conoce que tienen una antigüedad de 50 años; para la emisión del informe se realizó una inspección visual, medición del potencial de electrodo acero, toma de muestras de concreto en polvo para un análisis químico en el laboratorio. Concluyendo, que el acero presenta daños por corrosión, las mediciones del potencial electrodo del acero y concreto presentando un alto riesgo de corrosión; indica que el acero de refuerzo al menos en los puntos inspeccionados presenta un valor de pH adecuado y que las picaduras encontradas no han llegado a perforar el metal y algunas se encuentran en estado inicial. Sin embargo, recomiendan realizar un mapeo de potenciales más completo y una evaluación de la profundidad de carbonatación para considerar las medidas más adecuadas en la reparación.

Tronconis (2011) Existen investigaciones relacionadas con la corrosión de la armadura, pero han estado especialmente enfocadas al estudio de las causas y mecanismos de deterioro, al desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y al empleo de métodos de protección para ambientes marinos. La acción de las mareas o salpicaduras producen ciclos de humedad y secado, que dan lugar a

mecanismos de penetración de los cloruros mas rápido, por lo que además de la difusión, aparecen fenómenos de absorción capilar o de niebla salina que conducen a la penetración de los iones cloruro a través de la red de poros del concreto. Los iones cloruro son capaces de inducir a la corrosión localizada de la armadura y por tanto llegar a producir una falla prematura e inesperada de la estructura.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, la pregunta principal que guía esta investigación es: ¿Cuál es la incidencia de la evaluación del proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel-río Asana, 2018?

## **1.2. Definición del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es la incidencia de la evaluación del proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel-río Asana, 2018?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿De qué manera las fisuras se relacionan con el proceso de carbonatación del concreto en el canal del túnel -río Asana 2018?

¿Qué factores físicos y químicos intervienen en el cambio del pH del concreto en el canal del túnel -río Asana 2018?

¿Cómo se dará la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar el proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Analizar la aparición de fisuras y su relación con el proceso de carbonatación del concreto en el canal del túnel-río Asana 2018.

Identificar factores físicos y químicos que intervienen en el cambio del pH del concreto en el canal del túnel -río Asana 2018.

Determinar la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto.

### **1.4. Justificación**

#### **1.4.1. Justificación práctica**

Se justifica de manera práctica, porque contribuyó al desarrollo de evidencias científicas en el campo donde se resuelve problemas prácticos, presentando resultados de correlaciones obtenidas entre profundidades de carbonatación y el cambio de pH del concreto con un mismo tipo de cemento y ambiente de exposición, con diferentes periodos de tiempo de exposición. Estos datos obtenidos y la identificación de factores físicos y químicos podrán ser empleado para calificar el estado del concreto a su vez recomendar medidas de reparación del canal.

#### **1.4.2. Justificación social**

El trabajo de investigación se justifica socialmente porque contribuye por medio de la investigación a solucionar un problema social, el cual es no alterar ni la cantidad ni la calidad de sus aguas del río Asana para ello de la evaluación del proceso de carbonatación, se llegará a conclusiones y a partir de ello se puede proponer alternativas de mejora a la infraestructura como es el canal el que transporta el agua para la población.

#### **1.4.3. Justificación económica**

El trabajo de investigación permitirá realizar una evaluación de avance de carbonatación y cambio de pH que alerte futuros daños de corrosión en la estructura del canal que acarrearía gastos adicionales perdidas económicas para la empresa, considerando que es una infraestructura en un espacio confinado que tiene condiciones limitantes de área y acceso para el personal limitando el desarrollo de actividades en el interior del túnel.

#### **1.4.4. Justificación teórica**

El trabajo de investigación se justifica porque se realizará el ensayo en base a la norma UNE 112011:2011 donde describe el método de ensayo para determinar la profundidad de carbonatación en concretos endurecidos, de donde se obtendrá la profundidad de carbonatación y el valor del pH, se usó también el código ACI 224R-01 causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de hormigón control de fisuración en estructuras de hormigón del cual obtenemos espesores de fisuras presentados en los muros del canal y la norma ASTM C 172 práctica

normalizada para el muestreo del concreto recién mezclado, la cual aplicamos para el muestreo de probetas a utilizar en la muestra de la investigación.

## **1.5. Alcances y limitaciones**

### **1.5.1. Alcances**

El presente estudio se enfocó en determinar la profundidad de carbonatación mediante el método de ensayo de disolución de fenolftaleína, se analizó la presencia de fisuras a lo largo del canal, describiendo la relación con el avance de la carbonatación del concreto, identificando factores físicos químicos (temperatura, humedad relativa y ph del agua subterránea) que intervienen en el cambio del pH del concreto.

### **1.5.2. Limitaciones**

En el trabajo de investigación no se ensayó probetas a un ambiente de carbonatación acelerada, que se realiza con una cámara de carbonatación acelerada por no contar con el equipo. No se realizó las mediciones de  $CO_2$  por no contar con el equipo.

## **1.6. Variables**

### **1.6.1. Variable independiente**

Cambio de pH del concreto

### **1.6.2. Variable dependiente**

Proceso de carbonatación

### 1.6.3. Operacionalización de variables

La operacionalización de variables se tuvo como base teórica de su elaboración al libro de seminario de Tesis I (Vento y Zanabria, 2004) se observa la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Esquema de la matriz de operacionalización de variables*

Variable	Dimensión	Indicador	Instrumento de medida	Unidad de medida
Variable independiente: Cambio de ph del concreto	Factores físicos	Humedad relativa	Termohidrómetro Registro D 1	% (porcentaje)
		Temperatura	Registro de monitoreo de condiciones de exposición de probetas	C° (grados centígrados)
Variable dependiente: Proceso de carbonatación	Valores de ph	pH del agua de infiltración	Medidor de pH Registro D 1 Registro de monitoreo de pH de agua de infiltración	und pH (unidad pH)
		patología del concreto	Espesor de fisura Tarjeta o medidor de fisura Registro D 3 Registro de inspección de fisuras	mm (milímetros)
	Ensayo de fenolftaleína	Profundidad de carbonatación	Pie de rey Registro D 2 Formato de recolección de datos de ensayo método de determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio	mm (milímetros)
		pH del concreto endurecido	Escala de colores de pH Registro D 2 Formato de recolección de datos de ensayo método de determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio	und pH (unidad pH)

## 1.7. Hipótesis de la investigación

### 1.7.1. Hipótesis general

La evaluación del proceso de carbonatación, brindará el conocimiento para la identificación del cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

### **1.7.2. Hipótesis específicas**

La aparición de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0,30 mm es producto del proceso de carbonatación.

La humedad relativa, temperatura, características químicas del agua de infiltración del interior del túnel, son factores que intervienen en el cambio del pH del concreto.

La variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación será mayor a menor pH del concreto.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Moreno (2006) Presentó un artículo de investigación titulado *Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación*, en el cual resalta que la carbonatación del concreto inicia la corrosión del acero de refuerzo debido a la reducción del pH del agua del poro. En este artículo se muestra una aplicación de un método llamado lixiviación in-situ (LIS), el cual consiste en examinar el pH inicial de la solución del poro y sus cambios debido a la carbonatación en concretos de composición variada, obteniendo de este método el valor del pH final que fue menor, después de la exposición a una carbonatación acelerada, destacando que esto responde de acuerdo a la cantidad utilizada de cemento portland ordinario ceniza volante clase “F” y humo de sílice. Para ejecutar la investigación usaron cilindros de concreto (75 mm de diámetro, 150 mm de longitud) preparados con cementos puzolánicos, elaborados de acuerdo a las normas ASTM, para el uso de materiales de la mezcla y el procedimiento del ACI para el diseño de mezcla son cemento portland

ordinario (0,49 % Na equiv.), ceniza volante clase “F” (0,72 % Na equiv.), y humo de sílice como resultado se obtuvo que los especímenes no expuestos mostraron valores de pH comprendidos en el rango 12,9 a 13,1 suficientemente alto sobre el pH de la solución de hidróxido de calcio saturado (12,5). En especímenes de concreto completamente carbonatados, los valores del pH fluctuaron en un rango de 8 a 9,8 (mezclas 20CVAC, 20CV8HS, 50CV1, y 50CV2). A diferencia de los especímenes de concreto parcialmente carbonatados, los valores de pH fluctuaron en un rango de 9,5 a 10 en la región carbonatada, de 10,4 a 10,8 del frente de carbonatación (definida por la prueba de la fenolftaleína), y de 10,4 a 12,5 en la región que no estaba carbonatada (mezclas 20CV y 35CV) llegando a las siguientes conclusiones. Los valores del pH de la solución del poro del concreto antes de la carbonatación son mayores que el pH de una solución saturada de hidróxido de calcio, los valores del pH de la solución del poro después de la carbonatación fluctuaron entre ocho y 9,8 unidades. El valor final incrementa cuando disminuye la cantidad de puzolanas presentes en el material cementante y por ultimo los valores del pH obtenidos en concreto carbonatado son consistentes con los obtenidos en pastas y morteros carbonatados.

Campos, Fajardo y Mendoza (2016) en el *Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado* señala que la durabilidad de una estructura de concreto reforzado puede ser perjudicado por la corrosión del acero de refuerzo debido al proceso de carbonatación. Bajo la hipótesis que el concreto seguirá un desempeño insitu, un índice de durabilidad puede ser obtenido con pruebas aceleradas de carbonatación.

Campos, Fajardo y Mendoza (2016) La metodología empleada para alcanzar el objetivo a partir de someter elementos prismáticos de concreto a pruebas de carbonatación acelerada y a un ambiente natural los especímenes de estudio tienen dimensiones de 50 x 50 x 250 mm elaborados con dos tipos de cemento CPO y CPC (cemento portland ordinario y cemento portland compuesto) y tres distintas relaciones a/c (0,6; 0,7 y 0,8) fueron elementos de análisis. Una de serie de estos especímenes fueron sometidos a carbonatación acelerada en una atmósfera con características de 3 %, 4 %, 5 % o 6 % de  $CO_2$  Y 50-60 % de HR a 30 °C, otra serie de los especímenes fueron expuestos en dos zonas urbanas dentro del área metropolitana de Monterrey, el monitoreo del comportamiento del avance de la carbonatación de los especímenes expuestos a ambientes de carbonatación acelerada fue regularmente monitoreado, como resultado estos especímenes revelaron una mayor profundidad de carbonatación en comparación con el modelo existente para predecir la profundidad de carbonatación sugeridas en el texto científico, donde sugieren la revisión de la ecuación que considera la profundidad de carbonatación proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, en conclusión los resultados mostraron que existe una alta correlación para la predicción basada en una tendencia lineal del avance de carbonatación a partir de pruebas aceleradas.

Yoris et al. (2010) Presentaron en el VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. Córdoba, Argentina el tema *Carbonatación del Hormigón Armado: Influencia de la Contaminación Ambiental Urbana* donde indican que la carbonatación es un proceso progresivo que avanza desde la superficie expuesta del hormigón hacia el interior, evaluando desde el punto de vista de su permeabilidad al aire y de la reserva alcalina la velocidad del,

avance del frente de carbonatación será menor en cuanto mejor sea la calidad del hormigón de recubrimiento. Por otro lado, describe que el óxido protector encerrado en los poros del hormigón, reduce lentamente su capacidad protectora debido a la carbonatación del hormigón que produce una reducción del pH de este medio, de valores de 12,5 (valor que define un medio fuertemente alcalino) a valores inferiores a nueve. Para que se produzca la reacción de carbonatación, es necesario el componente agua, siendo favorecedor una humedad comprendida entre 50 y 60 %. Cuando el concreto tiene sus poros capilares saturados o cuando la red se encuentra totalmente seca, el CO<sub>2</sub> no puede ingresar. El método de trabajo para la evaluación del avance de la carbonatación en ambientes urbanos, una serie de muestras corresponde “hormigones convencionales” expuestos en ambientes urbanos y la segunda al mismo estudio, pero de “hormigones celulares de espuma”. Para la evaluación se distribuyó las probetas en diferentes puntos de la ciudad, y periódicamente se realizó la medición de contaminantes en el ambiente y la determinación de parámetros de caracterización del hormigón. Para el análisis de contaminantes cada 15 días se midió las concentraciones de monóxido de carbono (CO), ozono troposférico (O<sub>3</sub>), hidrocarburos no metano (HCNM), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), material particulado en suspensión menor a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Los resultados se registraron pasado un tiempo de 24 meses de exposición, en algunas probetas elaboradas con el hormigón de razón a/c más elevada (a/c=0,65) y protegidas con la pintura de base poliuretánica se evidenciaron penetraciones puntuales cercanas a los poros de mayores dimensiones.

Yoris et al. (2010) Este comportamiento obedece y resulta coherente con las recomendaciones de aplicaciones vertidas por algunos autores que indican que requieren un sustrato de aplicación homogéneo y liso con aberturas o poros de dimensión no mayor a 0,1 mm. El contenido de cloruros totales en los hormigones no superó en ninguno de los casos el 0,7 % referido a la masa de cemento en el hormigón. El avance de la carbonatación resulta más rápido en los hormigones tipo B ( $a/c=0,65$ ) que en los hormigones de tipo A ( $a/c=0,45$ ) debido a que aumenta el volumen de poros capilares y, por lo tanto, la permeabilidad del material al agua y a los gases. Llegando a la conclusión que la exposición de concretos convencionales en ambientes urbanos poco industrializados (como la ciudad de Santa Fe, con baja concentración de CO) no produce una variación significativa en la velocidad del avance del frente de carbonatación. Donde sí reflejada variación es en la exposición de hormigones celulares de espuma, produciéndose un incremento visible en la velocidad de avance del frente de carbonatación en sectores con mayor concentración de CO. Se recomienda que, este comportamiento debería ser estudiado en ambientes urbanos con mayor concentración de emisiones de CO<sub>2</sub> y/o contaminación atmosférica. El avance del frente de carbonatación tiende a ser más rápido en concretos protegidos del humedecimiento periódico por lluvias. La aplicación de pinturas acrílicas y poliuretánicas resultan efectivas como barreras de anticarbonatación, no obstante, se requieren evaluaciones más prolongadas a fin de determinar la durabilidad de los mismos y el análisis de otros de tipos de pinturas.

García (2011) En la universidad de Complutense de Madrid realizó su tesis doctoral *carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH.*

García (2011) Las propiedades de durabilidad del concreto armado son consecuencia de la acción protectora que el concreto ejerce sobre el acero, con la funcionalidad de una barrera física que dificulta el ingreso de agentes agresivos, la alta alcalinidad del concreto es debida principalmente a los hidróxidos de calcio sodio y potasio desarrollando una capa pasiva. Cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en una de estas fases se denomina carbonatación, la cual si llega a alcanzar la armadura puede dar lugar a la destrucción de la capa pasiva del acero, para desarrollar este trabajo se fabricaron muestras con pastas de cemento morteros los cuales se sometieron a diferentes procesos de carbonatación natural, acelerada y supercrítica, las técnicas de caracterización utilizadas han sido análisis térmico gravimétrico, indicador de pH fenolftaleína, difracción de rayos x, difracción de neutrones medidas de peso microscopia electrónica de barrido poro simetría de intrusión de mercurio y análisis de reacción nuclear resonante. Los resultados de la comparación entre procesos a diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub> y distintas HR, ha aclarado las equivalencias entre carbonatación natural y acelerada en cuanto a la absorción de CO<sub>2</sub> y sus cantidades máximas que absorben en carbonatación natural, entre 20 % y 30 % son similares a las que alcanzan en carbonatación acelerada al 100 % de CO<sub>2</sub> en HR entre 50 % y 75 % finalmente se concluye que la velocidad de absorción de CO<sub>2</sub> depende de la humedad relativa y de la concentración de CO<sub>2</sub> del ambiente de exposición; también indica que a mayores relaciones a/c dan lugares mayores profundidades del frente de cambio de pH; al aumentar la relación a/c aumenta la porosidad lo cual a su vez facilita la difusión del CO<sub>2</sub>, la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido en la zona de pH inferior a nueve no siempre es mayor en los hormigones de menor relación a/c.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

A nivel nacional no se ha encontrado antecedentes y específicamente relacionados con la evaluación del proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto, sin embargo, si se han desarrollado tesis relacionadas con el estado de corrosión que sufren las estructuras.

Molina (2009) *Monitoreo y diagnostico de estructuras de concreto armado afectadas por corrosión de cloruros* en su tesis resalta el proceso de carbonatación, es un fenómeno que se desarrolla de una manera invisible lenta al interior de la estructura, provocando al acero de refuerzo una pérdida de sección y por ende una pérdida en la capacidad estructural, se ha reconocido un mecanismo de corrosión principalmente por cloruros, mediante el cual se ha generado la mayoría de daños en las diferentes estructuras que están cerca al ambiente marino. Para realizar la investigación se empleo la utilización del equipo “Concrete Corrosión Mapping System”, realizando un monitoreo a los elementos estructurales de la cimentación de un tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico, los elementos que se analizaron son 3 placas de cimentación y la platea de cimentación alrededor de estas placas; se inicio con un mapeo de las diferencias de potenciales del acero de refuerzo embebido en las estructuras en estudio con el equipo “Concrete Corrosión Mapping System, se hizo la extracción en áreas donde la probabilidad de corrosión es alta con testigos diamantinos de 3” con los que fueron objeto de una serie de ensayos (resistencia a la compresión del concreto, peso unitario del concreto endurecido, determinación química del pH del concreto, profundidad de carbonatación, determinación de concentración de cloruros y perfil de penetración de concentración de cloruros y sulfatos, perfil de penetración de sulfatos).

Molina (2009) Como resultado de estos se selecciono un un método para controlar la corrosión en las áreas aún no afectadas, así como escoger un método de reparación de las zonas afectadas por corrosión. Considerando un concreto en buen estado a aquellos que presenten un pH en el rango de 12 a 14, estos cumplirán con la función de protección del acero de refuerzo, en el caso de los elementos estructurales de este estudio los valores encontrados en todas las muestras no llegan al mínimo, lo quiere decir que el concreto perdió la característica de protector del acero de refuerzo ante cualquier ataque. Concluyendo que no se encontró presencia de carbonatos en los testigos extraídos, ya que al aplicar la sustancia de fenolftaleína toda el área se tornó púrpura que indica la no presencia de carbonatos.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Escala de pH**

Akopova (2016) La Norma La norma UNE 112011:2011 "Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio" describe que aplicando el ensayo de disolución de fenolftaleína como resultado se observa que toma color rojo púrpura para valores superiores a 9,5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora para valores inferiores a ocho (hormigón carbonatado). Para valores entre ocho y 9,5 toma tonalidades entre rosa y rojo púrpura. En la figura 1 se puede ver los valores de pH ácido pH neutro y un pH ácido y en la figura 2 esta graficada la escala de colores con el indicador de la fenolftaleína.

Para poder identificar si una sustancia es ácida, básica o si es neutra se utiliza lo que se conoce como indicador ácido-base un indicador que se utiliza mucho en química es el indicador fenolftaleína (Luisa, 2014).

Rivva (2014) Hace referencia al investigador Kashino quien encontró que la corrosión podía empezar cuando el frente de carbonatación indicado por las pruebas de fenolftaleína se encontraba de 6 mm a 8 mm del acero. Esto haría presumir que a pesar que este indicador registra el pH cerca a nueve, la corrosión del acero podría empezar a un pH mayor que aquel que indica la carbonatación, la presencia de cloruros también podría agravar el problema de la corrosión.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \dots\dots\dots [\text{Ecuación 1}]$$

$$\text{pH} = \log \frac{[1]}{[\text{H}^+]} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 2}]$$

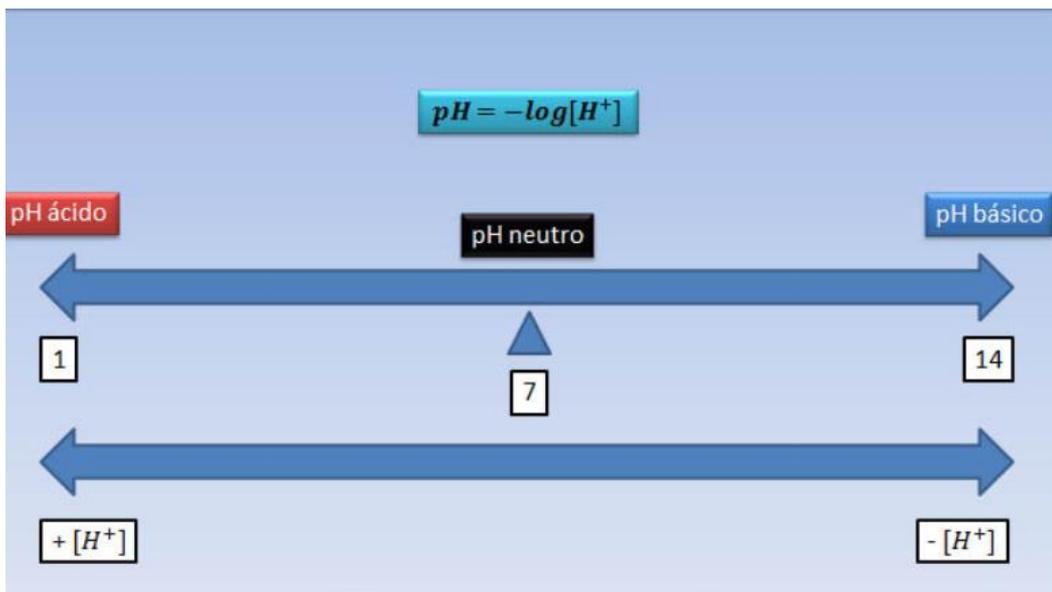


Figura 1. Escala de pH  
Fuente: Rodríguez, 2017

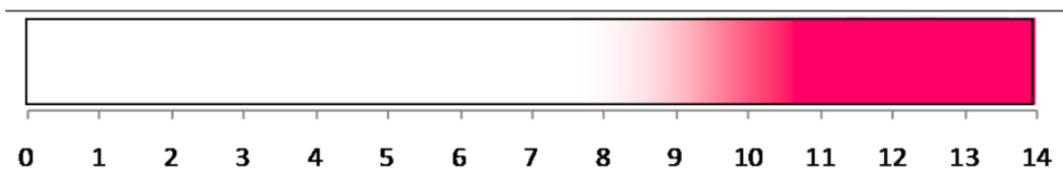


Figura 2. Escala de colores con el indicador de la fenolftaleína  
Fuente: Luisa, 2014

### **2.2.2. Ph del concreto**

Rivva (2014) La disminución del pH debida a la carbonatación se convierte en un problema porque el concreto con su ambiente altamente alcalino (rango de pH 12 a 13) protege al acero de refuerzo contra la corrosión. El pH del área carbonatada se reduce a menos de 9.5 pudiéndose destruir la película protectora en presencia de humedad y oxígeno, permite que el acero se corra. A la vez el pH reducido desestabiliza lentamente los silicatos de calcio hidratado y otros hidratos del cemento algunos de los cuales son convertidos en hidróxido de calcio adicional que estará disponible para mayor carbonatación. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13 se requieren aproximadamente de 7000 a 8000 ppm de cloruros para comenzar la corrosión del acero embebido. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11 el umbral del cloruro para la corrosión es significativamente menor 100 ppm o menos.

