



Uleam
UNIVERSIDAD LAICA
ELOY ALFARO DE MANABÍ

**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA
CARREA INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN**

TÍTULO:

**“DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE
CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA PÉRDIDA DE
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN ARMADO EN LAS PILAS DEL
PASO A DESNIVEL UBICADO EN LA PARROQUIA TARQUI DE
LA CIUDAD DE MANTA”**

AUTOR:

CANTOS MENDOZA ROQUE JOSÉ

TUTOR:

ING. MENDOZA BRANDS FREDDY, MG.

MANTA – MANABÍ - ECUADOR

2024

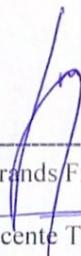
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR DE TESIS

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de proyecto de investigación, cuyo tema del proyecto “DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA PÉRDIDA DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN ARMADO EN LAS PILAS DEL PASO A DESNIVEL UBICADO EN LA PARROQUIA TARQUI DE LA CIUDAD DE MANTA”, el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente. La autoría del tema desarrollado corresponde al señor CANTOS MENDOZA ROQUE JOSÉ, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2024(2), quien se encuentra apto para la sustentación de su trabajo de titulación. Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 20 diciembre del 2024.

Lo certifico,



Ing. Mendoza Brands Freddy Hernán, Mg.
Docente Tutor

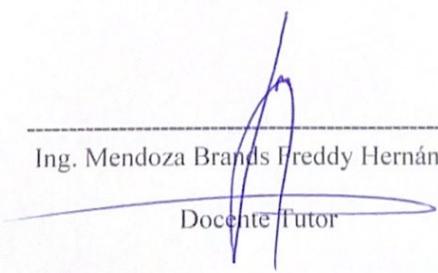
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR DE TESIS

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de proyecto de investigación, cuyo tema del proyecto “DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA PÉRDIDA DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN ARMADO EN LAS PILAS DEL PASO A DESNIVEL UBICADO EN LA PARROQUIA TARQUI DE LA CIUDAD DE MANTA”, el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente. La autoría del tema desarrollado corresponde al señor CANTOS MENDOZA ROQUE JOSÉ, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2024(2), quien se encuentra apto para la sustentación de su trabajo de titulación. Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 20 diciembre del 2024.

Lo certifico,



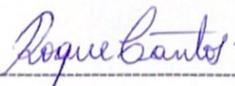
Ing. Mendoza Brands Freddy Hernán, Mg.

Docente Tutor

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que el presente proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil pertenece a mi autoría. Por tanto, los análisis, deducciones y conclusiones del proyecto son estrictamente del autor, evidenciando como respaldo las citas referencias bibliográficas que pertenecen a la ejecución de este y a su vez claramente respetando los derechos de los autores referenciados. Declaro que el patrimonio intelectual de este proyecto de titulación pertenece a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Manta, diciembre del 2024



Cantos Mendoza Roque José

C.I: 131645402-2

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL EXAMINADOR



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

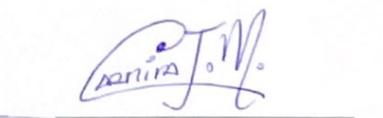
Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación siguiendo la modalidad de Proyecto de Investigación, titulado: "DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA PÉRDIDA DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN ARMADO EN LAS PILAS DEL PASO A DESNIVEL UBICADO EN LA PARROQUIA TARQUI DE LA CIUDAD DE MANTA" elaborado por el egresado: CANTOS MENDOZA ROQUE JOSÉ de la Carrera de Ingeniería Civil.

INGENIERO CIVIL

Aprobado por el Tribunal Examinador



Ing. Efrén Loor Loor. Mg
Miembro del tribunal



Ing. Carmita Jiménez Merchan. Mg
Miembro del tribunal

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, familia y amigos por su apoyo incondicional a lo largo de mi trayectoria como estudiante.

Cantos Mendoza Roque José

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por haberme dado la sabiduría en cada momento.

A mi familia por ser el pilar fundamental en mi guía diaria.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y a la carrera de Ingeniería Civil por haberme permitido formarme como profesional con los excelentes docentes que poseen.