### **2.2.3. Concreto**

Castillo (1996) Define al concreto como una mezcla de cemento portland, agregado fino, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia.

Concreto = Cemento portland + Agregados + Aire + Agua

Pasta = Cemento + Agua

#### ***2.2.3.1. Cemento portland.***

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio, se fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la

pasta a los agregados actúa como adhesivo y une los agregados para formar el concreto el material más versátil y más usado en el mundo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese y Tanesi, 2004).

El cemento tipo HE es el que se utiliza en el diseño de mezcla del Concreto  $f'c = 45$  Mpa para el vaciado de los muros del canal del túnel del río Asana, la principal característica es que proporciona alta resistencia en edades tempranas, es un producto fabricado a base de Clinker de alta calidad, puzolana natural de origen volcánico de alta reactividad y yeso, la composición de este producto permite la producción de concretos con requerimientos de alta resistencias iniciales, otorgando propiedades adicionales para lograr alta durabilidad (Yura, 2013).

#### *2.2.3.1.1. Compuestos químicos que forman el cemento portland.*

Castillo (1996) indica que el cemento es una mezcla de muchos compuestos, resulta impráctica su representación con una formula química. No obstante, hay cuatro compuestos que constituyen más del 90% del peso del cemento y son:

- Silicato tricálcico  $3CaO \cdot SiO_2 = C_3S$
- Silicato dicálcico  $2CaO \cdot SiO_2 = C_2S$
- Aluminato tricálcico  $3CaO \cdot Al_2O_3 = C_3A$
- Aluminio ferrita tricálcica  $4CaO \cdot Al_2O_3Fe_2O_3 = C_4AF$

La composición del cemento es importante para entender los estados del concreto y su desempeño, están basados en una variedad de reacciones químicas que se desarrollan, permitiendo que los constituyentes del cemento fragüen y endurezcan, obteniendo así las propiedades deseadas. Las reacciones químicas ocurridas durante la hidratación del clinker determinan la microestructura del

concreto en estado endurecido es químicamente reactivo, por lo tanto es necesario diseñar mezclas de concreto y construir estructuras de una forma tal que se permitan controlar o compensar la reactividad química (Arango, 2015).

En presencia de agua los compuestos cristalinos anhídros que constituyen el cemento, se hidratan produciéndose una cristalización, con un desprendimiento mayor o menor de calor en función del tipo de cemento (San Juan y Castro, 2001). Estos compuestos se combinan con el agua y reaccionan químicamente formando nuevos compuestos los cuales son la infraestructura de la pasta endurecida en el concreto, los silicatos de calcio,  $C_3S$  y  $C_2S$  se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado. El  $C_3A$  reacciona con el agua en hidróxido de calcio para formar aluminato tetracalcico hidratado. El  $C_4AF$  reacciona con el agua para formar (ferroaluminato de calcio hidratado. El  $C_3A$ , sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese y Tanesi, 2004). Las características del concreto utilizado se describe a continuación Concreto  $f'c = 45$  Mpa Cemento Yura Tipo HE, Huso 67, Slump 6"- 8", con microsílíce al 5 %, mantención de 2 horas, con mayor detalle se describe en la tabla 2 y tabla 3.

**Tabla 2**

*Características del concreto  $f'c = 45$  Mpa*

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Relación agua/cemento.	0,36
Relación de finos.	0,5
Módulo de combinación.	5,04
Porcentaje Microsilíce (%)	5
Porcentaje Aditivo Neoplast 8500HP (%)	0,85
Porcentaje Aditivo Euco WR75 (%)	0,85

Fuente: CME, 2018

**Tabla 3***Materiales del concreto  $f'c = 45 \text{ Mpa}$* 

<b>Materiales</b>	<b>Peso (Kg).</b>
Cemento HE.	460
Agua.	179
Arena.	838
Piedra H67 Chancada.	845
Porcentaje Aditivo Neoplast 8500HP (%)	23
Porcentaje Aditivo Euco WR75 (%)	4,11

Fuente: CME, 2018

### 2.2.3.2. Agua.

El agua a emplear en las mezclas de concreto deberá ser limpia y libre de impurezas perjudiciales. Se considera adecuada el agua apta para consumo humano. El PH según las normas D-1293 no podrá ser inferior a siete, en aguas no potables se mantendrá la composición en los siguientes valores máximos de la tabla 4. (Rivva, Ataques al concreto, 2014) y en la tabla 5 indica los límites máximos permisibles de la calidad física y química del agua para su consumo teniendo como parámetro del pH del agua entre (6,5-8,5) (Ministerio de Salud, 2011).

Las aguas blandas, es decir aquellas que tengan pocas impurezas (aguas libres de sales, aguas de condensación industrial; aguas de fusión de glaciares, nieve o lluvia; algunas aguas de pantano o subterránea), disuelven los compuestos cálcicos del concreto de igual manera que los ácidos; y por lo tanto, el resultado es la descomposición y lixiviación de la pasta endurecida. La lixiviación produce una apariencia arenosa en las superficies expuestas de concreto de los revestimientos de los canales canalones o tuberías. Si el agua pasa a travez de grietas o juntas, la lixiviación también puede erosionar el concreto interno (Rivva, 2014).

**Tabla 4***Valores máximos de la composición del agua potable*

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>
Cloruros	300 pmm
Sulfatos	150 pmm
Sales de magnesio	125 pmm
Sólidos en suspensión	300 pmm
PH mayor de	7
Materia orgánica	10 pmm

Fuente: Rivva, 2014

**Tabla 5***Límites máximos permisibles de calidad física y química del agua para consumo*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>L.M.P</b>
Turbiedad	NTU	5
pH	Valor de pH	6.5 – 8.5
Conductividad	uS/cm	1500
Sólidos totales disueltos	mg/l	1000
Cloruros	mg/Cl	250
Sulfatos	mg/SO4 -	250
Dureza total	mg/CaCO3	500

Fuente: Ministerio de Salud, 2011

### 2.2.3.3. Agregados.

Los agregados ocupan entre el 59 % y el 76 % del volumen de la mezcla. Pueden ser naturales o artificiales; fino o grueso. Se consideran un llenante de las mezclas que controlan el cambio volumétrico de la pasta e influye sobre muchas de las propiedades del concreto los agregados deberán cumplir con la norma NTP 400.037 que se complementaran con los de las especificaciones de obra. (Rivva, 2014).

#### 2.2.4. Carbonatación

La carbonatación se produce por un descenso en la alcalinidad del hormigón que puede ser debido a un “deslavado” por circulación de agua puras o ligeramente ácidas o por reacción de los componentes de carácter básico (Babiche , 2004)

La carbonatación en el concreto es la perdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral (Montani, 2000).

Campos, Fajardo, y Mendoza (2016) afirman que la carbonatación es un fenómeno natural, es una reacción química la cual sucede entre a portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico (como lo citó Neville et al,1993). La portlandita, está presente como producto de la hidratación de los componentes del cemento portland (CP) como el silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) y silicato ( $\text{C}_2\text{S}$ ) (como lo citó Neville et al, 2007)

##### 2.2.4.1. *Proceso de carbonatación.*

Fases del proceso de carbonatación (Montani, 2000) explica el proceso de carbonatación en 3 fases.

Fase 1: Los poros normales de concreto contienen

Agua y cal libre



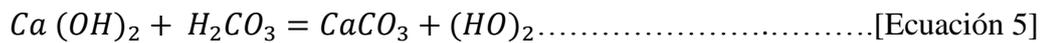
Fase2: Cuando el dióxido de carbono en el aire entra en los poros de concreto, se forma.

Dióxido de carbono + agua =ácido carbónico



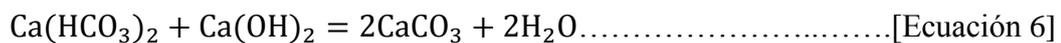
Fase 3: El ácido carbónico neutraliza la cal libre (hidróxido de calcio) y forma un carbonato de calcio solido con un PH neutral

Cal libre + ácido carbónico = carbonato de calcio + agua



Alto pH                      Bajo pH                      pH Neutro

Valdez, Durán, Fajardo, y Juárez (2009) Desarrolla la ecuación donde constata que es necesaria la presencia de una cantidad libre de  $CO_2$  para mantener el equilibrio, no obstante si la cantidad de  $CO_2$  libre existente es mayor que la correspondiente de equilibrio, se rompería el equilibrio y se podría disolver más cal provocando que el agua se transforme en agresiva. Sobre la superficie del concreto existe  $CaCO_3$  como consecuencia de la reacción del  $CO_2$  de la atmosfera  $Ca(OH)_2$  el cual disminuye la permeabilidad. Sin embargo, en presencia de una elevada humedad y  $CO_2$  agresivo, se efectuará la reacción.



Valdez et al. (2009) El carbonato de calcio obstruyendo los poros, pero después está atacando nuevamente por el agua agresiva constituyéndose un proceso dinámico. El agua con  $CO_2$  agresivo puede aparecer en aguas subterráneas embalses, etc. El agua que contiene mas de 20 ppm de  $CO_2$  puede generar una carbonatación rápida de la pasta de cemento hidratada.

**2.2.4.2. Factores que intervienen en la carbonatación.**

Calvo y Sierra (2015) en su trabajo de investigación explica que el proceso de carbonatación ataca a toda masa de concreto por ser este un fenómeno totalmente

natural, lo que puede variar es los efectos en función a variables físicas y químicas que intervienen en el proceso de la carbonatación, la porosidad, relación agua cemento, humedad relativa, grado de exposición las asocia como variables físicas y las variables químicas tales como composición de la pasta del cemento o adiciones como uso de puzolanas, cenizas volantes o humo de sílice.

#### *2.2.4.2.1. Factores físicos.*

##### *a. Relación A/C.*

La razón de tener relaciones a/c muy altas favorecen al proceso de carbonatación es que se aumenta la permeabilidad de los concretos (Pérez, 2010).

Un concreto permeable puede carbonatarse rápidamente, para esto basta la pequeña concentración de CO<sub>2</sub> (0,03 %) presente en la atmósfera. Cabe señalar que esta concentración puede incrementarse en lugares específicos, tales como estacionamientos con poca ventilación, túneles, cierto tipo de industrias, laboratorios, etc., que acentuará el fenómeno (Valdez, Durán, Fajardo y Juárez, 2009).

##### *b. Porosidad.*

El agua siendo la más liviana sube, entonces se evapora y se exprime en todas las direcciones, como el agua ocupa espacios de la mezcla, esta deja muchos huecos entrecruzados en todas las direcciones, estos espacios huecos se atan entre si creando lo que se llama porosidad (Lopez, 2004).

##### *c. Humedad Relativa.*

Campos, Fajardo, y Mendoza (2016) define la humedad relativa (HR) ambiental como un factor importante para la progresión de la carbonatación, con mayor rapidez en el intervalo de 50 – 70 % (Tuutti, 1982) a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono. En la Tabla 6, se muestran los valores que favorecen el avance de la carbonatación.

**Tabla 6**

*Los efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación*

<b>Humedad Relativa en % (H.R.)</b>	<b>Proceso de Carbonatación</b>
H.R. > 70	Evita el ingreso de CO <sub>2</sub>
50 < H.R. < 70	Avanza rápidamente
H.R. < 50	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO <sub>2</sub>

Fuente: Tuutti, 1982

Molina (2009) si los poros están completamente saturados como se muestra en la figura 4 se habla de una leve carbonatación debido a la baja solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua; solo cuando los poros se encuentran parcialmente llenos de agua (HR entre 50 y 80 %) como se muestra en la figura 5 son cuando se dan las condiciones óptimas para la carbonatación.

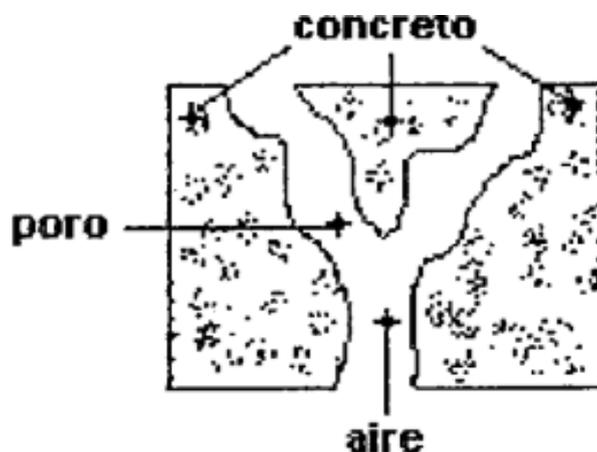


Figura 3. Humedad del concreto- poro seco

Fuente: Molina, 2009

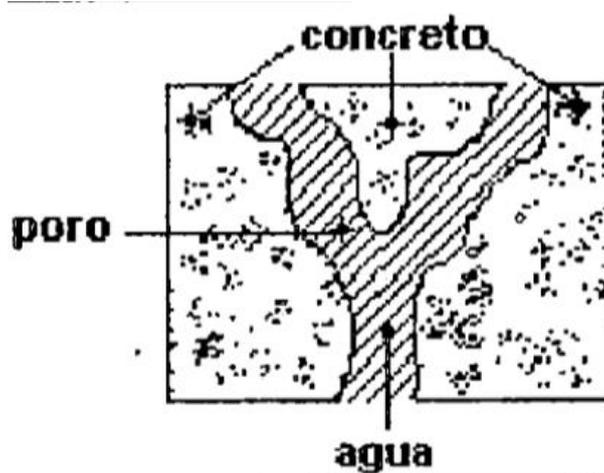


Figura 4. Humedad del concreto - poro saturado

Fuente: Molina, 2009



Figura 5. Humedad del concreto - poro parcialmente lleno

Fuente: Molina, 2009

*d. Grado de exposición.*

Es el medio al que está sometida la estructura y está directamente correlacionado a la durabilidad y buenas prácticas de construcción, entre los diferentes grados de exposición tenemos ambientes marinos, acción de congelación y descongelación del hielo, fuertes vientos, exposición a sustancias químicas entre otros (Calvo y Sierra, 2015).

#### 2.2.4.2.2. Factores químicos.

(Rivva, 2014) el ataque de agentes químicos casi siempre ocurre cuando estos están en solución. Pues que estas soluciones pueden penetrar profundaente en el concreto, la producción de alta calidad y baja permeabilidad es la primera defensa.

Arango (2015) dependiendo de la composición del concreto y las condiciones de exposición una variedad de posibles reacciones químicas podría deteriorar el concreto. Algunas veces, sin embargo, el enemigo no está solamente afuera del elemento, por el contrario las semillas destructivas pueden estar contenidas inocentemente dentro del concreto como por ejemplo:

- Composición de la pasta del cemento.
- Adiciones como uso de puzolanas.
- Cenizas volantes.
- Humo de sílice.

(Rivva, 2014) Como ya se ha indicado, la pasta no carbonatada tiene un pH mínimo de 12,5 y el acero de refuerzo no se corroe en esta condición por la presencia de una película pasivamente microscópica de óxido que evita su disolución anódica. No obstante, si el pH disminuye a menos de 10 por la acción de efectos como la carbonatación, la corrosión puede iniciarse. La carbonatación puede disminuir el pH a niveles de ocho a nueve resultando en corrosión del acero cuando están presentes la humedad y los iones cloruros disueltos en agua en niveles por encima del 0,2% relativos a la masa del cemento, lo cual acelera la corrosión. La corrosión puede iniciarse por la acción de iones cloruro sobre el acero de

refuerzo, aun en ambientes con un ph superior a 10 u 11, aunque estos casos se relacionan con agregados, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto.

#### **2.2.4.3. Efectos de la carbonatación.**

Molina (2009) para entender el efecto final de la carbonatación es necesario entender como inicia; empieza cuando el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) contenido en el aire penetra en las aberturas capilares del concreto y se combina con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio

(Campos, Fajardo, y Mendoza, 2016). Por consiguiente, la alcalinidad del concreto que en principio correspondía a un valor de pH de 12 a 14 se reduce poco a poco, si el valor del pH llega a valores inferiores a 9,5 la alcalinidad ya no es suficiente para mantener pasiva la capa de óxido protectora de las armaduras de acero, por lo tanto, bajo la acción de la humedad y del oxígeno, el efecto de corrosión puede comenzar.

Olivares (2013) El inicio del proceso de corrosión afecta la capacidad portante de la estructura, como se muestra en la Figura 6, ya que esta produce: pérdida en la adherencia concreto/acero, pérdida de ductilidad del acero, pérdida de sección del acero, fisuración del recubrimiento y su posible desprendimiento, etc.

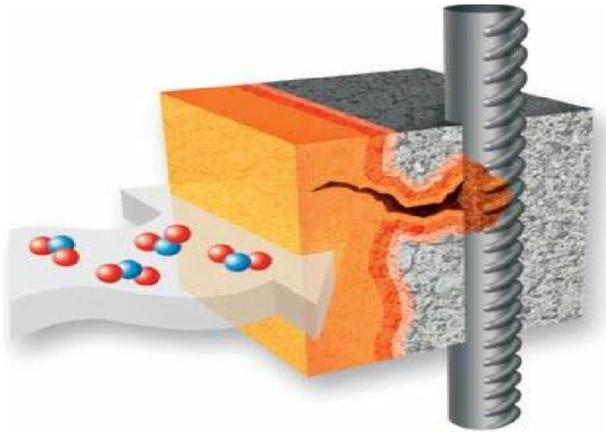


Figura 6. Representación de la carbonatación  
Fuente: Marchena, 2017

*a. Fisuración y la corrosión de las armaduras.*

Olivares (2013) Menciona que las grietas que aparecen en el concreto son un rápido camino para la penetración de los agentes agresivos hasta llegar a la armadura. Cuando estos agentes agresivos ingresan por la fisura y alcanzan la armadura, se empieza a corroer la zona no recubierta de concreto que actúa como ánodo frente a las adyacentes que se comportan como cátodo. Las fisuras pueden presentarse de forma transversal o longitudinal, siendo estas últimas mucho más perjudiciales porque abarcan mayor superficie de acción. Las normativas establecen un ancho máximo admisible de las fisuras en la superficie de concreto y que se sitúa entre 0,3 mm y 0,4 mm para ambientes no agresivos y en tan solo, 1 mm para ambientes agresivos. Pero también se ha demostrado que no existen diferencias muy importantes en el comportamiento de las fisuras siempre que estas tengan anchos inferiores a 0,4 mm, puesto que las fisuras se obstruyen con los propios productos de la corrosión.

Santiago (1984) indica que dos son las causas principales del desencadenamiento de un proceso de corrosión en las armaduras: la neutralización

o carbonatación del hormigón y la presencia de cloruros en la superficie de los redondos. La primera de las causas mencionadas implica una reacción de los elementos alcalinos del cemento solubles en agua con las sustancias ácidas del medio ambiente ( $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  principalmente). Esta reacción lleva a que los elementos alcalinos del H líquido encerrado en los poros del hormigón se neutralicen para dar sales más agua, y el pH evolucione desde valores de alrededor de 13 a otros cercanos a la neutralidad (pH - 7-8). En estas circunstancias el acero se corroe libremente, generando una serie de óxidos expansivos que empujan al hormigón del recubrimiento hasta fisurarlo en la mayoría de las ocasiones. Esta neutralización (carbonatación cuando la sustancia ácida es el  $\text{CO}_2$  atmosférico), progresa desde la superficie exterior del hormigón hacia el interior. Cuando existen fisuras, esta reacción se produce también en los labios de las mismas. Mientras el frente general de avance de la carbonatación puede estar muy lejos de la armadura, en las zonas de las fisuras, se genera una pequeña área donde el hormigón está neutro. En esta zona el acero se comienza a oxidar, los óxidos que se generan pueden simplemente obturar la fisura, en especial si esta es estrecha, y el proceso de corrosión se detiene, o bien pueden generarse de tal forma que empujen al hormigón y amplíen la anchura de la fisura, multiplicando los daños progresivamente. En la figura 7 se puede observar cómo se da el avance del frente de carbonatación en la zona de una grieta. En la tabla 7 podemos observar la clasificación de daños materiales para una inspección de estructuras de concreto.

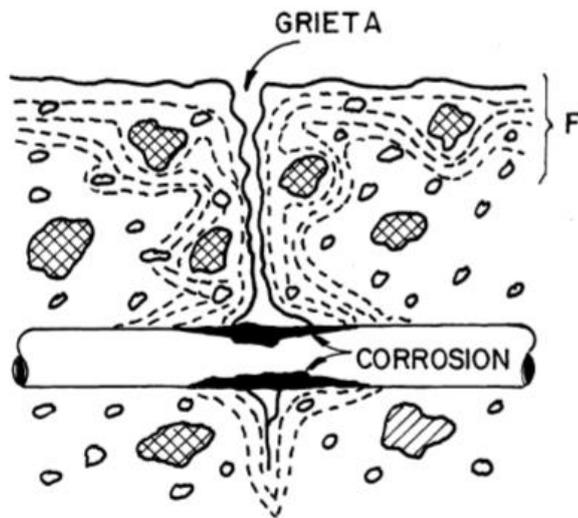


Figura 7. Esquema del avance de frente de carbonatación  
Fuente: Marchena, 2017

(Halvorsen y Poston, 1993) Para la determinación de la ubicación y magnitud de la fisuración del concreto se pueden determinar mediante observaciones directas e indirectas, ensayos no destructivos y destructivos, y ensayos de testigos extraídos de la estructura.

**Tabla 7**

*Calificación de daños materiales*

Parámetros	Calificación			
	Despreciable 1	Bajo 3	Moderado 6	Alto 9
Ancho de fisuras o desprendimiento en lajas	Sin fisuras	< 0,3mm		
Importancia de la corrosión	sin corrosión	Ligera: Óxido superficial	Ligera: Óxido en capa fina	Ligera: Óxido en capa gruesa
Perdida de corrosión	≤ 1 %	> 1 %-5 %	> 5 %-10 %	>10%

Fuente: (Belenguer et al, 2005)

Halvorsen et al. (1993) Los anchos de las fisuras también se pueden estimar utilizando una tarjeta de comparación, que es una tarjeta con líneas claramente marcadas, cada una de ellas de un ancho especificado, un ancho límite de fisura de

0.30 mm es satisfactorio respecto a la apariencia y durabilidad de la estructura. Cuando se superan estos márgenes de ancho de fisura permitidos (tabla 4.1 del ACI 224R-01) tabla 8 y cuando hay peligro de que entren los agresores comunes del medio ambiente hacia el interior de la estructura, se debe planear una inyección completa de la estructura.

**Tabla 8**

*Guía de anchos de fisuras razonables hormigón armado bajo cargas de servicio*

Condición de exposición	Ancho de fisura	
	in.	mm
Aire seco o membrana protectora	0,016	0,41
Humedad, aire húmedo, suelo	0,012	0,30
Productos químicos descongelantes	0,007	0,18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0,006	0,15
Estructuras para retención de agua	0,004	0,10

Fuente: Halvorsen et al, 1993

Nota: Es de esperar que una parte de las fisuras de la estructura superarán estos valores. Con el tiempo, el porcentaje de fisuras de la estructura superaran estos valores puede ser significativo. Estos son lineamientos generales para el diseño, que se deben utilizar juntamente con un sólido juicio profesional. Excluyendo tuberías de presión

*b. Carbonatación y otros factores que afectan la durabilidad del concreto armado.*

(Rivva, 2014) Cuando la carbonatación frontal alcanza el acero de refuerzo puede ocurrir una despacividad en grandes áreas o en toda la superficie de acero, pudiendo darse inicio a la corrosión. El ingreso de gases es mayor en humedades relativas bajas, pero la reacción entre el gas y la pasta toma lugar en la solución y es mayor en humedades mayores. El ambiente mas agresivo para la neutralización del concreto será el de ciclos alternos de humedecimiento y secado y el de altas temperaturas. Bajo condiciones constantes, la humedad relativa del ambiente en un 60 % es la más favorable para la carbonatación, otros factores que influyen el

tiempo de iniciación de la corrosión por carbonatación son un recubrimiento delgado, la presencia de grietas, y una alta porosidad asociado con un factor bajo de cemento y una relación a/c alta. El contenido de cloruros en el frente de carbonatación alcanza niveles mucho mayores a los concretos no carbonatados y puede ser mucho mayor que los niveles medidos justo bajo la superficie de concreto, esto incrementa el riesgo de que se inicie la corrosión cuando la carbonatación alcanza el acero. La reducción del pH en el concreto carbonatado también incrementa el riesgo de corrosión debido a la concentración de cloruros necesaria para iniciar la corrosión disminuye con el pH, cuando los cloro aluminatos se rompen, liberando los cloruros encerrados a medida que el pH disminuye.

San Juan y Castro (2001) Los iones sulfato reaccionan con los aluminatos cálcicos hidratados del Clinker de cemento portland formando la sal de etringita o etringita ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) que es muy soluble en agua y provoca con un gran aumento de volumen del orden del 250 % en relación con los reactivos iniciales. Esta expansión produce grandes tensiones internas, que por lo general no pueden ser absorbidas por el material y desencadena una serie de fisuras y desprendimientos superficiales de material. Se pueden distinguir tres tipos de etringita las primarias, que no produce daños, la secundaria que se produce por una recristalización de etringita primaria y la diferida (DEF) que produce daños por expansión conocidos como degradación por formación de etringita. Un estudio estadístico sobre las causas que producen problemas de durabilidad en estructuras de concreto, que tratan de dar una idea de la situación española a principios de los años 80, en los que se atribuye el fallo a defectos en la calidad de los materiales un 16,2 %, siendo los errores de ejecución el 38,5 % y más del 40 % a errores de diseño

y/o cálculo otros estudios más recientes elevan al 30 % la inadecuada selección del material como la causa de falta de durabilidad esto da una idea de la importancia que tiene la buena selección de los materiales ya desde la fase misma de proyecto, la ejecución y su control son primordiales para asegurar una durabilidad adecuada, ya que una mala puesta en obra puede conducir a un concreto poco durable aún habiendo sido fabricado con materiales de elevada calidad. La composición, elaboración y curado del concreto determinan la calidad del concreto debido a la influencia esencial que tienen sobre la estructura porosa y la permeabilidad, sin olvidar que la relación agua/cemento juega un papel primordial. En la figura 8 se esquematiza los factores que influyen en la durabilidad del concreto.

## DURABILIDAD

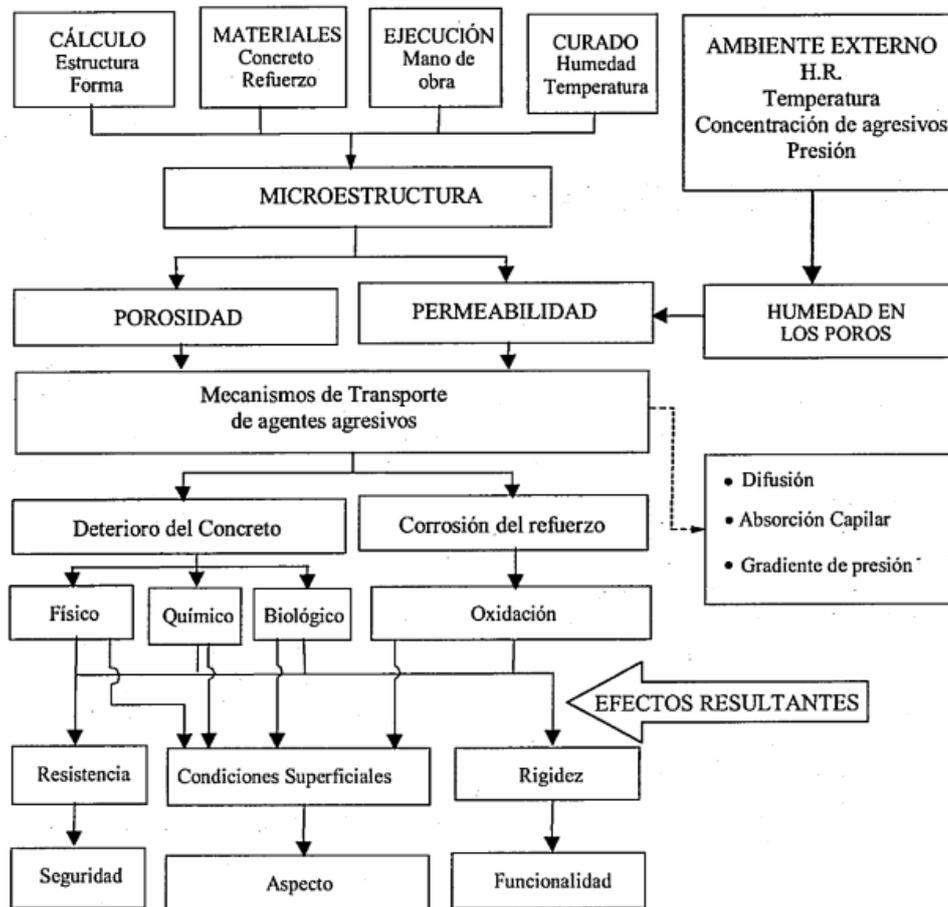


Figura 8. Causas que producen problemas de durabilidad

Fuente: Sanjuán y Castro , 2001

### 2.2.4.4. Método de ensayo de la fenolftaleína.

Akopova (2016) La norma UNE 112011:2011 describe el método de ensayo para determinar la profundidad de carbonatación en concretos endurecidos y puestos en servicio, la medida de la profundidad de la capa carbonatada en los concretos se basa en la determinación de la alcalinidad que supone la carbonatación, lo que se puede observar por los cambios de coloración utilizando un indicador de pH.

Indicador: se utiliza una disolución de fenolftaleína al 1 % disuelta en alcohol etílico al 70 %. Para preparar 100 cm<sup>3</sup> de indicador, se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm<sup>3</sup> de alcohol etílico del 96 % de pureza y se añaden después

30 cm<sup>3</sup> de agua destilada. La fenolftaleína toma un color rojo- púrpura para valores de pH > 9,5 y se vuelve incolora en valores inferiores a ocho, caso de hormigón carbonatado. Para valores entre ocho y 9,5 toma una tonalidad entre rosa y rojo-púrpura (Akopova, 2016).

Dispositivo de medida: puede utilizarse cualquier dispositivo con una precisión de 0,5 mm. Medida de la profundidad de la carbonatación: La profundidad de la capa carbonatada puede variar con el tiempo transcurrido de espera en una serie de muestras. Se recomienda la lectura de medidas entre 15 y 30 minutos después de aplicar el indicador. La precisión será de 0,5 mm (Akopova, 2016).

#### **2.2.4.5. Modelos de predicción de la carbonatación.**

Gaspar y Muñoz (1977) hace un estudio crítico de las fórmulas empíricas más o menos simplificadas, que han sido expuestas por diferentes autores, a fin de calcular el tiempo (t), necesario para que se carbonate un determinado espesor de hormigón (x), entre las que cabe destacar las siguientes.

##### **2.2.4.5.1. Expresión de Verbeck:**

$$x(\text{cm})Kt^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 7}]$$

$K = 0,5$  (años).

##### **2.2.4.5.2. Expresión de Josiel**

$$x(\text{cm}) = 0,05t^{\frac{1}{2}}(\text{días}) \dots \dots \dots [\text{Ecuación 8}]$$

##### **2.2.4.5.3. Expresión de Kishitani:**

$$\text{Para } \frac{a}{c} \geq 0,6 \quad t(\text{años}) = \frac{0,3(1,15+3\frac{a}{c})}{R^2(\frac{a}{c}-0,25)} x^2(\text{cm}) \dots \dots \dots [\text{Ecuación 9}]$$

$$\text{Para } \frac{a}{c} < 0,6 \quad t(\text{años}) = \frac{7,2}{R^2(4,6\frac{a}{c}-1,76)} x^2(\text{cm}) \dots\dots\dots[\text{Ecuación 10}]$$

R es una característica de cada tipo de cemento variando de 0,2 a 6,4

2.2.4.5.4. *Expresión de Hamada:*

Marchena (2017) (como se citó la Formula internacional de Hamada, 1968).

Relación a /c

$$w = a/c \dots\dots\dots[\text{Ecuación 11}]$$

- Constante k (años/cm<sup>2</sup>)

$$k = \frac{0,3(1,15+3w)}{(w-0,25)} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 12}]$$

- Valor de R

$$R = rcxra_xrs \dots\dots\dots[\text{Ecuación 13}]$$

R=1x1x1=1

- Factor K (cm/raíz años)

$$K(\text{cm}) = \sqrt{R^2/K} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 14}]$$

- Profundidad de Carbonatación (cm)

$$x = K\sqrt{t} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 15}]$$

Tiempo t = tiempo ( años) y ra, ra, rs, se obtienen de la tabla 9

Tipos de Cemento	Cemento Portland		Cemento Siderúrgico		Cemento puzolánico	Cemento con ceniza volcánica  (20%)
	Corriente	Alta Resistencia	30-40% Escoria	60% Escoria		
$r_c$	1.0	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9

Tipos de agregados	Arena de río, grava de río.	Arena de río, grava de pumicita	Arena de pumicita, grava de pumicita	Ceniza volcánica (fina, gruesa)
$R_a$	1.0	1.2	2.9	3.3

Terminación	Plana	AEA	Agente
Superficial		(incorporador de aire)	Dispersante
$r_s$	1.0	0.6	0.4

Figura 9. Fórmula internacional de Hamada  
Fuente: Hamada, 1968

#### 2.2.4.6. Carbonatación natural y acelerada.

Galán (2011) Indica que los procesos de carbonatación son muy lentos a causa del bajo contenido de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, del orden de 0,04 % en volumen, indicando que en concretos con dosificaciones muy densas los efectos del fenómeno de carbonatación pueden pasar varios años desde su puesta en servicio. Por lo que muchos investigadores usan porcentajes mayores de CO<sub>2</sub> de lo que naturalmente registra la atmósfera para tener resultados proyectados a largo plazo.

##### 2.2.4.6.1. Carbonatación natural.

La velocidad del proceso de carbonatación depende de varios factores directamente relacionados con las características agresivas del medio en contacto con la estructura, para ello se exponen probetas en el ambiente natural, realizando las

mediciones de los parámetros que intervienen en el proceso de carbonatación (Iloro, Traversa y Ortega, 2016).

#### *2.2.4.6.2. Carbonatación acelerada.*

Se proponen diferentes procedimientos para el método acelerado existiendo poco consenso en cuanto a la concentración de CO<sub>2</sub> y los parámetros higrotérmicos (HR, T) empleados como así también al tipo de curado, el estacionamiento y condicionamiento previo de las muestras antes de carbonatarlas y a las dimensiones y formas de las mismas las cámaras de carbonatación poseen diseños diferenciados en cuanto al tipo del material empleado para los gabinetes (Iloro, Traversa y Ortega, 2016).

### **2.2.5. Aspectos generales del proyecto túnel del río Asana.**

#### *2.2.5.1. Ubicación geográfica.*

CME (2013) en el *Plan de gestión de calidad* especifica que el Proyecto Quellaveco se encuentra a unos 37 km al noroeste de la ciudad de Moquegua en el sur del Perú, aproximadamente a 34 Km en línea recta de Moquegua a una elevación entre los 3,400 a 3,700 msnm. tiene como proyección una explotación del yacimiento a tajo abierto, ubicado en el cauce del río Asana, y para su explotación es necesario construir previamente una serie de obras para desviar el río Asana. Los caudales del río Asana son utilizados para riego en el valle de Tumilaca y comunidades aledañas, por lo que la explotación minera no debe alterar ni la cantidad ni la calidad de sus aguas, tanto durante la explotación de la mina hasta el cierre final de la mina. En la figura 10 podemos ver la ubicación del tajo de la mina como el depósito de roca estéril y el trazo del túnel Asana.



Figura 10. Ubicación del tajo, depósito de roca estéril y túnel del río Asana  
Fuente: AngloAmerican, 2013

## 2.2.5.2. Ingeniería del proyecto.

### 2.2.5.2.1. Aspectos técnicos del túnel de desvío.

El desarrollo del proyecto del túnel del río Asana, incluye también la ejecución de obras complementarias obras de ventilación, portal de entrada Pique, portal de salida, como se puede visualizar en la figura 11. En el interior del túnel se ejecuta un canal de concreto, un sistema de drenaje, sistema de impulsión y un sistema de instrumentación.

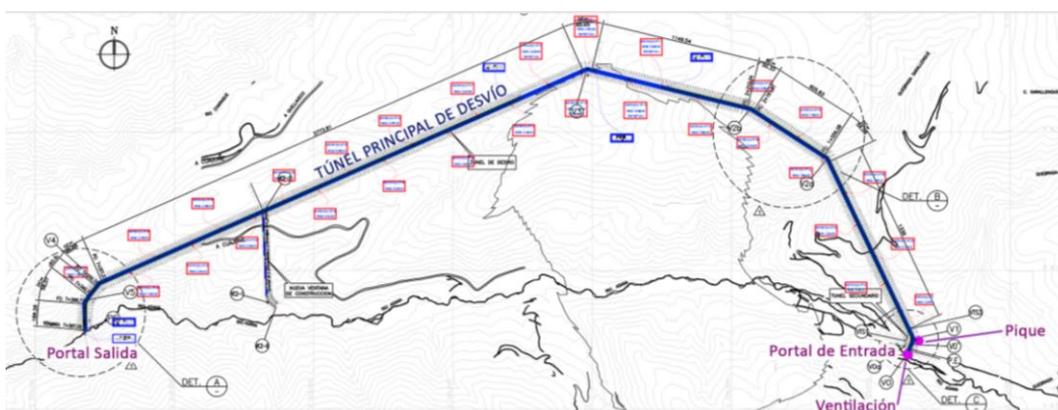


Figura 11. Ubicación de los trabajos en el túnel principal de desvío  
Fuente: CME, 2017

#### 2.2.5.2.2. *Geomorfología.*

Nina (2014) de la Universidad Nacional del Altiplano en su tesis *Estudio Geológico - Geotécnico del Proyecto Túnel de desvío Río Asana- Quellaveco – Moquegua*, describe la geomorfología del área de estudio. El área del proyecto está emplazada en el valle del río Asana, presentando una topografía cordillerana, característica del flanco andino, presentan cotas máximas entre 3,900 y 4,000 metros sobre el nivel del mar, las cuales contrastan con los 3,590 metros a los que se sitúa el río Asana. El río tiene su nacimiento en un valle glaciar situado en la cadena de conos volcánicos ubicados al este del área de estudio, escurre de oriente a occidente y corresponde a uno de los principales tributarios del río Tumilaca, el cual a su vez tributa al río Moquegua. El río Asana presenta un régimen torrencial, cuyos eventos principales de escorrentía se producen con las lluvias estacionales.

#### 2.2.5.2.3. *Geología del proyecto.*

Nina (2014) da a conocer la geología del área de estudio describiendo rocas más antiguas, de edad Cretácico-Terciario, corresponden a tobas líticas riódacíticas, en parte soldadas, pertenecientes a la unidad Volcánico Paralaque y riolitas porfíricas de la unidad denominada pórfidos Quellaveco. Estas unidades afloran principalmente al oeste de la zona mineralizada en el sector de Tala, constituyen una secuencia de aproximadamente 220 metros de color pardo grisáceo rojizo para las tobas y gris claro para las riolitas. Para efectos de este trabajo, ambas unidades se agrupan y toman la denominación de Riolita Asana. Se debe hacer mención que el tramo final del túnel y el portal de salida se encuentran proyectados sobre las rocas de la unidad Volcánico Paralaque, esta unidad no ha sido reconocida en el

entorno de la barrera de desvío. El Túnel de Desvío se emplaza desde aguas arriba hacia aguas abajo en las siguientes unidades geológicas: Pórfido Cuarzo Monzonítico, luego en Granodiorita Regional y finalmente en el Volcánico Paralaque, siendo predominante la Granodiorita. La ventana de construcción se construirá en granodiorita y granodiorita lixiviada como se puede observar en la figura 12.

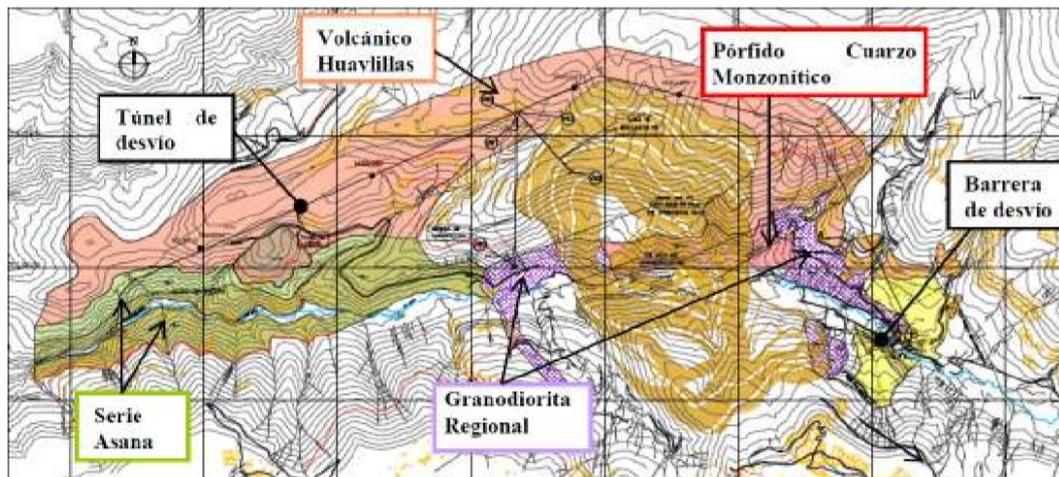


Figura 12. Planta geológica del túnel de desvío río Asana

Fuente: Ingeroc, 2011

#### 2.2.5.2.4. Sección del túnel.

Contempla una sección transversal que equivale a 5 m x 5 m. (Chambilla, 2017) de la Universidad Nacional del Altiplano en su tesis titulada *Planeamiento y Control de Costos de la Obra Túnel de Desvío del Río Asana Del Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua Aplicando el Resultado Operativo* de los análisis realizados se concluye que para evitar que el túnel de desvío de 5,10 por 4,75 m de sección entre en presión.

#### 2.2.5.2.5. Secciones de canal.

El túnel del río Asana presenta tramos con tres secciones típicas, estas variaciones de secciones es consecuencia de los estudios geológicos- geotécnicos

que caracteriza los perfiles geológicos y geotécnicos y determinan el diseño de los sostenimientos del túnel, por ende, las características geológicas y geotécnicas son diferentes a lo largo del túnel y los tipos de sostenimiento también variando los anchos del canal. Presentando tres secciones típicas del en diferentes progresivas del túnel. Sección A (Figura 13) L=3,90 m H=2.20 m ;Sección B (figura 14) L=4,40 m H=1,50 m y Sección C (Figura 15) L=4,20 m H=1,80 m.

En el proceso constructivo los espesores del muro sobrepasaban los 20cm según diseño de plano al ser colocado directamente en contacto con las paredes de shotcrete los espesores oscilaban desde los 20 cm hasta un promedio de 60 cm sin ningún tipo de sistema de separación.