Cantos Mendoza Roque José

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es Determinar la profundidad de carbonatación y su influencia en la pérdida de resistencia a compresión del hormigón en las Pilas del Paso a desnivel Tarqui, para así determinar una ecuación de correlación que permita calcular la profundidad de carbonatación con respecto a una resistencia a compresión dada. Las profundidades de carbonatación se presentan en milímetros y la correlación es de tipo lineal, realizada con 8 muestras las cuales fueron extraídas por medio del Ensayo de Diamantina y ensayas en el Laboratorio de suelos de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Se obtuvo como resultado las profundidades de carbonatación de 4 pilas del Paso a desnivel Tarqui, al igual se obtuvo una ecuación que permite correlacionar la profundidad de carbonatación con la resistencia a compresión $P = 62.7377 + (-0.2584 R)$, la cual permite analizar que las pilas que presentan mayor profundidad de carbonatación en este caso la Pila 3 son mas susceptibles a la perdida de resistencia a compresión, debido a que la carbonatación ataca en un área estructural localizada.

Los estudios muestran que a medida que aumenta la profundidad de carbonización, aumenta la vulnerabilidad del hormigón al ambiente externo, lo que afecta directamente su resistencia mecánica y durabilidad.

Palabras claves: Profundidad de carbonatación, Resistencia del hormigón, Corrosión, Hormigón estructural, Paso a desnivel Tarqui, Correlación lineal.

ABSTRACT

The objective of the present study is to determine the depth of carbonation and its influence on the loss of compressive strength of concrete in the Piles of the Tarqui Overpass, in order to determine a correlation equation that allows calculating the depth of carbonation with respect to a given compressive strength. The carbonation depths are presented in millimeters and the correlation is linear, carried out with 8 samples which were extracted through the Diamantina Test and tests in the Soil Laboratory of the Laica Eloy Alfaro University of Manabí.

The carbonation depths of 4 piles of the Tarqui Overpass were obtained as a result, and an equation was obtained that allows the carbonation depth to be correlated with the compressive strength $P = 62.7377 + (-0.2584 R)$, which allows us to analyze that The piles that have a greater depth of carbonation, in this case Pile 3, are more susceptible to the loss of compressive strength, because the carbonation attacks a structural area. located.

Studies show that as the depth of carbonization increases, the vulnerability of concrete to the external environment increases, which directly affects its mechanical strength and durability.

Keywords: Carbonation depth, Concrete strength, Corrosion, Structural concrete, Tarqui overpass, Linear correlation.

Tabla de Contenido

Capítulo I.....	16
1. El Problema.....	16
1.1 Introducción.....	16
1.2 Planteamiento del Problema.....	17
1.3 Justificación.....	17
1.4 Objeto de la Investigación.....	18
1.5 Hipótesis.....	18
1.6 Objetivos.....	18
1.6.1 Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos.....	18
1.7 Alcance.....	19
1.8 Descripción General de la Zona.....	19
Capítulo II.....	21
2. Marco Teórico.....	21
2.1 Pila Capitel.....	21
2.2 Factores que Generan Deterioro en el Hormigón Armado.....	22
2.2.1 La Carbonatación.....	22
2.2.2 Factores que Influyen en la Carbonatación.....	24
2.3 Efectos de la Carbonatación.....	31
2.3.1 Corrosión del Acero de Refuerzo.....	31
2.3.2 Ambiente Urbano.....	33
2.3.3 Ambiente Rural.....	34
2.3.4 Ambiente Marino.....	34
2.4 Ecuación de la Recta.....	35
Capítulo III.....	36
3. Diseño Metodológico.....	36
3.1 Enfoque de la Investigación.....	36
3.2 Ensayos no Destructivos.....	36
3.2.1 Ensayo de Carbonatación.....	37
3.2.2 Ensayo de Pachometría.....	40
3.2.3 Ensayo de Esclerometría.....	41
3.3 Ensayos Destructivos y Semidestructivos.....	42
3.3.1 Ensayo de Extracción de Núcleo o Testigo.....	43
3.3.2 Ensayo de Compresión en Cilindros de Concreto.....	45
3.4 Correlación Ecuación de la Recta.....	47