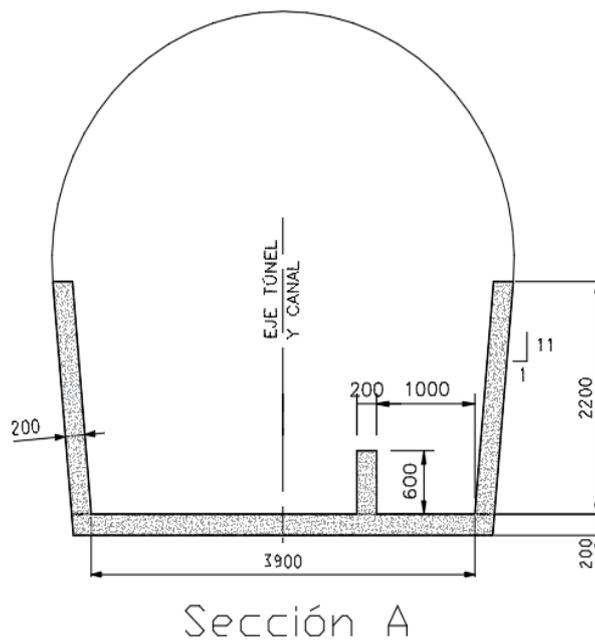
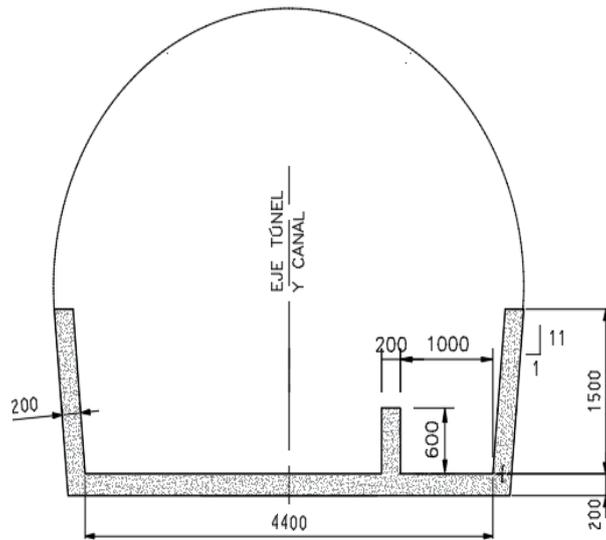
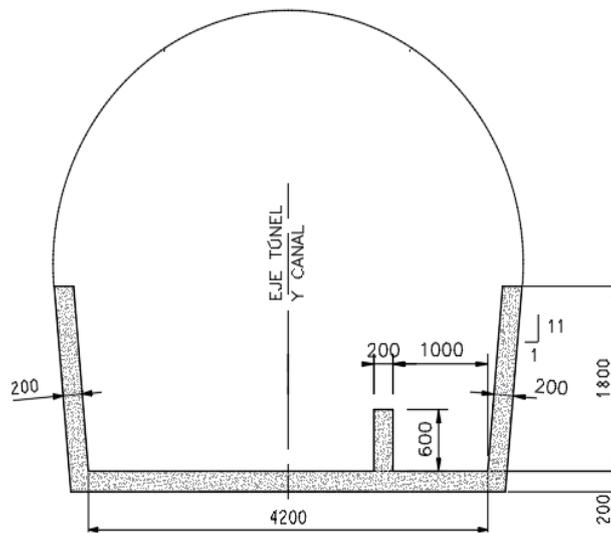


Figura 13. Sección A del canal del túnel  
Fuente: Adaptado de CME, 2017



Sección B

Figura 14. Sección B del canal del túnel  
Fuente: Adaptado de CME, 2017



Sección C

Figura 15. Sección B del canal del túnel  
Fuente: Adaptado de CME, 2017

#### 2.2.5.2.6. Sostenimiento del túnel.

Chambilla (2017) también describe en su tesis los elementos que conformaron el sostenimiento del túnel del río Asana como los que se mencionaran y describirán;

los pernos, concreto lanzado (Shotcrete), marcos reticulados y malla electrosoldada.

*a. Concreto Lanzado.*

El concreto lanzado reforzado con fibra sintética, o denominado shotcrete de espesor de 5cm en las paredes del túnel.

*b. Mallas Electrosoldadas.*

Como parte del sostenimiento del túnel se colocó mallas electrosoldadas de calidad del acero de 150 x 150 x 6 mm.

*c. Pernos de refuerzo en roca.*

Como parte del sostenimiento se colocó pernos de refuerzo de acero Grado 60. El sellado se hizo con lechadas o resina en toda su longitud, se utilizó placa, y tuerca de acero ASTM A-36. En las zonas de aguas mineralizadas, los pernos deberán ser de fibra de vidrio con una resistencia especificada a la tracción de rotura de 300 kN, o una fuerza de trabajo de 100 KN de D=25 mm L=3 m.

*d. Marcos reticulares.*

Según el tipo de roca que se encuentra durante el avance de excavación se usa las barras del marco reticulado serán barras con resaltes de acero Grado 60. Placas y perfiles de acero ASTM A-36. En zonas de aguas mineralizadas, los elementos del marco reticulados serán galvanizados en caliente.

#### 2.2.5.2.7. *Materiales de construcción.*

Los materiales en general que se utilizaron en la construcción del canal del túnel del río Asana son los siguientes

- Acero de refuerzo corrugado de 1/2".
- Concreto de Resistencia. 45 MPa.
- Sellante de junta SikaSwell S-2.
- Perfil Hidroexpansivo de 20m – SikaSwell.
- Sellante de junta Sikaflex.
- Aditivo epóxico HIT RE 500 V3.
- Resina Epóxica para juntas Sikadur 51.
- Water Stop.
- Penetrón.

#### 2.2.5.2.8. *Evacuación de aguas ácidas.*

CME (2014) en el *plan de manejo de aguas construcción del túnel de desvío de río Asana* se explica que el túnel de desvío del río Asana podría drenar aguas contactadas (ácidas) provenientes desde las napas que atraviesa. Es necesario evitar que estas aguas se incorporen a las aguas del río Asana, dado que existen compromisos ambientales que indican que las aguas del río no se verán afectadas en cantidad tampoco en calidad. Para drenar el total de agua generado en la operación, se instalarán estaciones de bombeo, las cuales contarán con una bomba fija diseñada que asegure la evacuación del caudal de agua hasta superficie hasta 10 lt/seg mediante tuberías HDPE de 4" y 6" de diámetro. Además, se instalarán caudalímetros en las líneas de drenaje para control de caudal. Durante la

perforación de roca si podría haber presencia de algunos metales como fierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y otros por la propia geología de la zona, pudiendo variar los parámetros físicos químicos y metales totales en el efluente del túnel.

#### *2.2.5.2.9. Proceso constructivo.*

CME (2017) en el *plan de ejecución y construcción obras complementarias* se describe los principales trabajos comprendidos para la construcción del canal son: Limpieza, excavación y eliminación de marina, construcción del sistema de drenaje y captación de aguas de infiltración y colocación de concreto H14, obras de concreto del canal y tapones de concreto en estocadas.

##### *a. Limpieza, excavación y eliminación de marina.*

CME (2017) Los trabajos consisten en la remoción total de la marina, material contaminado, lodo y material no deseado del piso de fundación con equipo mayor. La limpieza y el lavado de la superficie de roca serán con personal de piso con los equipos menores y herramientas adecuadas hasta dejar la superficie libre de rocas desprendidas, grasas y aceites previo a la instalación del sistema de drenaje y vaciado de concreto.

##### *b. Construcción del sistema de drenaje y captación de aguas de infiltración y colocación de concreto H14.*

CME (2017) Consiste en la construcción de un sistema de drenaje (bajo la losa de revestimiento) que consiste en un dren francés longitudinal al eje del túnel ubicado al centro de la sección, compuesto por gravas de 1'' a 2'' colocadas en dos capas y

dos tuberías perforadas HDPE de  $\phi 2''$  colocadas entre las capas de la grava. Al culminar los trabajos de colocación de grava y tuberías de drenaje se procederá a la costura del geotextil con hilo de poliéster en toda la longitud del dren, se construirá en tramos de 20 m, se instalarán tuberías de colección, consistentes en dos tubos PVC ( $\phi 2''$ ), que conducirán las aguas a presión hasta la tubería de evacuación ( $\phi 6''$ ) ubicada sobre el muro del canal.

*c. Construcción de Losa.*

CME (2017) La construcción consistirá en el encofrado y vaciado de una Losa de concreto armado H30 de 5,0 m de ancho y una altura de 0,2 m. Para el encofrado el subdividirá en paños de longitud no menor a 12 metros y no mayor de 15 metros, en cuyos extremos se encofrará con moldes de metal (encofrado metálico). Para la colocación del concreto se utilizarán vibradores eléctricos para evitar la segregación del concreto y cangrejas en el acabado del concreto, además se dejarán los arranques de acero debidamente protegidos con Rebar Caps (Capuchones) para los amarres con los muros laterales y centrales del canal.

*d. Construcción de muros laterales.*

CME (2017) La construcción se inició con la liberación por parte del área de calidad de los paños a vaciar, que incluye dejar el área limpia sin presencia de agua infiltradas y el acero limpio y seco, la colocación de water stop en las juntas de construcción, posteriormente se procede con el encofrado metálico, controlado topográficamente su alineación una vez colocado las compuertas en los extremos de los paños se procede al inicio del vaciado cabe indicar que se utilizó

bombas de concreto abastecidas por los mixers, se realiza el vibrado del concreto y el regleado para el acabado final después de 20 hr como mínimo para iniciar el desencofrado luego se aplica el curador químico. Es importante describir que el vaciado del concreto de los muros se realizo contra el shotcrete por lo que existe la posibilidad de que en determinados tramos se genere una conexión rígida lo cual significa para el concreto de los muros laterales una restricción de la deformación.

*e. Construcción de muro intermedio.*

CME (2018) en plan de ejecución *proceso de construcción de muro intermedio del canal interior del túnel de desvío del río Asana* se describe la secuencia del proceso constructivo. Escarificado de la losa, limpieza, perforación y colocación de fierros de anclaje, armado de la malla de acero, manejo de aguas de infiltración, colocación de Water Stop, colocación del Sikadur 51, colocación de Sikaflex y perfil hidrostático, vaciado de concreto con la cunetera “Power Curber” y el acabado de concreto vaciado.

*f. Curado de muros de canal.*

CME (2017) Compuesto líquido para el curado de concreto Sika (2014) Sika Antisol es una emulsión líquida que cuando es aplicada con un pulverizador sobre concreto fresco desarrolla una película impermeable y sellante de naturaleza micro cristalina. Asegura una protección perfecta al concreto después que el cemento ha reaccionado positivamente de gran adherencia y resistencia mecánica para anclajes estructurales, ofrece una protección durable y consistente del concreto fresco contra una evaporación demasiado rápida debido a la acción del sol y viento, por lo tanto

previene el desarrollo de fisuras superficiales en la mezcla de cemento en proceso de endurecimiento. Es especialmente apropiado para el tratamiento de superficies verticales donde la previsión es realizada para la posterior protección de la estructura sin efectos negativos.

### **2.3. Definición de términos**

- Carbonatación: reacción entre el dióxido de carbón y un óxido para formar un carbonato, que se da en pastas, morteros u concreto de cemento Pórtland la reacción con los componentes cálcicos produce carbonato de calcio. Esta reacción puede producir contracción, fisuración y/o corrosión de las armaduras. (NTP 339.047, 2019).
- pH : (Acidez-basicidad) Se define el pH como el menos logaritmo de la concentración de protones:  $pH = -\log [H^+]$  y da una medida de la acidez (pH bajos) o basicidad (pH altos) de una disolución. (San Juan & Castro , 2001)
- Concreto: define al concreto como una mezcla de cemento portland, agregado fino, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia. (Rivva, Concreto-Ataques al concreto, 2014) a los que se podrían añadir aditivos, adiciones y fibra.
- Durabilidad: capacidad del concreto, mortero, grout o revoque de cemento Pórtland de resistir a la acción de la intemperie y otras condiciones de servicio, tales como ataque químico, congelación, deshielo y abrasión (NTP 339.047, 2019)

- Porosidad: Se conoce por porosidad a la parte hueca del concreto que puede estar rellena o no de liquido o aire (San Juan y Castro , 2001)
- Hidratación del Cemento: Es la reacción que tienen con el agua los compuestos cristalinos anhídros que constituyen el cemento, produciéndose una cristalización que conduce a un sistema\_ de constituyentes hidratados estables, con un desprendimiento mayor o menor de calor en función del tipo de cemento (San Juan y Castro , 2001).
- Despasivación en el área de fisuras: En las fisuras, planos de fallas y oquedades que exhiba el concreto, tanto la inducción del oxígeno y de cloruros, como el avance de un frente de carbonatación, tienden a penetrar más a prisa que en el concreto sano. (Sanchez de Guzman, 2006 pág. 188).
- Humedad Relativa : Es la relación entre la cantidad de agua presente en la atmósfera y la cantidad necesaria para la saturación, referido todo a una misma temperatura. Se expresa en porcentaje (San Juan y Castro , 2001).
- Corrosión del Refuerzo: La pasividad natural de las armaduras embebidas en el concreto se puede perder, fundamentalmente, por una disminución del pH de su fase acuosa o por la presencia en su masa de ciertos iones, como los cloruros, capaces de destruir localmente la capa pasiva (San Juan y Castro , 2001).

## **CAPITULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1. Tipo de la investigación**

Vento y Zanabria (2004) clasifican los tipos de investigación en función de los propósitos y de la naturaleza de los problemas, por tanto la presente investigación se clasificara en investigación aplicada que se orienta a la aplicación de conocimientos teóricos a la solución de un problema practico e inmediato.

#### **3.2. Diseño de la investigación**

Hernández, Fernández, y Baptista, (2014) define a la investigación no experimental como aquella que se realiza sin manipular deliberadamente variables, afirma que en una misma investigación pueden incluirse dos o mas diseños de distintos tipos (diseños múltiples) es así que esta investigación se clasificara en diseños transeccionales descriptivos y diseños transeccionales correlacionales-causales. Considerando las características del enfoque cuantitativo siendo este secuencial y probatorio donde se utiliza la recolección de datos para probar y llegar a las conclusiones de la investigación. En la Figura 16 se muestra el diseño aplicado en esta investigación.

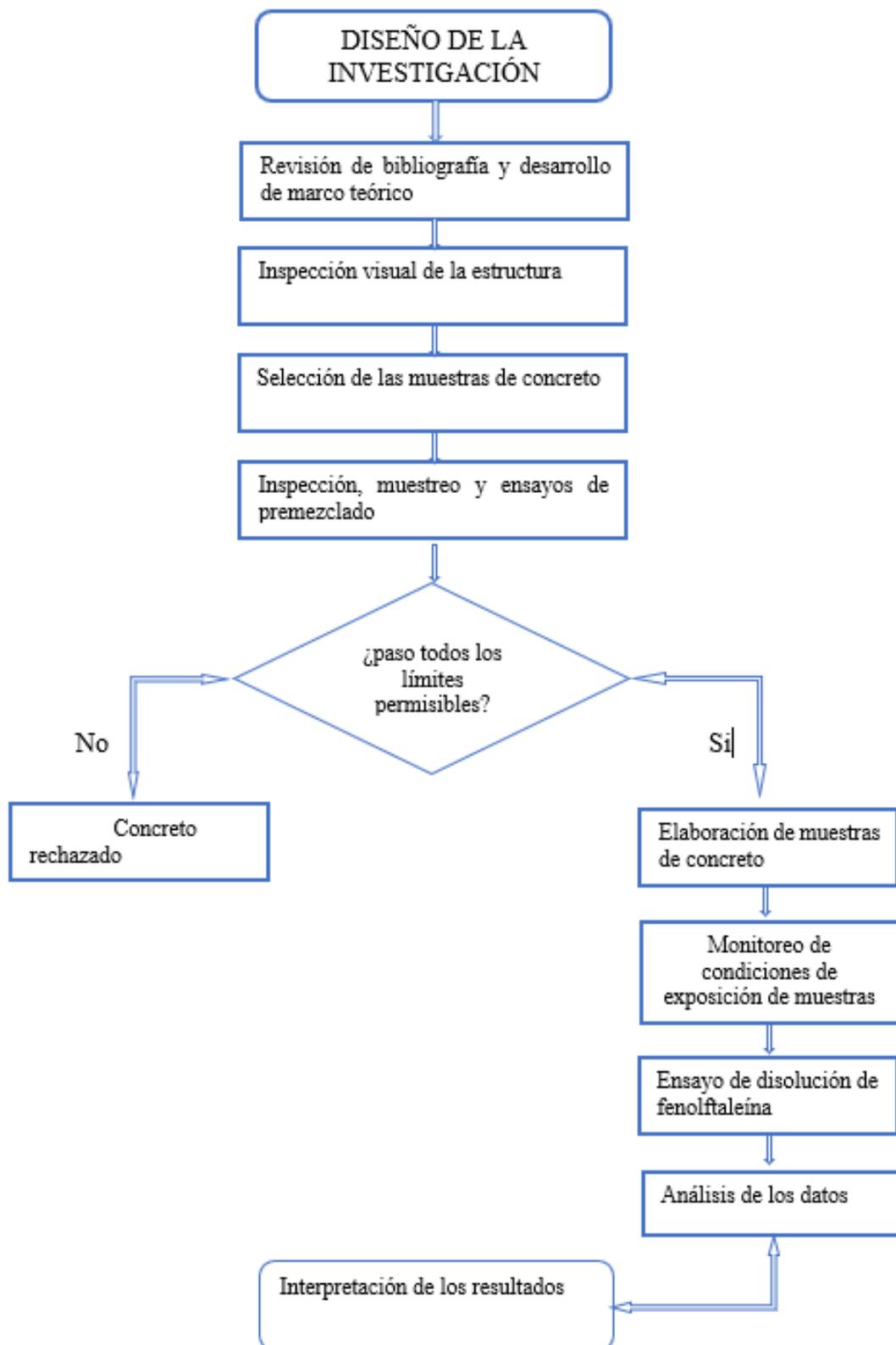


Figura 16. Diseño de la investigación

### **3.3. Población y muestra**

Hernández et al. (2014) se utilizará un diseño no probabilístico de selección intencional relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador.

#### **3.3.1. Población**

La población está constituida por elementos estructurales del túnel de desvío río Asana que comprende.

- Muros de estocadas  $f'c = 55 \text{ MPa}$  Slump 8"- 10" A/C=0,32.
- Revestimiento con shotcrete  $f'c = 30 \text{ Mpa}$  Slump 7"- 9" A/C=0,43.
- Muro intermedio  $f'c = 45 \text{ Mpa}$ , Slump 1"- 4" A/C=0,42.
- Loza de canal  $f'c = 14 \text{ Mpa}$  Slump 6" – 8", A/C=0,40.
- Muros laterales de canal Concreto  $f'c = 45 \text{ Mpa}$  Slump 6"-8" A/C=0,36.

Los criterios de inclusión y exclusión considerados para la delimitación poblacional y selección de muestra son los siguientes:

- Estructuras de concreto vaciadas en el interior del túnel.
- Concretos de estructuras de resistencia de  $f'c = 45 \text{ Mpa}$ .
- Concretos solo con un slump de 6"-8".
- Concreto solo con relación A/C=0,36.

#### **3.3.2. Muestra**

Vara (2012) El muestreo responderá a un criterio de selección intencional por tener conocimiento previo de la población, por disponibilidad de recursos y fines estadísticos, la muestra sera los muros laterales de concreto del canal PK inicio

0+015.00 al PK final 7+588.35 con Concreto  $f'c = 45\text{Mpa}$  Slump 6"-8" A/C=0,36. Las muestras que representan al concreto H45 de los muros del canal estará representado por muestras divididas en 95 días (30 muestras) y 77 días (15 muestras) todas expuestas al mismo ambiente natural.

### **3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos**

#### **3.4.1. Técnica para la recolección de datos**

Para la fase de recolección de datos se empleó la técnica de la observación y análisis documental, de acuerdo a la clasificación usaremos como principal técnica la observación estructurada caracterizada por determinar con anterioridad lo que se va a utilizar. (Valderrama, 2002).

Vara (2012) presenta una clasificación de acuerdo al diseño de la investigación, por tanto para la fase de análisis de datos, se utilizará como técnica el programa estadístico IBM® SPSS Statistics y Excel que nos permitirá el uso de los métodos estadísticos.

#### **3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos**

(Valderrama, 2002) considera instrumentos como equipos y método de ensayo recolección de datos mediante fichas o formularios de observación para la técnica de la observación. Para este estudio utilizaremos formatos de recolección de datos y análisis de documento.

Hernández, Fernández, y Baptista, (2014) para la recolección de datos cuantitativos clasifica como otros tipos de instrumentos de medición (aparatos y equipos, analisis de contenido e indicadores).

### **3.4.2.1. Registro de inspección de fisuras.**

#### **3.4.2.1.1. Aplicación.**

Se aplica a los muros del canal con una longitud de 7573,35 m con la PK inicio 0+015,00 al PK final 7+588,35 con un total de 1055 paños tanto en el hastial izquierdo como en el hastial derecho muros  $h=1,50$  m,  $h=1,80$  m y  $h=2,00$  m, de este total se registró las fisuras a un total de 733 paños en el hastial izquierdo y 785 paños en el hastial derecho, cabe mencionar que los espesores de fisuras mayores a 0,30 mm fueron reparadas en los muros de canal del túnel.

#### **3.4.2.1.2. Equipos y Herramientas.**

- Medidor de fisuras.

Existe una variedad de instrumentos para medir las fisuras, para esta investigación se utilizará una tarjeta transparente denominada regleta para medir fisuras, con esta herramienta se puede determinar el ancho de la fisura, colocando la tarjeta que tiene graficada una regla, se desliza la regla hasta que uno de los anchos graficados coincida con el ancho de la fisura.