3.5	Influencia del Coeficiente de Carbonatación en la pérdida de Resistencia del Hormigón Armado.....	49
3.5.1	Hormigón Armado.....	49
3.5.2	Acero de Refuerzo.....	49
3.5.3	Resistencia a Compresión del Hormigón Armado.....	50
3.5.4	Influencia del Coeficiente de Carbonatación.....	51
4.	Resultados y Discusión.....	51
3.1	Ubicación del Paso a Desnivel Tarqui.....	51
3.2	Ensayos de Campo.....	52
3.2.1	Ensayo de Esclerometría.....	52
3.2.2	Extracción de Núcleo.....	64
3.2.3	Ensayo Carbonatación.....	65
3.2.4	Ensayo Resistencia a la Compresión.....	69
3.2.5	Correlación entre la Profundidad de carbonatación y la Resistencia a Compresión.....	71
	CONCLUSIONES.....	74
	RECOMENDACIONES.....	75
	REFERENCIAS.....	76
	ANEXOS.....	79

Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación del Puente.	20
Figura 2 Vista en Planta del Puente.	20
Figura 3 Paso a Desnivel Tarquí.	21
Figura 4 Pila Capitel.	21
Figura 5 La carbonatación del concreto. Un problema en un mundo industrializado..	22
Figura 6 Corrosión en Armaduras inducidas por carbonatación en estructuras de concreto reforzado.	23
Figura 7 Formulación básica de los procesos de carbonatación en el cemento.	26
Figura 8 Esquema del Proceso de Carbonatación.	33
Figura 9 Ensayo Pachometro Paso a desnivel Tarquí.	40
Figura 10 Taladro Diamantina.	43
Figura 11 Prensa para Ensayos de Hormigón Laboratorio de Suelos Uleam.	46
Figura 12. Correlación Martillo Schmidt. Laboratorio Uleam.	52
Figura 13 Extracción de Núcleo en Paso a desnivel Tarquí.	65
Figura 14 Interpretación Profundidad de Carbonatación en Cilindros Extraídos.	68
Figura 15 Ensayo Compresión Prensa Laboratorio de Suelos Carrera de Ingeniería Civil.	69
Figura 16 Indicador de Carbonatación.	79
Figura 17 Ensayo Carbonatación Testigo 1.	79
Figura 18 Ensayo Carbonatación Testigo 2.	79
Figura 19 Ensayo Carbonatación Testigo 3.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20 Ensayo Carbonatación Testigo 4.	80
Figura 21 Ensayo Carbonatación Testigo 5.	80
Figura 22 Ensayo Carbonatación Testigo 6.	81



Figura 23 Ensayo Carbonatación Testigo 7.....	81
Figura 24 Ensayo Carbonatación Testigo 8.....	81
Figura 25 Ensayo Esclerometría.....	82
Figura 26 Ensayo Esclerometría.....	82
Figura 27 Ensayo Esclerometría.....	82
Figura 28 Ensayo Diamantina	83
Figura 29 Ensayo Diamantina	83
Figura 30 Ensayo Diamantina	83
Figura 31 Ensayo Diamantina	84
Figura 32 Ensayo Diamantina	84
Figura 33 Ensayo Diamantina	84
Figura 34 Pila ensayada.....	85
Figura 35 Perforación para tacos.....	85
Figura 36 Pachometría previo a Ensayo.....	85
Figura 37 Bomba Manual para Taladro.....	86
Figura 38 Taladro Ensayo Diamantina	86
Figura 39 Pachometría en pilas.	86
Figura 40 Tacos sujetación bases Taladro.	87
Figura 41 Tacos Metálicos.....	87
Figura 42 Perforación de pilas.....	87
Figura 43 Carbonatación en sitio.....	88
Figura 44 Pachometría.....	88
Figura 45 Prensa Ensayo a Compresión.....	88
Figura 46 Ensayo Resistencia a Compresión.	89
Figura 47 Ensayo Resistencia a Compresión.	89

Figura 48 Testigos ensayados..... 89

Figura 49 Testigos ensayados..... 90

Figura 50 Testigos ensayados..... 90

Figura 51 Ensayo Laboratorio Ingeniería Civil..... 90

Figura 52 Corte de Testigos para relación 1:2..... 91

Figura 53 Corte de Testigos para relación 1:2..... 91

Figura 54 Corte de Testigos para relación 1:2..... 91

Figura 55 Resultados Ensayo a Compresión..... 92

Figura 56 Resultados Ensayo a Compresión..... 92

Figura 57 Resultados Ensayo a Compresión..... 93

Figura 58 Resultados Ensayo a Compresión..... 93

Índice de Tablas

Tabla 1 Presenta el cambio de f_c con la temperatura 30

Tabla 2 Identificación Testigos Extraídos.....	65
Tabla 3 Resultados Ensayo de Carbonatación.....	66
Tabla 4 Resultados Ensayo de Compresión Laboratorio de Suelos Uleam.....	70

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°1.....	54
Gráfica 2. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°2.....	55



Gráfica 3. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°3.....	57
Gráfica 4. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°4.....	58
Gráfica 5. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°5.....	60
Gráfica 6. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°6.....	61
Gráfica 7. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°7.....	63
Gráfica 8. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°8.....	64
Gráfica 9 Coeficiente de Carbonatación.....	66
Gráfica 10 Profundidad de Carbonatación.	67
Gráfica 11 Gráfica Coeficiente y Profundidad de Carbonatación.....	67
Gráfica 12 Resistencia a Compresión de los cilindros extraídos.	70
Gráfica 13 Correlación Profundidad de Carbonatación-Resistencia a Compresión.	71
Gráfica 14 Correlación dada por la Ecuación de la Recta.....	73

Capítulo I

1. El Problema.

1.1 Introducción

La infraestructura vial es fundamental para el desarrollo y la conectividad de las comunidades, desempeñando un papel crucial en el transporte de personas y bienes. Dentro de esta infraestructura, los puentes son elementos críticos que permiten la continuidad de las redes viales sobre obstáculos naturales y artificiales. En el contexto del Ecuador, el Puente de desnivel, ubicado en la parroquia Tarqui del cantón Manta, se erige como una pieza clave en la infraestructura de transporte de la región. Sin embargo, como cualquier estructura de concreto armado, está sujeto a diversos procesos de deterioro, entre los cuales la carbonatación es uno de los más comunes y preocupantes.

La carbonatación es un proceso químico que ocurre cuando el dióxido de carbono presente en la atmósfera penetra en el concreto y reacciona con el hidróxido de calcio presente en el mismo, formando carbonato de calcio. Este fenómeno, aunque aparentemente inofensivo, puede tener consecuencias significativas para la durabilidad y la integridad estructural del concreto armado. La principal preocupación radica en la reducción del pH del concreto, lo que puede afectar las armaduras de acero y hacerlas susceptibles a la corrosión. La corrosión del acero de refuerzo puede llevar a una pérdida de sección y resistencia, así como a la fisuración y el desprendimiento del recubrimiento de concreto, comprometiendo la seguridad y funcionalidad de la estructura (Oscar Arellano, 2024).

El presente estudio tiene como objetivo principal analizar el proceso de carbonatación en el Puente Tarqui, evaluando su grado de avance y las posibles implicaciones para la durabilidad y seguridad de la estructura. Para ello, se realizarán ensayos y análisis de laboratorio sobre muestras extraídas del puente, complementados con estudios de campo que permitan identificar las condiciones ambientales y de exposición que favorecen el proceso de carbonatación. Además, se revisarán las características constructivas y el historial de mantenimiento del puente, con el fin de entender mejor los factores que pueden estar influyendo en la velocidad de carbonatación.

1.2 Planteamiento del Problema.

El puente de desnivel en la parroquia Tarqui, cantón Manta, es clave para el tránsito diario. Con el tiempo, el concreto armado puede deteriorarse debido a la carbonatación, proceso que reduce el pH, desprotege las armaduras de acero y las hace susceptibles a la corrosión. Evaluar este deterioro es fundamental para planificar el mantenimiento y asegurar su durabilidad y seguridad.

1.3 Justificación

La infraestructura vial es una columna vertebral esencial para el desarrollo económico y social de cualquier región. En particular, los puentes juegan un rol crucial en garantizar la conectividad y la movilidad, facilitando el transporte de personas y mercancías y contribuyendo significativamente al crecimiento y desarrollo de las comunidades. El puente de desnivel ubicado en la parroquia Tarqui del cantón Manta es un claro ejemplo de infraestructura vital que soporta una gran cantidad de tráfico y sirve como un punto neurálgico en la red vial de la región.