### **3.4.2.2. Registro de monitoreo de condiciones de exposición de probetas.**

Se elaboró con la finalidad de evidenciar promedios tanto temperaturas como humedades relativas.

#### **3.4.2.2.1. Aplicación.**

Se aplico a muestras de concreto  $f'c = 45$ Mpa se dividen en 95 días (30 muestras) y 77 días (15 muestras) todas expuestas al mismo ambiente natural (interior del túnel).

**3.4.2.2.2. Equipos y Herramientas.**

**a. Termohidrómetro.**

Equipo que mide la temperatura y humedad del medio ambiente.

**b. Monitor de gases.**

Equipo que mide variedad de gases del medio ambiente.

**3.4.2.3. Registro de monitoreo de pH de agua de infiltración.**

Se elaboró con la finalidad de evidenciar los valores del pH del agua de infiltración y sus valores máximos y mínimos.

**3.4.2.3.1. Aplicación.**

Aguas de infiltración del túnel en el tramo de los muros a construir del canal desde la PK inicio 0+ 0+015,00 al PK final 7+588,35.

**3.4.2.3.2. Equipos y Herramientas.**

- Medidor de pH: equipo que mide el pH del agua.

**3.4.2.4. Registro de recolección de datos de ensayo.**

La ficha de registro de datos el instrumento se elaboró con la finalidad de registrar los datos profundidad de carbontación y valores de pH del concreto.

**3.4.2.4.1. Aplicación.**

Las muestras que representan al concreto H45 a un total de 45 muestras divididas en 95 días (30 muestras) y 77 días (15 muestras) todas expuestas al mismo ambiente natural.

#### 3.4.2.4.2. *Equipos y Herramientas.*

##### *a. Disolución de fenolftaleína.*

Bolivar (2018) es un colorante orgánico, el cual es a su vez un ácido débil diprótico, usado en muchas determinaciones volumétricas como indicador ácido-base.

##### *b. Alcohol etílico.*

(Téllez y Cote , 2006) el alcohol etílico también conocido como etanol, alcohol vínico y alcohol de melazas, es un líquido incoloro y volátil, que puede ser obtenido por dos métodos principales: la fermentación de las azúcares y un método sintético a partir del etileno.

##### *c. Envase de Aplicador.*

Se utilizará un envase para rosear el indicador sobre las muestras de concreto.

##### *d. Pie de rey.*

Se utilizara el pie de rey para medir dimensiones de la profundidad de carbonatación .

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Presentación de resultados

- a. Resultados para analizar la aparición de fisuras y su relación con el proceso de carbonatación del concreto en el canal del túnel-río Asana 2018.

**Tabla 9**

*Porcentaje de tipo de espesores de fisuras en los muros*

<b>Espesores de fisuras</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Frecuencia acumulada</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
,00	3	3	,2	,2
,05	33	36	2,2	2,4
,10	91	127	6,0	8,4
,25	250	377	16,5	24,8
,30	336	713	22,1	47,0
,40	369	1082	24,3	71,3
,44	1	1083	,1	71,3
,50	213	1296	14,0	85,4
,60	123	1419	8,1	93,5
,70	57	1476	3,8	97,2
,80	25	1501	1,6	98,9
,90	9	1510	,6	99,5
1,00	5	1515	,3	99,8
1,10	1	1516	,1	99,9
1,40	1	1517	,1	99,9
7,00	1	1518	,1	100,0
Total	1518		100,0	

La siguiente tabla 9 elaborada en Excel muestra un resumen de los resultados de la recolección de datos de la inspección fisuras de los muros de concreto del canal del río Asana, 733 paños en el hastial izquierdo y 785 paños en el hastial derecho muestra los espesores de fisura encontrados de menor espesor (0,05 mm) a mayor espesor de fisuras (0,80 mm), también muestra la cantidad total de fisuras por espesor se presentan en la tabla 9.

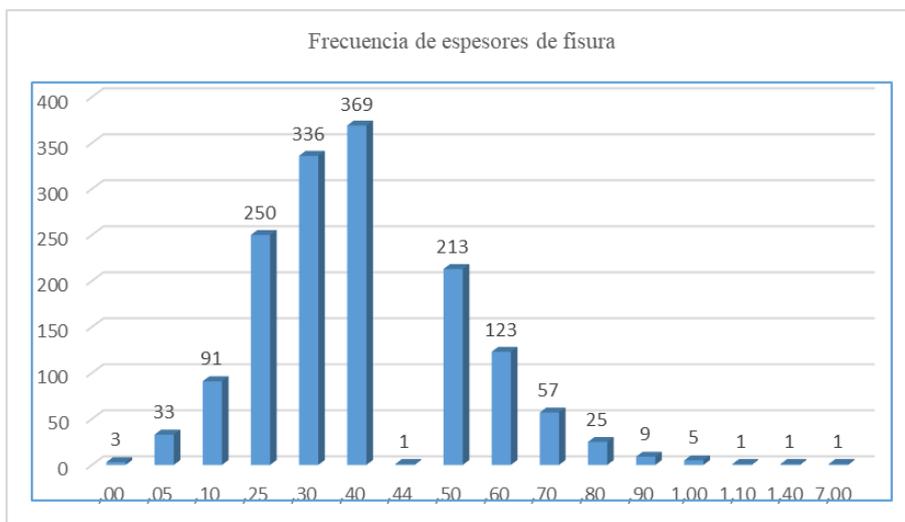


Figura 17. Presencia de fisuras en el concreto

La tabla 9 y figura 17 muestra resultados de la presencia de fisuras en los muros de concreto armado, evidenciando que el espesor de fisura 0,40 mm es la de mayor frecuencia con 369 veces con un porcentaje de 24,3 % seguido de 0,30 mm con 336 veces con un porcentaje de 22,1 %.

**Tabla 10**

*Presencia de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0.30 mm*

<b>Figuras</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
Menor a 0,30 mm	713	47,0%
Mayor a 0,30 mm	805	53,0%
<b>Total</b>	<b>1518</b>	<b>100,0%</b>

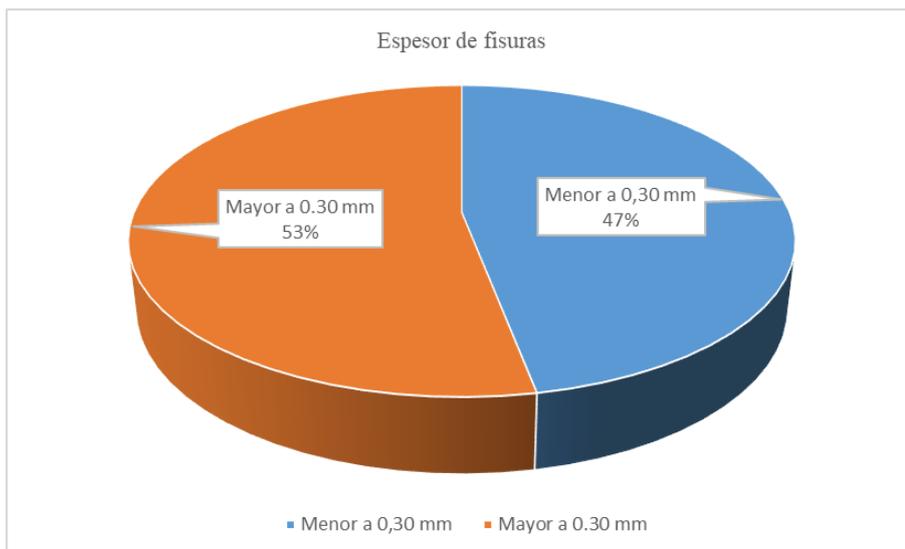


Figura 18. Presencia de fisuras en el concreto

La tabla 10 y figura 18. Muestra resultados de la presencia de fisuras en el concreto, el 53 % tienen fisuras mayores a 0,30 mm y el 47 % tienen fisuras menores a 0,30 mm.

**Tabla 11**

*Relación de la altura de muro y cantidad de fisuras*

	Cantidad de fisuras						Total
	0	1	2	3	4	5	
1,50 metros	55	1	0	0	0	0	56
	5,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%
1,80 metros	121	0	0	0	0	0	121
	11,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,5%
2,00 metros	125	5	13	4	1	1	149
	11,8%	0,5%	1,2%	0,4%	0,1%	0,1%	14,1%
2,20 metros	648	53	21	7	1	0	730
	61,4%	5,0%	2,0%	0,7%	0,1%	0,0%	69,1%
Total	949	59	34	11	2	1	1056
	89,9%	5,6%	3,2%	1,0%	0,2%	0,1%	100,0%

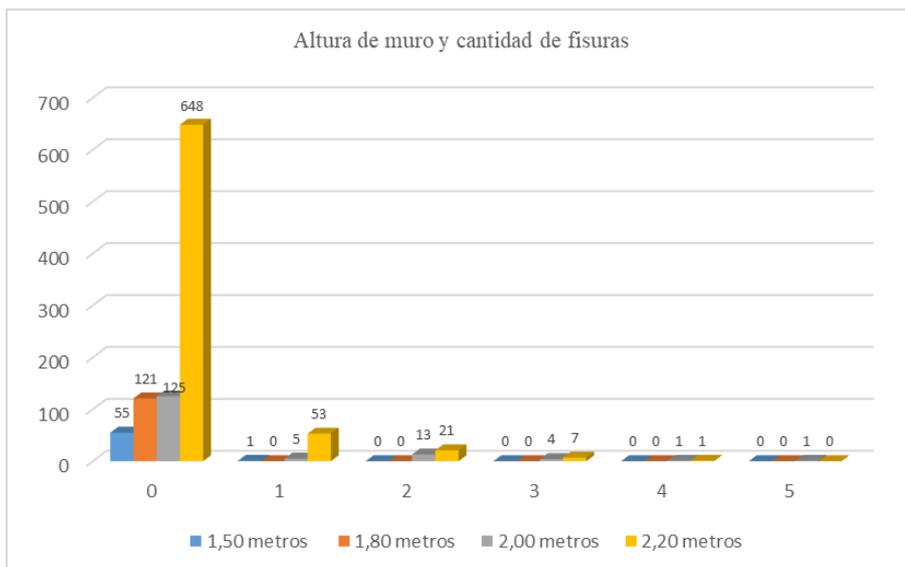


Figura 19. Profundidad de carbonatación y Espesor de fisura

La tabla 11 y figura 19. Muestra resultados de la relación de la altura de muro y cantidad de fisuras, evidenciando a 82 muestras tienen fisuras en cantidades de 1 a 4 fisuras cuya altura del muro es de 2,20 metros, se observa también que a 24 muestras tienen fisuras en cantidades de uno a cinco fisuras cuya altura del muro es de 2,00 metros.

- b. Resultados para identificar factores físicos y químicos que intervienen en el cambio del pH del concreto en el canal del túnel -río Asana 2018.

**Tabla 12**

*Muestras expuestas a 77 días*

Fecha	Humedad relativa (%)	Temperatura(C°)
2/09/2018	45	15
7/09/2018	22	23
18/09/2018	25	20,8
3/10/2018	32	17
15/10/2018	40	18
1/11/2018	36	14
20/11/2018	47	15
Promedio	35,29	17,54

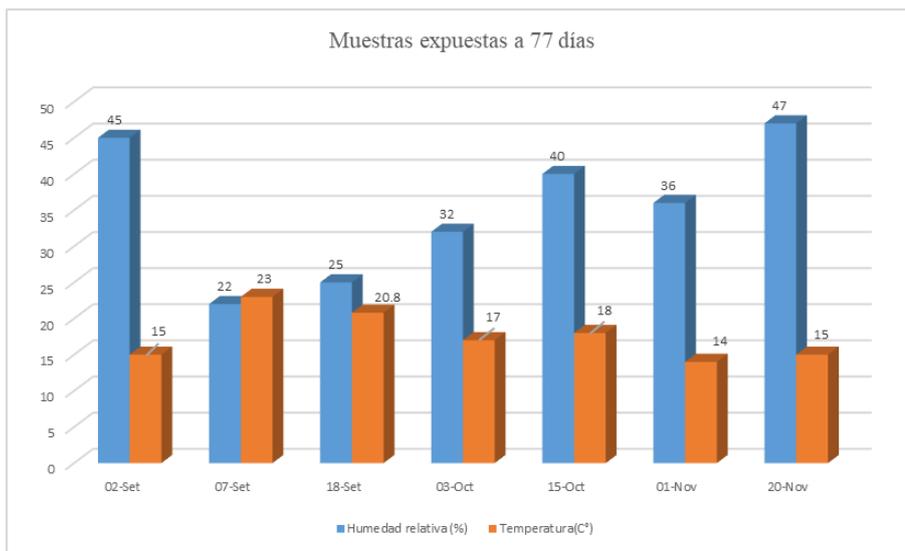


Figura 20. Muestras expuestas a 77 días

En la tabla 12 y figura 20. Se evidencia resultados de las muestras expuestas a 77 días, cuando la temperatura es a 15°C, la humedad relativa llega un punto máximo de 45 % y 47 %, registradas en las fechas del dos de setiembre y 20 de noviembre, tomando como promedio de temperatura de 17,54 °C y el promedio de humedad relativa es 35,29 %.

**Tabla 13**

*Muestras expuestas a 95 días*

Fecha	Humedad relativa (%)	Temperatura(°C)
11/08/2018	32	17
14/08/2018	35	18,8
2/09/2018	45	15
7/09/2018	22	23
18/09/2018	25	20,8
3/10/2018	32	17
15/10/2018	40	18
1/11/2018	36	14
20/11/2018	47	15
Promedio	34,89	17,62

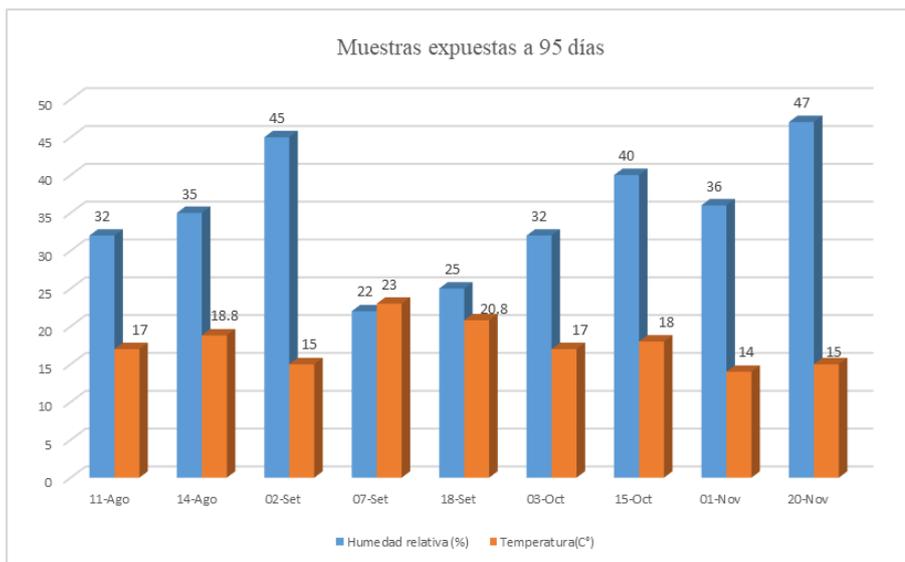


Figura 21. Muestras expuestas a 95 días

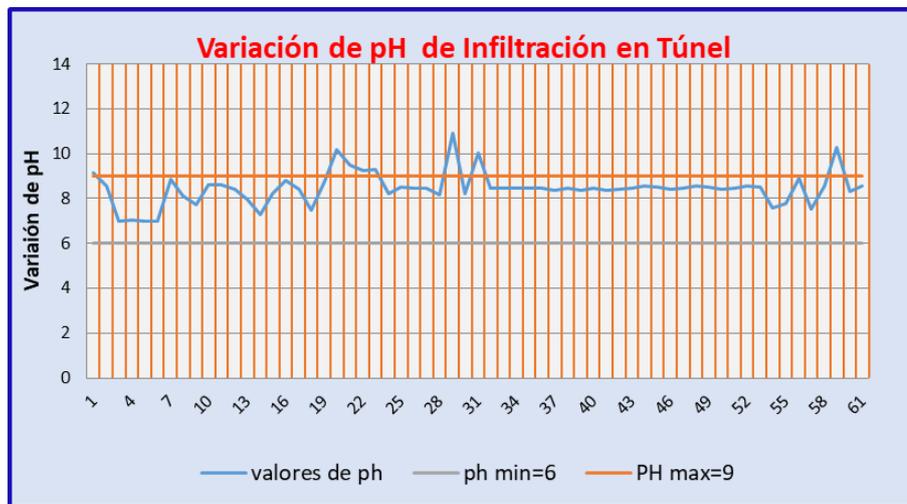
En la tabla 13 y figura 21. Se evidencia resultados de las muestras expuestas a 95 cuando la temperatura es a 15 °C, la humedad relativa llega un punto máximo de 45 % y 47 %, registradas en las fechas del dos de setiembre y 20 de noviembre, tomando como promedio de temperatura de 17,62 °C y el promedio de humedad relativa es 34,89 %.

**Tabla 14***Porcentajes de los valores de pH del agua de infiltración*

<b>PH del agua</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
6,97	1	1,60%	1,60%
6,98	2	3,30%	4,90%
7,05	1	1,60%	6,60%
7,30	1	1,60%	8,20%
7,50	1	1,60%	9,80%
7,54	1	1,60%	11,50%
7,60	1	1,60%	13,10%
7,75	1	1,60%	14,80%
7,77	1	1,60%	16,40%
7,99	1	1,60%	18,00%
8,14	1	1,60%	19,70%
8,19	1	1,60%	21,30%
8,21	1	1,60%	23,00%
8,22	2	3,30%	26,20%
8,30	1	1,60%	27,90%
8,37	3	4,90%	32,80%
8,40	2	3,30%	36,10%
8,41	3	4,90%	41,00%
8,44	3	4,90%	45,90%
8,45	9	14,80%	60,70%
8,49	3	4,90%	65,60%
8,52	1	1,60%	67,20%
8,54	4	6,60%	73,80%
8,55	1	1,60%	75,40%
8,56	1	1,60%	77,00%
8,59	1	1,60%	78,70%
8,60	1	1,60%	80,30%
8,74	1	1,60%	82,00%
8,82	1	1,60%	83,60%
8,84	1	1,60%	85,20%
8,89	1	1,60%	86,90%
9,17	1	1,60%	88,50%
9,23	1	1,60%	90,20%
9,32	1	1,60%	91,80%

**Tabla 15***Porcentajes de los valores de pH del agua de infiltración*

PH del agua	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
9,48	1	1,60%	93,40%
10,02	1	1,60%	95,10%
10,20	1	1,60%	96,70%
10,26	1	1,60%	98,40%
10,91	1	1,60%	100,00%
Total	61	100,00%	

*Figura 22. Muestras expuestas a 95 días*

La tabla 14 y figura 22. Muestra resultados de la variación del pH de infiltración en túnel, tomando como referencia a los puntos pH igual a seis como mínimo y pH igual a nueve como máximo dichos valores llegan a superar hasta un máximo de 10,91, además se evidencia que en el porcentaje acumulado que el 86,9% se encuentran entre los intervalos de 6,97 y 8,89.

**Tabla 16***Variación cualitativa de PH de infiltración en túnel*

	Frecuencia	Porcentaje
Por debajo de 6	0	0,0%
Entre 6 y 9	53	86,9%
Por encima de 9	8	13,1%
Total	61	100,0%

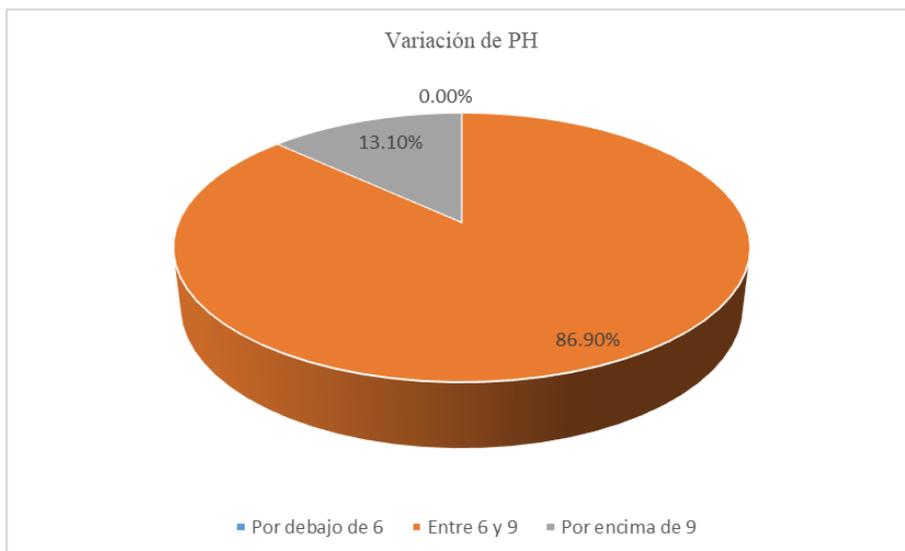


Figura 23. Variación cualitativa de PH de infiltración en túnel

La tabla 15 y figura 23. Muestra resultados de la variación cualitativa del PH de infiltración en el túnel, ninguno de ellos están, por debajo de 6, el 86,9% se encuentran entre los intervalos de seis a nueve, el 13,1% se encuentran por encima de nueve.

- c. Determinar la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto.

**Tabla17**

Medidas de profundidad de carbonatación y pH

Muestras	Profundidad de carbontación (mm)								Valor de pH
	1	2	3	4	5	6	7	8	
M-1	4,23	3,26	4,44	3,83	4,05	3,68	3,37	4,76	9
M-2	4,31	4,05	3,23	3,82	3,4	4,39	3,85	3,5	9
M-3	4,01	4,24	3,12	3,29	3,91	3,54	3,35	3,49	9
M-4	3,62	3,54	3,62	3,67	3,73	3,15	3,45	3,6	9
M-5	3,14	3,16	3,81	3,54	3,09	3,41	3,85	2,98	9
M-6	3,96	3,63	3,43	3,66	3,18	3,34	3,95	3,49	9
M-7	3,75	3,69	3,63	3,61	3,86	3,55	3,94	3,72	9
M-8	3,33	3,25	3,12	3,76	3,55	3,84	3,91	4,16	9
M-9	4,44	3,47	3,8	3,42	3,44	3,68	3,96	3,88	9
M-10	3,87	3,65	3,07	3,97	3,36	3,25	3,89	3,28	9

**Tabla18**

Medidas de profundidad de carbonatación y pH

Muestras	Profundidad de carbontación (mm)								Valor de pH
	1	2	3	4	5	6	7	8	
M-16	4,84	4,86	4,17	4,15	3,71	3,95	3,57	3,64	8
M-17	4,74	3,57	4,65	4,06	3,81	4,28	3,85	4,44	8
M-18	3,65	4,36	4,34	4,39	4,27	4,49	4,31	4,15	8
M-19	5,48	5,18	5,11	5,07	4,71	5,16	4,25	5,09	8
M-20	4,55	4,4	4,99	4,45	4,82	4,77	5,02	5,28	8
M-21	5,88	5,78	5,77	5,68	4,59	5,48	5,12	5,53	8
M-22	4,97	4,35	5,04	4,59	4,85	4,76	5,18	5,8	8
M-23	5,94	5,02	4,68	5,5	5,38	5,51	6,74	6,84	8
M-24	4,92	4,99	4,21	4,6	5,56	4,86	5,2	5,09	8
M-25	6,55	5,9	5,39	3,64	5,89	4,4	5,6	4,39	8
M-26	4,33	5,84	5,12	4,65	4,78	3,16	4,42	4,7	9
M-27	4,92	4,33	4,7	4,91	5,33	5,17	4,35	4,3	9
M-28	4,09	4,53	4,46	4,22	4,71	5,98	5,32	4,27	9
M-29	5,33	4,42	4,32	4,61	4,41	5,2	5,19	4,26	9
M-30	4,97	4,88	3,99	3,65	4,43	4,11	3,93	4,13	9
M-31	1,98	1,96	2,08	1,02	1,61	1,81	1,59	1,23	12
M-32	1,52	1,09	1,79	1,15	1,19	1,5	1,28	1,45	12
M-33	1,33	1,66	1,41	1,3	1,66	1,41	1,17	1,35	12
M-34	1,81	1,09	2,17	1,98	1,91	1,5	2,17	1,91	12
M-35	1,33	1,66	1,18	1,53	1,66	1,41	1,81	1,21	12
M-36	1,81	1,09	1,66	1,72	1,91	2,03	1,28	2,54	11
M-37	1,7	1,38	1,62	1,66	2,46	2,16	2,06	1,84	11
M-38	2,12	1,63	1,39	2,29	1,16	1,94	1,6	1,46	11
M-39	1,44	1,87	1,99	1,46	1,42	1,97	2,32	2,05	11
M-40	2,01	1,49	1,12	1,55	1,37	1,03	0,93	2,14	11
M-41	2,1	1,24	1,53	1,74	1,03	1,31	2,46	1,92	11
M-42	1,87	1,27	1,29	1,51	1,12	1,09	1,45	1,4	12
M-43	2,18	1,44	1	1,87	2,06	1,51	1	1,25	12
M-44	1,92	1,39	1,69	1,07	1,03	1,7	1,31	1,84	12
M-45	1,87	2,82	2,41	1,07	1,78	1,04	1,62	1,54	12

**Tabla 19***Estadísticos descriptivos por cada muestra de concreto*

<b>Muestras</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
M-1	8	31,62	3,953	0,269
M-2	8	30,55	3,819	0,178
M-3	8	28,95	3,619	0,154
M-4	8	28,38	3,548	0,033
M-5	8	26,98	3,373	0,112
M-6	8	28,64	3,58	0,077
M-7	8	29,75	3,719	0,017
M-8	8	28,92	3,615	0,131
M-9	8	30,09	3,761	0,118
M-10	8	28,34	3,543	0,119
M-11	8	26,24	3,28	0,127
M-12	8	25,74	3,218	0,142
M-13	8	24,04	3,005	0,238
M-14	8	28,81	3,601	0,259
M-15	8	25,63	3,204	0,25
M-16	8	32,89	4,111	0,257
M-17	8	33,4	4,175	0,178
M-18	8	33,96	4,245	0,067
M-19	8	40,05	5,006	0,137
M-20	8	38,28	4,785	0,094
M-21	8	43,83	5,479	0,185
M-22	8	39,54	4,943	0,188
M-23	8	45,61	5,701	0,589
M-24	8	39,43	4,929	0,162
M-25	8	41,76	5,22	0,959
M-26	8	37	4,625	0,575
M-27	8	38,01	4,751	0,158
M-28	8	37,58	4,698	0,414
M-29	8	37,74	4,718	0,199
M-30	8	34,09	4,261	0,216
M-31	8	13,28	1,66	0,142
M-32	8	10,97	1,371	0,056
M-33	8	11,29	1,411	0,029
M-34	8	14,54	1,818	0,132
M-35	8	11,79	1,474	0,052
M-36	8	14,04	1,755	0,2
M-37	8	14,88	1,86	0,121
M-38	8	13,59	1,699	0,149
M-39	8	14,52	1,815	0,113
M-40	8	11,64	1,455	0,195

**Tabla 20***Estadísticos descriptivos por cada muestra de concreto*

<b>Muestras</b>	<b>Cuenta</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
M-41	8	13,33	1,666	0,231
M-42	8	11	1,375	0,062
M-43	8	12,31	1,539	0,21
M-44	8	11,95	1,494	0,117
M-45	8	14,15	1,769	0,374

En la tabla 16 y tabla 17 se muestran los resultados obtenidos luego de medir la profundidad de carbonatación con el indicador fenolftaleína, se evidencia que el promedio de la profundidad de carbonatación (mm) en las muestras, del uno al 29 tienen profundidades entre 3 mm a 5,7mm, estas son mayores que las últimos 15 muestras, en cuanto a la varianza son valores mínimos o despreciables porque se encuentran muy cerca a cero.

**Tabla 21***Estadísticos de Profundidad de carbonatación*

	<b>N</b>	<b>Medi a</b>	<b>Desviación típica</b>	<b>Error típico</b>	<b>Intervalo de confianza para la media al 95%</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
					<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>		
Con Acero expuestas a 95 días	15	3,523	,259	,068	3,380	3,666	3,01	3,95
Sin Acero expuestas a 95 días	15	4,571	,941	,235	4,070	5,073	1,47	5,70
Sin Acero expuestas a 77 días	15	1,622	,1761	,047	1,521	1,724	1,37	1,86
Total	45	3,304	1,354	,202	2,898	3,711	1,37	5,70

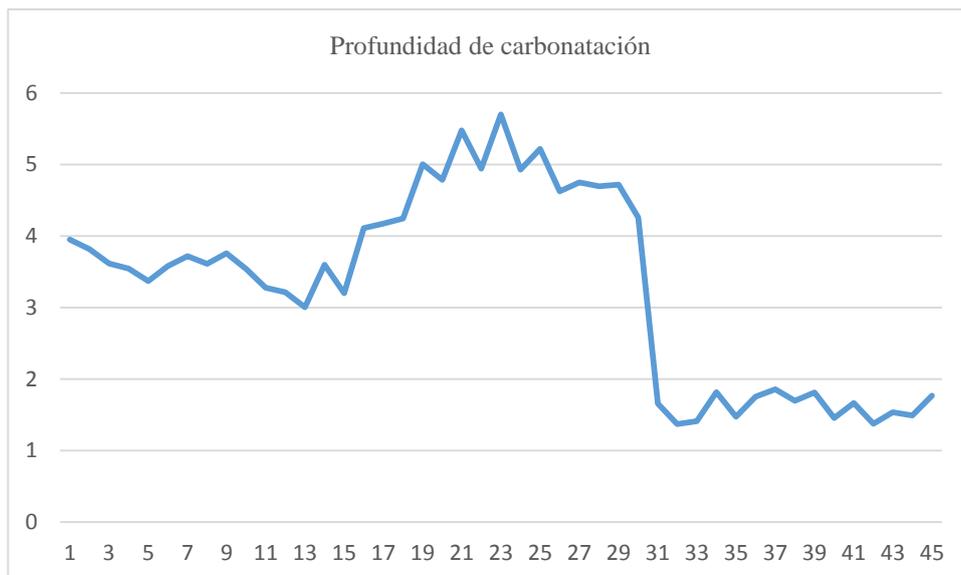


Figura 24. Promedio de la profundidad de carbonatación (mm)

En la tabla 18 y figura 24 se muestran los resultados estadísticos de profundidad de carbonatación, muestra valores de la media, desviación estándar, cuando están expuestas a 95 días y 77 días, en ello se observa la de mayor promedio es 4,571 sin acero expuestas a 95 días.

Tabla 22

Estadísticos de los valores del pH del concreto

	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Con Acero expuestas a 95 días	15	9,0000	0,00000	0,00000	9,0000	9,0000	9	9
Sin Acero expuestas a 95 días	14	8,2857	0,46881	0,12529	8,0150	8,5564	8	9
Sin Acero expuestas a 77 días	16	11,4375	0,81394	0,20349	11,0038	11,8712	9	12
Total	45	9,6444	1,47949	0,22055	9,2000	10,0889	8	12

En la tabla 19 se muestran los resultados estadísticos de los valores de pH del concreto, muestra valores de la media, desviación estándar, cuando están expuestas a 95 días y 77 días, en ello se observa la de mayor promedio es 11,4375 sin acero expuestas a 77 días.

A continuación se presenta las muestras de concreto, donde se aplico el indicador de fenolftaleína, tomando colores rojo purpuras que corresponderían a valores mayores de ocho, luego de pasado 15 min se puede ver la coloración final de la fenolftaleína que es el indicador del pH.

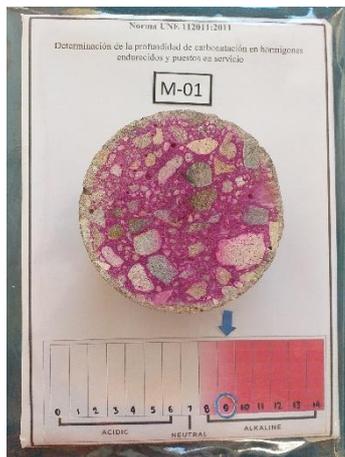


Figura 25. M-01, pH=9

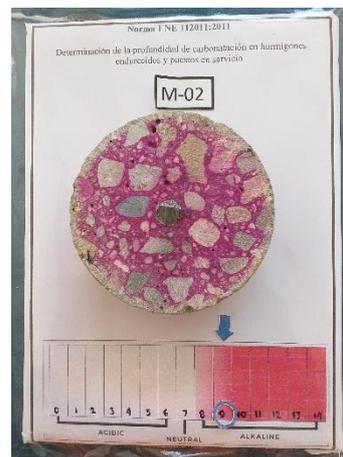


Figura 26. M -02, pH=9

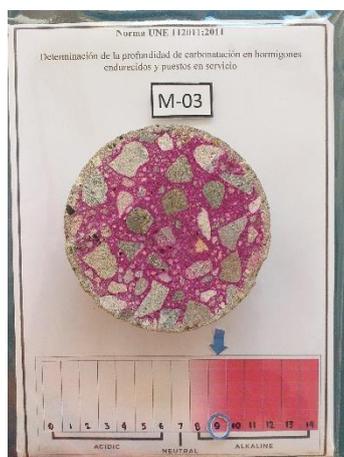


Figura 27. M-03, pH=9

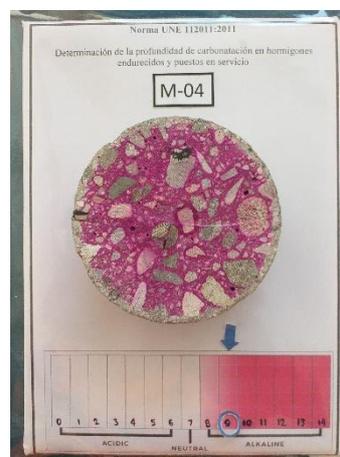


Figura 28. M-04, pH=9

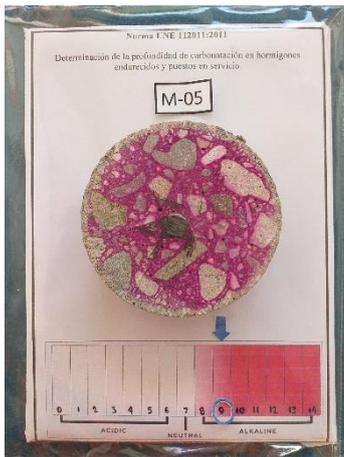


Figura 29. M-05, pH=9

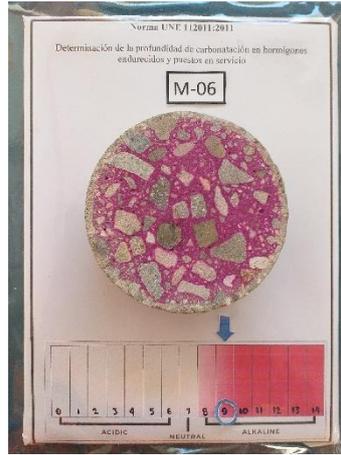


Figura 30. M-06, pH=9



Figura 31. M-07, pH=9

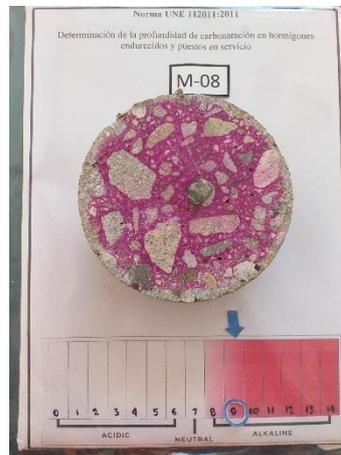


Figura 32. M-08, pH=9

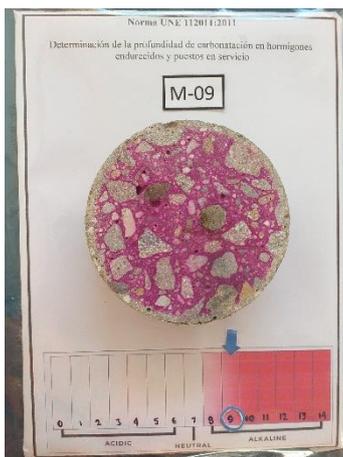


Figura 33. Figura 33. M-09, pH=9

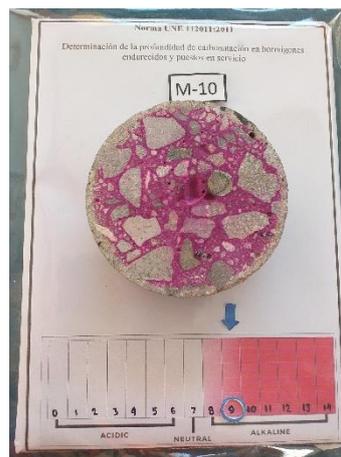


Figura 34. M-10, pH=9

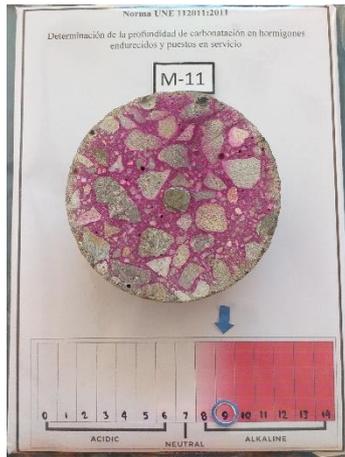


Figura 35. M-11, pH=9

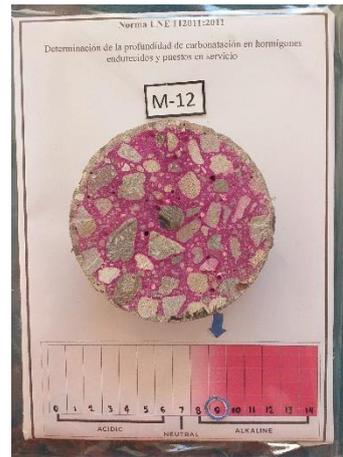


Figura 36. M-12, pH=9

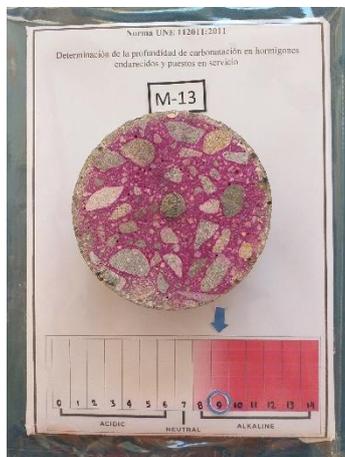


Figura 37. M-13, pH=9

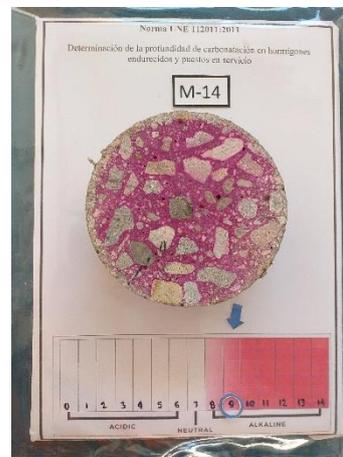


Figura 38. M-14, pH=9

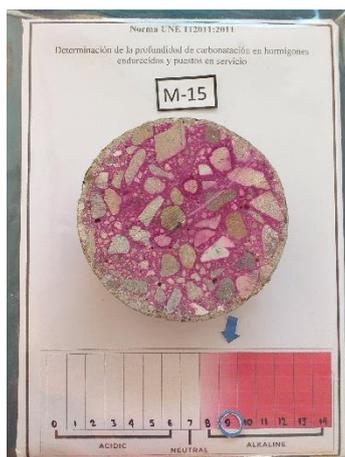


Figura 39. M-15, pH=8

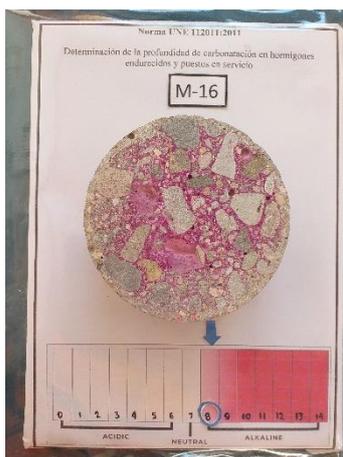


Figura 40. M-16, pH=8



Figura 41. M-17, pH=8

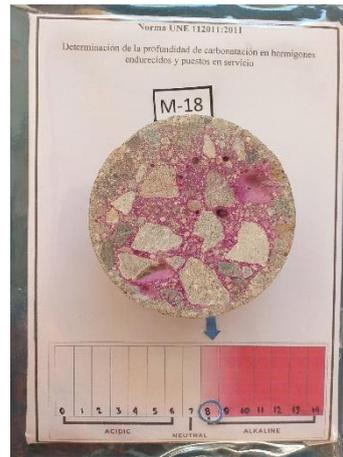


Figura 42. M-18, pH=8

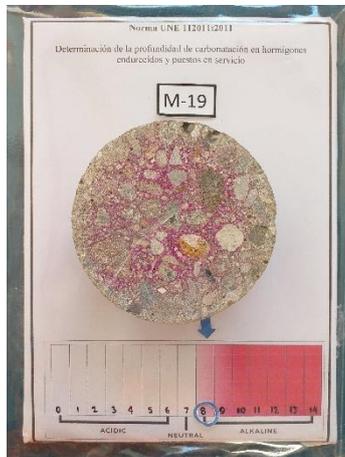


Figura 43. M-19, pH=8

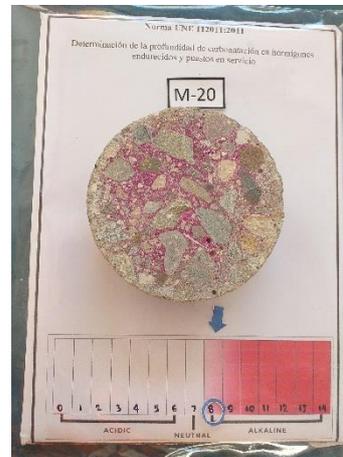


Figura 44. M-20, pH=8



Figura 45. M-21, pH=8

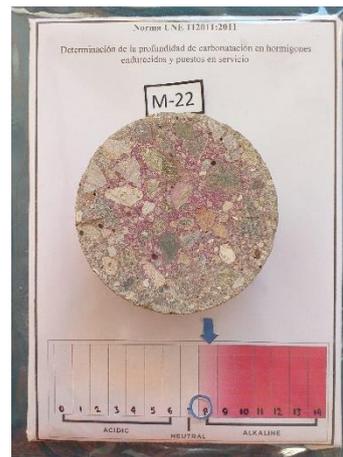


Figura 46. M-22, pH=8



Figura 47. M-23, pH=8



Figura 48. M-25, pH=8

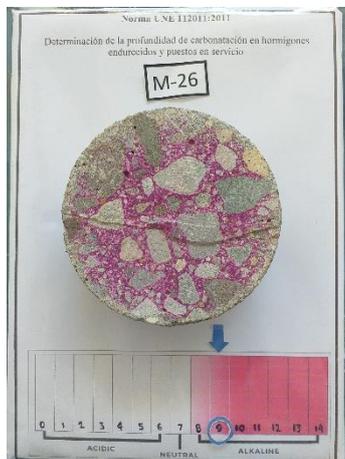


Figura 49. M-26, pH=9



Figura 50. M-28, pH=9

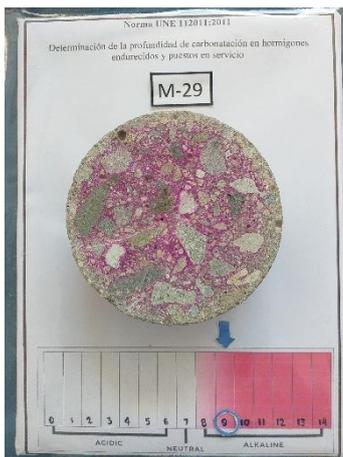


Figura 51. M-29, pH=9



Figura 52. M-31, pH=12



Figura 53. M-32, pH=12



Figura 54. M-33, pH=12



Figura 55. M-34, pH=12



Figura 56. M-36, pH=11



Figura 57. M-37, pH=11



Figura 58. M-38, pH=11



Figura 59. M-41, pH=11



Figura 60. M-43, pH=12

## 4.2. Contractación de hipótesis

- a. Prueba de hipótesis de la aparición de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0,30mm es producto del proceso de carbonatación.