A lo largo del tiempo, las estructuras de concreto armado, como el puente de desnivel de Tarqui, están expuestas a diversos agentes de deterioro que pueden

comprometer su integridad y seguridad. Entre estos agentes, la carbonatación del concreto es un proceso químico de gran relevancia, ya que puede inducir la corrosión del acero de refuerzo, debilitando la estructura y poniendo en riesgo su funcionalidad y seguridad. La carbonatación ocurre cuando el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera penetra en el concreto y reacciona con el hidróxido de calcio, formando carbonato de calcio y reduciendo el pH del concreto. Esta disminución del pH desactiva el acero de refuerzo, haciéndolo susceptible a la corrosión, lo que puede llevar a daños significativos como la fisuración, desprendimiento del recubrimiento y, en última instancia, el fallo estructural.

1.4 Objeto de la Investigación

La carbonatación en la estructura del puente a desnivel ubicado en la parroquia Tarqui.

1.5 Hipótesis

La velocidad y el grado de carbonatación en puentes de hormigón armado están significativamente influenciados por las condiciones ambientales locales, la calidad del hormigón y las características de diseño y construcción.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la profundidad de carbonatación en la pérdida de resistencia a compresión en las pilas del paso a desnivel de Tarqui.

Objetivos Específicos

1. Determinar la profundidad de carbonatación en las diferentes extracciones realizadas.

2. Realizar ensayos de resistencia a compresión en testigos extraídos por medio del ensayo diamantina.
3. Correlacionar las profundidades de carbonatación con las distintas resistencias a compresión y analizar en que profundidades de carbonatación se produce la afectación de pérdida de resistencia a compresión en el hormigón.
4. Identificar la o las pilas que poseen mayor profundidad de carbonatación y presentan baja resistencia a compresión.
5. Determinar la ecuación de correlación que explique la relación entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión sobre la base de los datos obtenidos de los ensayos.

1.7 Alcance

Realizar ensayos experimentales o análisis de campo para determinar la profundidad de carbonatación en las pilas del paso a desnivel. Esto implica medir la profundidad de carbonatación en diferentes secciones de las pilas y correlacionar estos datos con el tiempo de exposición, la calidad del concreto y otros factores como la humedad y la temperatura.

1.8 Descripción General de la Zona

El puente se encuentra ubicado en la Ciudad de Manta, en la parroquia Tarqui cerca del Río Manta en la Avenida 4 de noviembre.



Figura 1 Ubicación del Puente.

Fuente: Google Earth, 2024.

Nota. Ubicación del puente a desnivel Tarquí

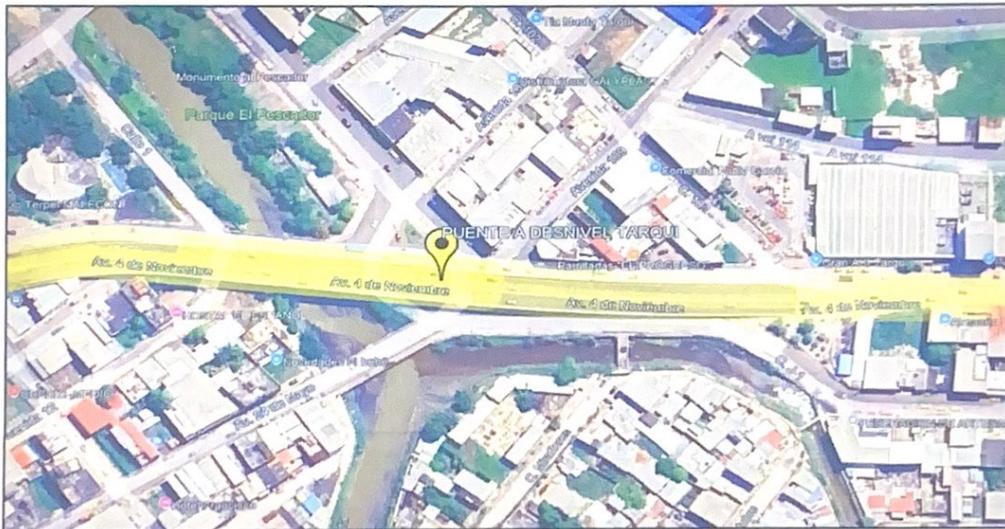


Figura 2 Vista en Planta del Puente.