Ho: La aparición de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0,30mm no es producto del proceso de carbonatación

Ha: La aparición de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0,30mm es producto del proceso de carbonatación.

**Tabla 23**

*Tabla de correlación de Pearson - profundidad de carbonatación y espesor de fisura*

		Profundidad de carbonatación	Espesor de fisura
Profundidad de carbonatación	Correlación de Pearson	1	,166
	Sig. (bilateral)		,276
	N	45	45
Espesor de fisura	Correlación de Pearson	,166	1
	Sig. (bilateral)	,276	
	N	45	45

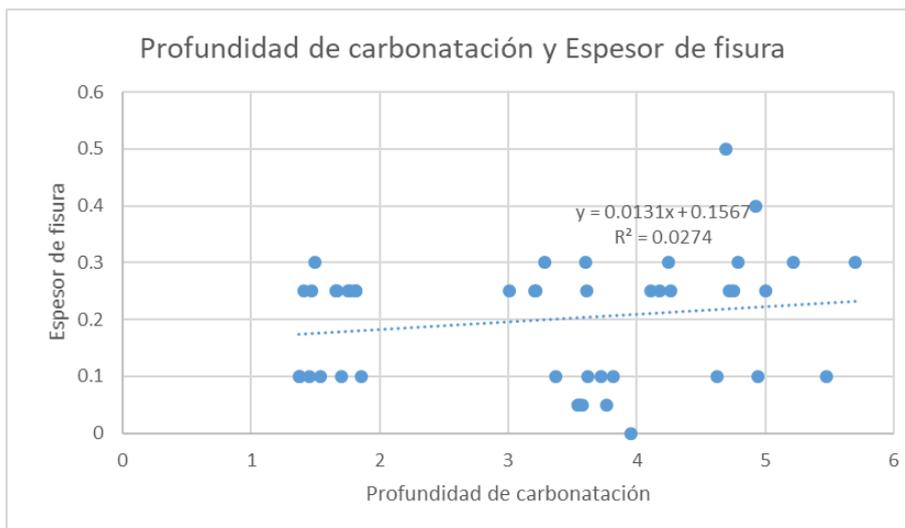


Figura 61. Profundidad de carbonatación y Espesor de fisura

En la tabla 20 muestra la prueba de Correlación de Pearson determina un valor de ( $r = 0,166$ ) lo que indica que existe una correlación nula, quiere decir que las variables profundidad de carbonatación y espesor de fisura no muestran relación alguna, además el valor de probabilidad de error es de 0,276 superior al parámetro de 0,05 con ello se determina que la no es significativa evidenciando que las dos variables son independientes, observando que la nube de puntos en la figura 61 están muy dispersos y muy lejos de la línea de tendencia.

Tabla 24

Correlaciones de Rho de Spearman de las alturas de los muros y espesor de fisura

			Altura de muro	Cantidad de fisuras	Espesor de fisura
Rho de Spearman	Altura de muro	Coefficiente de correlación	1,000	,074*	,076*
		Sig. (bilateral)	.	,016	,014
		N	1056	1056	1056
	Cantidad de fisuras	Coefficiente de correlación	,074*	1,000	,014
		Sig. (bilateral)	,016	.	,652
		N	1056	1056	1056
	Espesor de fisura	Coefficiente de correlación	,076*	,014	1,000
		Sig. (bilateral)	,014	,652	.
		N	1056	1056	1056

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

La tabla 21 muestra la prueba de correlación de Spearman muestra valores significativos en las siguientes relaciones de la altura del muro respecto a la

cantidad de fisuras se observa un valor de probabilidad de 0,016 que es menor a 0,05, de la misma forma de la altura del muro respecto al espesor de fisuras se observa un valor de probabilidad de 0,016 que es menor a 0,05, con ello se demuestra que se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

Ho: La aparición de fisuras en el concreto con espesores mayores a 0,30mm no es producto del proceso de carbonatación.

b. Prueba de hipótesis para identificar factores físicos y químicos que intervienen en el cambio del pH del concreto en el canal del túnel -río Asana 2018.

Ha: La humedad relativa, temperatura, características químicas del agua de infiltración del interior del túnel son factores que intervienen en el cambio del PH del concreto.

Ho: La humedad relativa, temperatura, características químicas del agua de infiltración del interior del túnel son factores que no intervienen en el cambio del PH del concreto.

**Tabla 25**

*Prueba de regresión lineal entre la temperatura y humedad relativa*

<b>Estadísticas de la regresión</b>	
Coefficiente de correlación	0,81
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,65
R <sup>2</sup> ajustado	0,60
Error típico	5,26
Observaciones	9

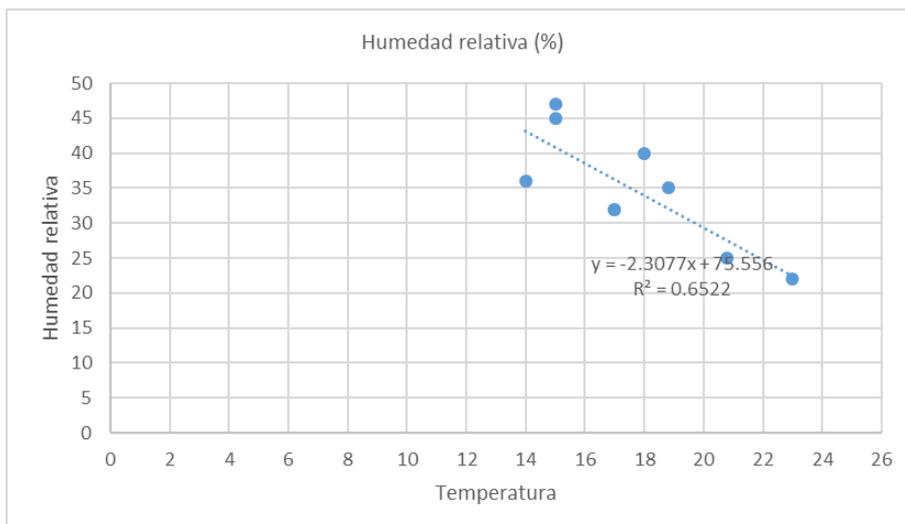


Figura 62. Prueba de regresión lineal

La tabla 22 y figura 62. Muestra la prueba de regresión lineal, mostrando un coeficiente de correlación de 0,81, la que indica que existe influencia inversamente proporcional fuerte y un coeficiente de determinación de 0,65 o 65% de influencia, evidenciando que; a menor temperatura existe mayor humedad relativa y a mayor temperatura es menor la humedad relativa.

**Tabla 26**

*Análisis de varianza entre la temperatura y humedad relativa*

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Valor crítico de F</b>
Regresión	1	363,187	363,187	3,125	0,008
Residuos	7	193,702	27,672		
Total	8	556,889			

La tabla 23 muestra la prueba de análisis de varianza muestra un valor de F de 13,125 con 8 grados de libertad, siendo superior al valor tabular de 5,59, de ello se infiere que la prueba de correlación es perfecta.

**Tabla 27***Análisis de varianza de la temperatura y humedad relativa*

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
Filas	645,125	44	14,662	77,620	0,000	1,415
Columnas	3,317	7	0,474	2,508	0,016	2,039
Error	58,179	308	0,189			
Total	706,621	359				

La tabla 24 muestra el análisis de varianza muestra resultados de filas y columnas, en la fila se tienen a 45 muestras con un valor de probabilidad de 0,000 y en columnas son las 8 medidas tomadas en cada muestra con un valor de probabilidad de 0,016, como ambos valores son menores a los parámetros 0,05, entonces se infiere que la prueba es significativa a un 95 % de confianza.

Los datos de la medición del ph que registra valores de hasta 10.91 siendo los límites máximos permisibles para el agua potable de 8,5 y los resultados de las humedades relativas con un 47% estando cerca al rango de 50 y 70% donde incide sobre los niveles de ph, y demostrando el modelo que mejor describe la relación entre la temperatura y humedad relativa.

Se acepta la hipótesis alternativa

Ha: La humedad relativa, temperatura, características químicas del agua de infiltración del interior del túnel son factores que intervienen en el cambio del PH del concreto.

- c. Prueba de hipótesis para determinar la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto.

Ha: La variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación será mayor a menor PH del concreto.

Ho: La variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación no será mayor a menor PH del concreto.

**Tabla 28**

*Estadísticos de correlación de Pearson de la profundidad de carbonatación y pH*

		Promedio (mm)	Valor de PH
Promedio (mm)	Correlación de Pearson	1	-,932**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	45	45
Valor de PH	Correlación de Pearson	-,932**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	45	45

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

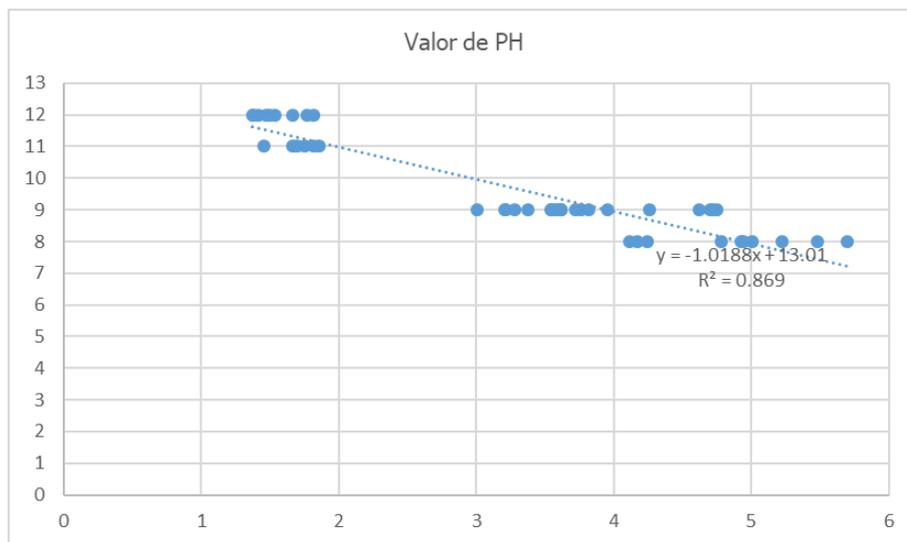


Figura 63. Correlación entre el promedio de profundidad de carbonatación y el valor de pH

La tabla 25 muestra la correlación entre el promedio de profundidad de carbonatación y el valor de PH muestra un valor de -0.932, de ello se evidencia que es una relación inversa, donde la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación es mayor a menor PH del concreto. En la figura 63 se observa el gráfico de la correlación.

Se acepta la hipótesis alternativa

Ha: La variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación será mayor a menor PH del concreto.

d. Prueba de hipótesis general Evaluar el proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

Ha: La evaluación del proceso de carbonatación, brindará el conocimiento para la identificación del cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

Ho: La evaluación del proceso de carbonatación, no brindará el conocimiento, para la identificación del cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

**Tabla 29**

*Comparaciones múltiples de la profundidad de carbonatación*

	(I) Muestras expuestas	(J) Muestras expuestas	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
DMS	Con Acero expuestas a 95 días	Sin Acero expuestas a 95 días	-1,049*	212	,000	-1,477	-,621
		Sin Acero expuestas a 77 días	1,901*	219	,000	1,458	2,343
	Sin Acero expuestas a 95 días	Con Acero expuestas a 95 días	1,049*	212	,000	,621	1,477
		Sin Acero expuestas a 77 días	2,949*	216	,000	2,513	3,385
	Sin Acero expuestas a 77 días	Con Acero expuestas a 95 días	-1,901*	219	,000	-2,343	-1,458
		Sin Acero expuestas a 95 días	-2,949*	216	,000	-3,385	-2,513

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

La tabla 26 muestra la prueba de diferencia de medias significativas (DMS) muestra que a 95 días con o sin acero es mas grande el valor numérico que lo representa en comparación a las sin acero a 77 días porque los valores son positivos en la diferencia de medias (I-J) todas estas diferencias tienen probabilidad de 0,000 la que evidencia que la prueba es significativa y confiable a un 95 %.

**Tabla 30**

*Comparaciones múltiples de valores del Ph del concreto*

(I) Muestras expuestas		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%		
					Límite inferior	Límite superior	
DMS del Ph	Con Acero expuestas a 95 días	Sin Acero expuestas a 95 días	,71429*	0,125	0,000	0,371	1,057
	Con Acero expuestas a 95 días	Sin Acero expuestas a 77 días	-2,43750*	0,203	0,000	-2,984	-1,891
		Con Acero expuestas a 95 días	- ,71429*	0,125	0,000	-1,057	-0,371
	Sin Acero expuestas a 95 días	Sin Acero expuestas a 77 días	-3,15179*	0,239	0,000	-3,764	-2,539
		Con Acero expuestas a 95 días	2,43750*	0,203	0,000	1,891	2,984
	Sin Acero expuestas a 77 días	Sin Acero expuestas a 95 días	3,15179*	0,239	0,000	2,539	3,764

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

La tabla 27 muestra la prueba de diferencia de medias significativas (DMS) muestra que a 95 días con o sin acero es menor el valor numérico que lo representa en comparación a las muestras expuestas sin acero a 77 días porque los valores son negativos en la diferencia de medias (I-J) todas estas diferencias tienen probabilidad de 0,000 la que evidencia que la prueba es significativa y confiable a un 95 %.

**Tabla 31**

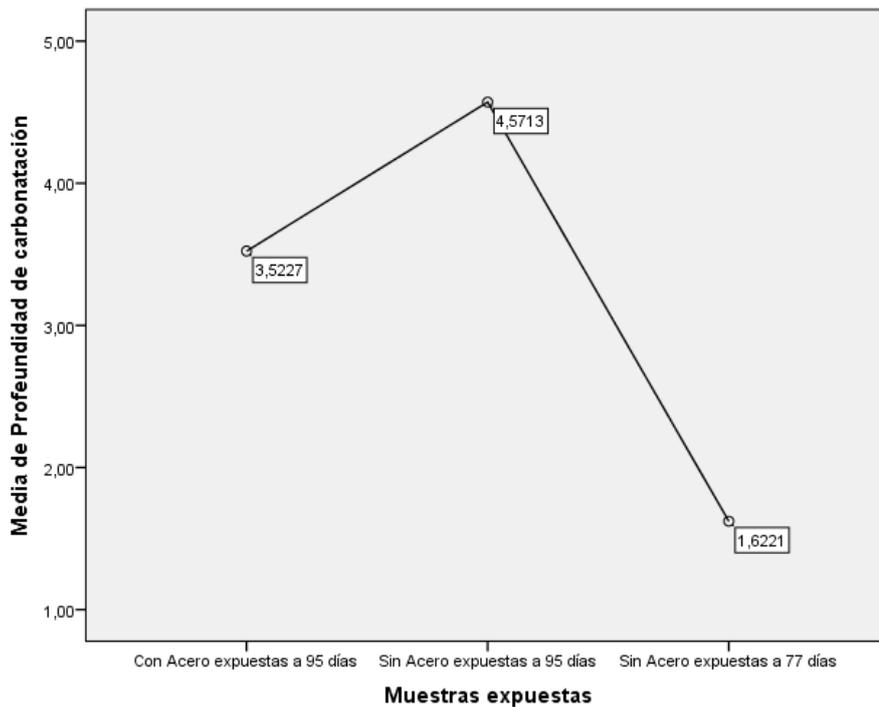
*Profundidad de carbonatación con HSD de Tukey*

		Profundidad de carbonatación			
	Muestras expuestas	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
			1	2	3
HSD de Tukey <sup>a,b</sup>	Sin Acero expuestas a 77 días	15	1,622		
	Con Acero expuestas a 95 días	15		3,523	
	Sin Acero expuestas a 95 días	15			4,571
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 14,955.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.



*Figura 64. Profundidad de carbonatación con HSD de Tukey*

En la tabla 28 y figura 64. Se puede observar la prueba de profundidad de carbonatación con HSD de Tukey muestra un promedio de 4,5713 sin Acero expuestas a 95 días siendo ésta superior a la de sin acero expuestas a 77 días.

**Tabla 32**

*Valores del pH del concreto con HSD de Tukey*

Muestras expuestas	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
HSD Tukey <sup>a,b</sup>	Sin Acero expuestas a 95 días	14	8,2857	
	Con Acero expuestas a 95 días	15		9,0000
	Sin Acero expuestas a 77 días	16		11,4375
	Sig.		1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 14,955.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

En la tabla 29 y figura 64. Se puede observar los valores del Ph del concreto con HSD de Tukey muestra un promedio de 8,2857 sin Acero expuestas a 95 días siendo este un valor menor a las muestras expuestas a 77 días.

**Tabla 33**

*Coefficientes de regresión de la temperatura y humedad relativa*

	Coefficien tes	Error típico	Estadístico t	Probabilid ad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	75,556	11,361	6.650	0,000	48,691	102.422
Temperatura(C°)	-2,308	0,637	-3,623	0,008	-3,814	-0.801

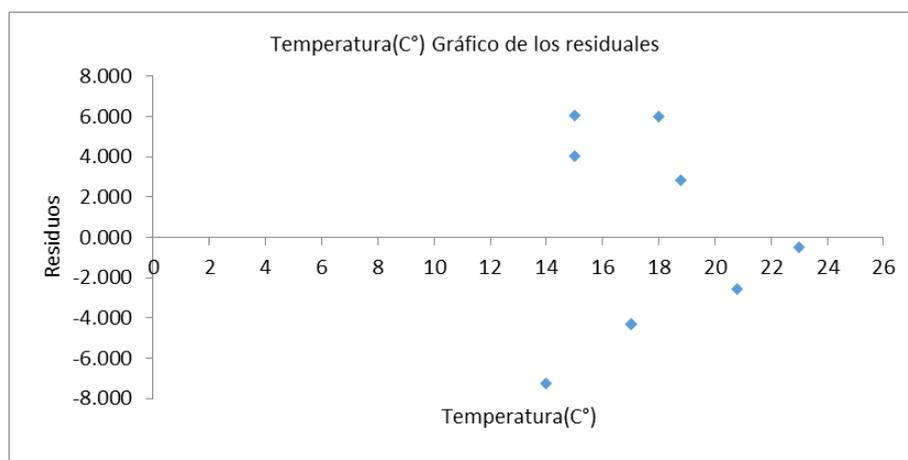
En la tabla 30 se puede observar el coeficiente de regresión muestra una intersección en el punto 75,556 dicho valor se encuentra adecuadamente entre los intervalos inferior de 48,691 y el superior de 102,422, con una probabilidad de

0,00 y confiable a un 95 %, además el coeficiente de temperatura es negativa; cuando la temperatura baja en 2,308 °C el porcentaje de humedad relativa incrementa en un punto porcentual en promedio demostrando que; la evaluación del proceso de carbonatación identifica el cambio de PH en el concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

**Tabla 34**

*Análisis de los residuales para el pronostico de la humedad*

Observación	Pronóstico Humedad relativa (%)	Residuos	Residuos estándares
1	36,325	-4,325	-0,879
2	32,171	2,829	0,575
3	40,940	4,060	0,825
4	22,478	-0,478	-0,097
5	27,555	-2,555	-0,519
6	36,325	-4,325	-0,879
7	34,017	5,983	1,216
8	43,248	-7,248	-1,473
9	40,940	6,060	1,231



*Figura 65. Residuales de temperatura*

En la tabla 31 se tiene el análisis de residuos y en la figura 65 podemos observar los residuales estandarizados de temperatura, muestran que todos ellos se

ubican muy próximos a cero, la que demuestra que los residuales garantizan que la prueba es perfecta y confiable.

Se acepta la hipótesis alternativa

**Ha:** La evaluación del proceso de carbonatación, brindará el conocimiento, para la identificación del cambio de PH en el concreto en el canal del túnel - río Asana 2018.

### **4.3. Discusión de resultados**

En esta investigación al evaluar el proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel - río Asana, se obtuvo el valor calculado ( $p_{\text{calculado}} = 0,000$ )  $<$  ( $p_{\text{tabular}} 0,05$ ) a través de la prueba de comparaciones múltiples, existiendo diferencia de medias significativas entre las muestra expuestas 95 días y las de 75 días. Esto quiere decir que sometiendo a una carbonatación natural muestras de concreto armado, con una diseño de concreto único y a diferentes tiempos de exposición si se puede hallar valores diferibles del avance de carbonatación y pH usando el método de disolución de fenolftaleína. Frente a lo mencionado se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de la investigación donde se define que realizar una evaluación del proceso de carbonatación, brindará el conocimiento para la identificación del cambio de pH en el concreto en el canal del túnel del río Asana. Estas afirmaciones se pueden comparar con el autor quien aplicó otro método para determinar el avance de carbontacion y pH, Moreno (2006) con el articulo científico, determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería, Vol.10 no.3*, pp.5-12, muestra una aplicación de un

método llamado Lixiviación In-Situ (LIS), método que examina el pH inicial de la solución del poro y sus cambios debido a la carbonatación en concretos de composición variada, obteniendo resultados donde el valor del pH final después de la exposición a la carbonatación acelerada fue menor conforme menor cantidad de cemento se utilizó en el material cementante y estuvo en el rango de ocho a 10 unidades clasificando a los especímenes de concreto parcialmente carbonatados, los valores de pH fluctuaron en un rango de 9,5 a 10. En tal sentido, bajo lo referido anteriormente y al analizar estos resultados confirmamos que utilizando el método de disolución de fenolftaleína o el método de método llamado Lixiviación In-Situ (LIS) los resultados obtenidos están en función del método de exposición, ya sea a una carbonatación acelerada o natural, los resultados varían en función del tiempo de exposición de las muestras y del diseño de mezcla de las muestras.

En esta investigación se identificó factores físicos y químicos que intervienen en el cambio del pH del concreto en el canal del túnel -río Asana 2018 se pudo encontrar con la prueba de regresión lineal un coeficiente de determinación de 0,65 o 65 % de influencia, evidenciando que; a menor temperatura existe mayor humedad relativa, ahora para el pH del agua de infiltración se usó los límites permisibles que nos permite identificar la agresividad del agua para el concreto, estos resultados son comparados con García (2011) en la universidad de Complutense de Madrid realizó su tesis doctoral *carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. Resuelve que cantidades similares de CO<sub>2</sub> absorbido durante un proceso de carbonatación pueden corresponder a diferentes valores de pH, en función de la HR, el tiempo y la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental. Además cuanto mayor sea el

potencial de absorción de CO<sub>2</sub> del concreto mas lento avanzara el frente de cambio de pH. En tal sentido bajo lo referido anteriormente y analizar los resultados confirmamos que los factores ambientales influyen en el cambio del pH, a si mismo lo importante que es registrar sus valores a lo largo del tiempo de exposición, para poder identificar cual es el factor principal que excede valores permisibles para puede desequilibrar el balance normal de las reacciones químicas que se da en el concreto, por último resaltar que el autor que se hace referencia midió los valores de CO<sub>2</sub> presentes en la atmosfera, en esta investigación no se registro los valores de CO<sub>2</sub> por no contar con el equipo, variable fundamental que hubiera enriquecido aún mas esta investigación.

En este estudio se determinó la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto, utilizando el método de correlación de pearson ( $p$  calculado= 0,000) < ( $p$  tabular 0,05) y un valor de -0,932, de ello se evidencia que es una relación inversa, evidenciando a mayor avance de carbonatación los valores del pH disminuyeron, frente a lo mencionado se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación donde se refiere que la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación es mayor a menor PH del concreto. Estos resultados son corroborados por Campos, Fajardo y Mendoza (2016) en su estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, Vol.8 no.1*, pp.14-34, donde sometió elementos prismáticos de concreto con dos tipos de cemento, sometidos a carbonatación acelerada y la otra serie a carbonatación natural, finalmente procedieron a utilizar

la solución de fenolftaleína en alcohol etílico obteniendo el pH del concreto, cabe resaltar que llevaron un control de la medición de variable ambientales, señalando que es posible obtener relaciones aceptables entre el proceso de carbonatación en un medio natural con respecto a un medio acelerado, para especímenes realizados con similar contenido y tipo de cemento, indicando que los resultados de los especímenes experimentados mostraron mayor profundidad de carbonatación comparando con la aplicación de la ecuación basada en la raíz cuadrada del tiempo. En tal sentido bajo lo referido anteriormente se afirma que es posible obtener relaciones aceptables entre el proceso de carbonatación midiendo el pH del concreto, resaltar que los valores obtenidos del avance de carbonatación con el método de disolución de fenolftaleína difieren de los resultados al aplicar la fórmula basada en la raíz cuadrada del tiempo, donde el avance de carbonatación muestra una menor dimensión (apéndice C) que la obtenida con el indicador de fenolftaleína.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

Se analizó la aparición de fisuras y su relación con el proceso de carbonatación del concreto en el canal del túnel, las fisuras que se presentaron con espesores mayores a 0,30mm, no es producto del proceso de carbonatación esto se infiere de los resultados de la medición de fisuras de los muros de concreto armado del canal, teniendo como base el código ACI 224R-01 donde recomienda el uso de una tarjeta transparente con líneas claramente marcadas, se verificó que el 53% registra espesores de fisuras mayores a 0,30 mm, sin embargo al aplicar la prueba de correlación de Pearson determinó una correlación nula con la profundidad de carbonatación, adicionalmente se utilizó correlaciones de Rho de Spearman encontrando una correlación de la altura del muro respecto a la cantidad de fisuras, por lo que se acepta la hipótesis nula, se presenta mayor cantidad de fisuras en los muros de 2,20 que son los muros con mayor dimensión en su altura.

Se identificó los factores físicos y químicos que intervienen en el cambio del pH del concreto en el canal del túnel, en cuanto a los factores se recolectó mediciones del pH del agua subterránea, humedades relativas y temperaturas, determinando que si intervienen en el cambio del pH del concreto, de los datos registrados del pH del agua de infiltración (aguas subterráneas) el 13,1 % de los valores registrados se encuentran por encima de los límites permisibles con un pH máximo de 10,91, en los resultados se presenta los valores máximos de la humedad relativa, llegando a registrar un 47 % valor cercano al 50 % siendo este el rango ideal (50 %-70 %) que favorece la carbonatación del concreto el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto causando la disminución del pH y con la prueba de regresión que mejor expresa la relación entre las variables se evidencio que existe influencia inversamente proporcional fuerte entre la humedad y temperatura. Se tuvo como limitación de medir los valores del dióxido de carbono presentes en el ambiente.

Se determinó la variación en el tiempo de la profundidad de carbonatación analizando el pH del concreto, comprobando que la variación de la profundidad de carbonatación es mayor a menor PH del concreto, aplicando el método de la correlación de Pearson se obtuvo un coeficiente de -0,932 de ello se evidencia que es una relación inversa y aplicando el método de HSD Tukey muestra una diferencia significativas en los valores de carbonatación de hasta 3mm de diferencia entre las muestras expuestas 95 días y 77 días, las muestras expuestas 95 días y 77 días (5 mm y 2 mm), mientras que los valores de pH se identifican que en las muestras expuestas a mayor tiempo de exposición (95 días) registra valores

de ocho pH y 12 para las muestras expuestas a 77 días, concluyendo que las muestras expuestas a 95 días se encuentran parcialmente carbonatadas. Y las muestras expuestas a 77 días se califica como no carbonatadas.

Según los resultados encontrados, se concluye que evaluar el proceso de carbonatación y cambio de pH del concreto en el canal del túnel del río Asana, brindó el conocimiento para hallar el avance de carbonatación y el valor del pH aproximado del concreto, aplicando el método de disolución de fenolftaleína, así mismo como lo indica la norma se verificó las condiciones de exposición de las muestras, registrando valores de la humedad relativa del ambiente y su temperatura, respecto a los valores encontrados con el modelo matemático de la regresión lineal para predecir el comportamiento de la relación temperatura y humedad relativa, se observó que cuando se registran temperaturas bajas la humedad relativa se incrementa. Estas correlaciones obtenidas entre profundidades de carbonatación y el cambio de pH del concreto y la identificación de factores físicos y químicos podrán ser empleado para calificar el estado del concreto, a su vez recomendar medidas de reparación del canal y proyectar la durabilidad del canal.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda realizar un nuevo mapeo de fisuras en los muros de concreto del canal en el interior del túnel del río Asana, considerando que las fisuras mayores a 0,30mm se repararon, sin embargo las fisuras menores a este espesor no se dieron tratamiento, estas con el paso del tiempo tienden a amplificar su espesor siendo gran influencia los factores externos que rodean al muro del canal. Se recomienda también de manera general verificar el proceso constructivo y consolidación en obras de concreto armado construidas en espacios confinados por presentar

condiciones limitantes en el desarrollo de actividades del proceso constructivo, se recomienda también verificar el diseño de juntas para el colocado del concreto contra las paredes del túnel especialmente en los tramos donde se proyecta muros con mayor altura.

Se recomienda realizar un análisis físico-químico y microbiológico al agua de infiltración del túnel del río Asana en diferentes puntos estratégicos a lo largo de todo el túnel en especial en los puntos con mayor presencia de filtraciones con el objetivo de conocer los componentes físicos y químicos del agua lo que permitiría definir los posibles ataques del agua en contacto con el concreto estos son diferentes tipos por tanto el control del mismo se efectuará de manera diferente, hacer mención importante recomendando contar con el equipo medidor de gases, la medición de los valores de dióxido de carbono presentes en el interior del túnel del río Asana, es importante para tener valores cuantificables de los factores que influyen en el avance de carbonatación, de tal manera dar recomendaciones de acciones de tratamientos adecuados y certeros ante signos de degradación del concreto.

Se recomienda como método para determinar el frente de avance de carbonatación exponer las muestras de concreto a un tiempo mayor o igual a un año de exposición, para tener resultados que reflejen dimensiones mayores de avances de carbonatación y determinar si este llega a alcanzar el acero donde se daría el inicio de corrosión, a su vez someter muestras de concreto con características diferentes resistencias, para definir su influencia del cemento en el avance de carbonatación, y como influiría en la resistencia a la compresión de estas.

Se recomienda realizar inspecciones a la estructura, para determinar las condiciones en la que se encuentra actualmente, considerar en la inspección como

lo recomienda (Rivva, 2014) en su libro “Ataques al concreto” donde recomienda una evaluación de descascaramiento, medidas del recubrimiento del concreto, análisis del ion cloruro, ensayo de la profundidad de carbonatación , determinación de la pérdida de sección transversal del acero de refuerzo, ensayos de resistencia a la comprensión en testigos insitu; ensayo rápido de permeabilidad a cloruros y otros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akopova, A. (2016). *Análisis comparativo de normativas, ACI 318-14 y EHE-08*. Trabajo de fin de grado, Universidade da Coruña, España. Obtenido de <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/17241>
- AngloAmerican. (2013). *Proyecto Quellaveco*. Obtenido de <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-Institucional/Encuentros-Regionales/2014/moquegua/eer-moquegua-2014-fernandez.pdf>
- Arango, S. (2015). *Porque es importante la química en el concreto*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/SergioPap/porque-es-importante-la-quimica-en-el-concreto-documento-original-traducido-por-sergio-arango>
- Aranha, P. (1994). *Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica*. Tesis de maestría, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Obtenido de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189640>
- Babiche , I. (2004). Carbonatación del recubrimiento de concreto. (concytec, Ed.) *Carbonatación del recubrimiento de concreto*. Obtenido de [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/IPEN\\_a4df549404d6c5b2263c072f9b05d6a8](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/IPEN_a4df549404d6c5b2263c072f9b05d6a8)
- Belenguer, F., Cosme, F., Osorio, A., Palencia, J., Serrano, B., & García, S. (2005). (I. V. Edificación, Ed.) Obtenido de <https://www.arquitectosdecadiz.com/wp-content/uploads/2017/12/Guia-inspeccion-estructuras-de-hormigon.pdf>
- Bolivar, G. (2018). *Lifeder.com*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/fenolftaleina/>

Calvo, R., & Sierra, M. (2015). *Proceso de carbonatación de los concretos hidráulicos para pavimento rígido*. Universidad de Cartagena, Colombia.

Obtenido de

<http://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/5755/MONOGRAFIA%20FINAL%20MARZO%202015%20-%20EMPASTADA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Campos, A., Fajardo, G., & Mendoza, J. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 8(1), 34.

Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/312492025\\_ESTUDIO\\_DEL\\_COMPORTAMIENTO\\_DEL\\_AVANCE\\_DE\\_LA\\_CARBONATACION\\_DEL\\_CONCRETO\\_REFORZADO\\_EN\\_AMBIENTE\\_NATURAL\\_Y\\_ACCELERADO\\_STUDY\\_OF\\_CARBONATION\\_BEHAVIOR\\_IN\\_REINFORCED\\_CONCRETE\\_IN\\_NATURAL\\_AND\\_ACCELERATED\\_CONDITI](https://www.researchgate.net/publication/312492025_ESTUDIO_DEL_COMPORTAMIENTO_DEL_AVANCE_DE_LA_CARBONATACION_DEL_CONCRETO_REFORZADO_EN_AMBIENTE_NATURAL_Y_ACCELERADO_STUDY_OF_CARBONATION_BEHAVIOR_IN_REINFORCED_CONCRETE_IN_NATURAL_AND_ACCELERATED_CONDITI)

Carmona, F., & Marega, A. (1988). Retrospectivada Patologíano Brasil; Estudio Estadístico. *CEDEX, IET*.

Castillo, A. (1996). *Tecnología del concreto*. Lima: San Macos.

Chambilla, G. (2017). *Planeamiento y Control de Costos de la Obra Túnel de Desvío del Río Asana Del Proyecto Minero Quellaveco - Moquegua Aplicando el Resultado Operativo*. Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Moquegua.

CME. (2013). *Scribd*. Obtenido de

<https://es.scribd.com/document/369004969/Plan-Calidad-Rev-B>

- CME. (2014). *Plan de manejo de aguas construcción del túnel de desvío de río Asana*. Consorcio Cosapi Mas Errazuris, Moquegua.
- CME. (2017). *Plan de ejecución y construcción obras complementarias*. Consorcio Cosapi Mas Errazuris, Moquegua.
- CME. (2018). *Diseño de mezcla de concreto túnel de desvío del río Asana-Obras complementarias*. Moquegua.
- CME. (2018). *Proceso de construcción de muro intermedio del canal interior del túnel de desvío del río Asana*. Moquegua.
- Dal Molin, D. (1992). *Fisuras em Estructuras de Concreto Armado*. Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Fernández, M., Aponte, B., Arias, S., Garcia, F., Rincón, O., & Larreal, O. (2005). Diseño de un modelo matemático computarizado de costosporcorrosión. (RevistaTécnicadeIngeniería, Ed.) *Diseño de un modelo matemático computarizado de costosporcorrosión*.
- Galán, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Madrid. Obtenido de <http://eprints.ucm.es/14424/1/T33374.pdf>
- García, I. G. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO<sub>2</sub> con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. (C. d. pH, Ed.) Obtenido de Tesis doctorales en red: <http://eprints.ucm.es/14424/1/T33374.pdf>

- Gaspar, D., & Muñoz, M. (1977). Acción del CO<sub>2</sub> sobre un cemento portland. *Materiales de Construcción*(165), 17. Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1196/1330>
- GEHO, G. (1992). Encuesta sobre Patologías de Estructuras de Hormigón. *Boletín* 10.
- Halvorsen, G. T., Barlow, P., Fowler, D., Barth, F., Hansen, W., Boggs, H., & Liu, T. (1993). *Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón- Informado por el Comité ACI 224*. Michigan EEUU: American Concrete Institute. Obtenido de <https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/273>
- Halvorsen, G., & Poston, R. (1993). *Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón*. Obtenido de [https://www.academia.edu/18170174/HORMIGON\\_Causas\\_evaluaci%C3%B3n\\_reparaci%C3%B3n](https://www.academia.edu/18170174/HORMIGON_Causas_evaluaci%C3%B3n_reparaci%C3%B3n)
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). Mexico: Mc Graw Hill. Obtenido de [https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)
- Iloro, F., Traversa, L., & Ortega, N. (2016). Correlación entre carbonatación natural y acelerada del hormigón con distintos cementos. *VII Congreso Internacional-21ª Reunión Técnica de la AATH*. Obtenido de

[https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/4921/11746\\_4921.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/4921/11746_4921.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ingeroc, 2. (2011). *Geología del área de estudio del proyecto Quellaveco*.

Moquegua. Obtenido de

[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP\\_96df17c8ecc97c67336a29fa238e9dbc](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_96df17c8ecc97c67336a29fa238e9dbc)

Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. EE.UU.

Lopez, J. (2004). Porosidad Del Concreto.

Luisa. (2014). *fisicayquimica*. Obtenido de

<http://fisicayquimicadominicas.blogspot.com/2014/04/>

Magalhaes, C., Folloni, R., & Furman, H. (1989). Análise da Patología das Obras de Arredo Município de São Paulo. Simposium Nacional de Reforço, Reparo e Proteção das Estruturas de Concreto. *São Paulo, EUSP*, 17.

Marchena Córdova, J. (2017). *Estructuras de concreto y corrosión del acero corrugado en la*. Tesis, Universidad Cesar Vallejo, Lima.

Ministerio de Salud. (2011). *Digesa Minsa*. Obtenido de

[http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento\\_Calidad\\_Agua.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf)

Molina, E. (2009). *Monitoreo y diagnóstico de estructuras de concreto armado afectadas por corrosión de cloruros*. Tesis, Universidad Nacional de

Ingeniería, Lima, Lima. Obtenido de

<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/439>

- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC-Revista Construcción y Tecnología*. Obtenido de <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>
- Morcillo, M., & miembros del proyecto MICAT. (1998). Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica. *MICAT, Proyecto XV.1/CYTED*.
- Moreno, E. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería, 10*, 5-12. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46710301.pdf>
- Neville, A. (2007). *Tecnología del concreto, Cemento Portland* (Cuarta Edición ed.). Mexico: IMCYC.
- Neville, A., & Brooks, J. (1993). *Concrete technology*, Longman Group UK Ltd.
- Nina, R. (2014). *Estudio Geológico - Geotécnico del Proyecto Túnel de desvío Río Asana- Quellaveco - Moquegua*. Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Nince, A. (1996). Levantamiento de Datos sobre la Deterioración de Estructuras en la Región Centro Oeste. *Faculdade de Tecnología, Universidade de Brasilia*.
- NTP 339.047. (2019). *CONCRETO. Definiciones y terminología relativas al concreto y agregados* (3ra Edición ed.). Lima: Dirección de Normalización - INACAL.
- Olivares, M. (2013). *Evaluación de la durabilidad de estructuras de concreto armado utilizando equipos y métodos de ensayos no destructivos*. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Obtenido de [https://scholar.google.com.pe/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=EVALU](https://scholar.google.com.pe/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=EVALU)

ACI% C3% 93N+DE+LA+DURABILIDAD+DE+ESTRUCTURAS+DE+  
CONCRETO+ARMADO+UTILIZANDO+EQUIPOS+Y+M% C3% 89TO  
DOS+DE+ENSAYOS+NO+DESTRUCTIVOS+&btnG=

Pérez , L. (2010). *Vida útil residual de estructuras de Hormigón Armado afectadas por corrosión*. Universidad Politécnica de Madrid. .

Rio, L. S. (2007). *Inspección y evaluación del estado de corrosión del acero de refuerzo en cuatro decantadores de la planta N°1- La Atarjea/SEDAPAL*.

Lima. Obtenido de

<http://www.sedapal.com.pe/Contenido/licitaciones/AMC-0043-2013-2DACOVINTEGRADAS/TOMO%20II/Anexo%20III/Informe%20Corrosion%20Decantadores.pdf>

Rivva, E. (2014). *Ataques al concreto* (Vol. 3). Lima: Instituto de la construcción y Gerencia.

Rivva, E. (2014). *Concreto- Ataques al concreto* (2da ed., Vol. 4). Lima: Instituto de la construcción y Gerencia- ICG. Recuperado el 14 de Marzo de 2019

Rodríguez, F. (2017). *Blog de Laboratorio Clínico y Biomédico*. Recuperado el 29 de Setiembre de 2018, de <https://www.franrzm.com/ph-y-soluciones-tampon/>

San Juan, M., & Castro , P. (2001). Acción de los agentes· químicos y físicos

sobre el concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.*,

46. Obtenido de

[http://imcyc.com/redcyc/imcyc/biblioteca\\_digital/ACCION\\_DE\\_LOS\\_AGENTES\\_QUIMICOS\\_Y\\_FISICOS\\_SOBRE\\_EL\\_CONCRETO](http://imcyc.com/redcyc/imcyc/biblioteca_digital/ACCION_DE_LOS_AGENTES_QUIMICOS_Y_FISICOS_SOBRE_EL_CONCRETO)

Santiago, J. R. (1984). *Informes de la construcción*. Obtenido de [https://scholar.google.com.pe/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=AN%C3%81LISIS+DE+LAS+CONDICIONES+DE+FISURACION+EN+LAS+ESTRUCTURAS+DE+HORMIG%C3%93N+ARMADO+Y+SU+RELACION+C3%93N+CON+LA+PROBABILIDAD+DE+CORROSI%C3%93N+DE+LAS+ARMADURAS&btnG=](https://scholar.google.com.pe/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=AN%C3%81LISIS+DE+LAS+CONDICIONES+DE+FISURACION+EN+LAS+ESTRUCTURAS+DE+HORMIG%C3%93N+ARMADO+Y+SU+RELACION+C3%93N+CON+LA+PROBABILIDAD+DE+CORROSI%C3%93N+DE+LAS+ARMADURAS&btnG=)

Sika. (2014). *Sika*. Obtenido de

<http://www.mvsrepresentaciones.com/documentos/concreto/hts.pdf>

Téllez, J., & Cote, M. (2006). *scielo*. Obtenido de

<http://www.scielo.org.co/pdf/rfmun/v54n1/v54n1a05.pdf>

Troconis de Rincon, O. (2011). Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado. *Revista de la Universidad del Zulia, Ciencias del Agro, Ingeniería y Tecnología*, 154. Obtenido de <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/rluz/article/viewFile/12644/12632>

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Suecia*.

Valderrama, S. (2002). *Pasos para elaborar proyectos y tesis de investigación científica*. Lima: San Marcos.

Valdez, P., Durán, A., Fajardo, G., & Juárez, C. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 10. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432009000100005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432009000100005)

- Vara, A. (2012). *7 Pasos para una tesis exitosa*. Lima. Obtenido de <http://www.administracion.usmp.edu.pe/investigacion/files/7-PASOS-PARA-UNA-TESIS-EXITOSA-Desde-la-idea-inicial-hasta-la-sustentaci%C3%B3n.pdf>
- Veleva, L., & Alpuches, M. (2002). Outdoor Atmospheric Corrosion. H.E. Townsend (Ed), ASTM, STP 1421. *American Society for Testing and Materials Internacional*.
- Vento, J., & Zanabria, C. (2004). *¿Como hacer un proyecto de investigación científica?* Editores S.A.C.
- Yoris, A., Carrasco, M., Belbey, F., Guiladucci, A., Marcipar, A., Segovia, M., . . . Ulibarrie, N. (2010). Carbonatación del Hormigón Armado: Influencia de la Contaminación Ambiental Urbana. *Patología y recuperación de estructuras*, (pág. 14). Argentina. Obtenido de [http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar\\_2010/Topico%201/CINPAR%20096.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%201/CINPAR%20096.pdf)
- Yura, C. (Diciembre de 2013). *Untitled - ASOCEM*. Obtenido de [http://www.asocem.org.pe/archivo/files/ficha\\_tecnica\\_he.pdf](http://www.asocem.org.pe/archivo/files/ficha_tecnica_he.pdf)