Fuente: Google Earth, 2024.

Nota. Vista en Planta del puente a desnivel Tarquí

Paso elevado inaugurado en 1992 por Jhony Llor, fue una obra de desarrollo vial Manta-Tarquí construido de hormigón armado con vigas tipo ducto cajón, pilas centrales y secundarias. Actualmente es de gran aporte para el transporte de vehículos que constantemente transitan en el lugar, no solo por necesidad particular, sino también por

factores como trabajo, convirtiéndose en una obra emblemática de la de la Parroquia Tarquí del Cantón Manta.

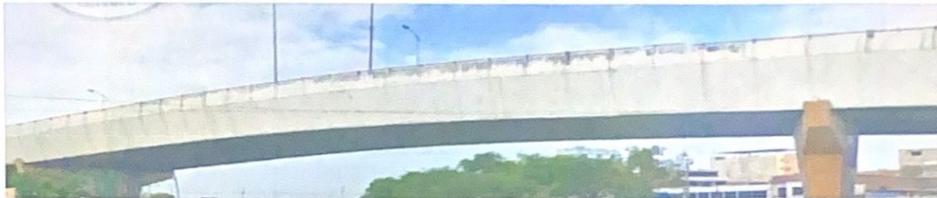


Figura 3 Paso a Desnivel Tarquí

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo II

2. Marco Teórico.

2.1 Pila Capitel

El capitel tiene la función de interconexión entre tablero y pila, transmitiendo las cargas del tablero a la pila. Para esta función los capiteles pueden llevar neoprenos, o bien estar empotradas directamente en el tablero. (Lázaro, 2024)



Figura 4 Pila Capitel.

Fuente: Lázaro, 2024.

Nota. Tipología Constructiva de Puentes

2.2 Factores que Generan Deterioro en el Hormigón Armado.

2.2.1 La Carbonatación

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos (Montani, 2000).

La 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).

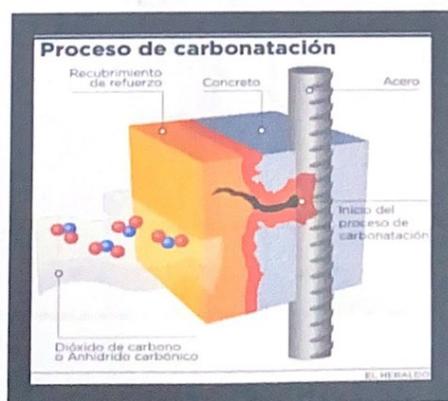


Figura 5 La carbonatación del concreto. Un problema en un mundo industrializado.

Fuente: (Cardenas, 2017)

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar (Montani, 2000).

Una de las condicionantes del proceso corrosivo del acero de refuerzo en las estructuras de concreto, es precisamente el fenómeno de la Carbonatación (Fig. 2). El concreto del recubrimiento de cualquier elemento estructural, puede perder la alcalinidad que mantiene protegida a la varilla de acero de refuerzo, lo que puede producir una herrumbre que se puede expandir a toda la armadura, proceso que termina por hacer “explotar” y desprender el concreto que la recubre (recubrimiento). A partir de este instante, la varilla de acero pierde parte de su sección transversal original, lo que también, con el tiempo, puede conducir al deterioro de la propia estructura (Vidaud, 2012).



Figura 6 Corrosión en Armaduras inducidas por carbonatación en estructuras de concreto reforzado.

Fuente: (Vidaud, 2012)

Generalmente, el fenómeno de la carbonatación es un proceso fisicoquímico complejo que modifica lentamente en el tiempo la estructura del concreto, induciendo a cambios en sus propiedades físicas. Por lo general, el fenómeno avanza del exterior al interior de la masa de concreto del elemento; ahí tiene mucho que ver el tiempo y la profundidad de afectación. La carbonatación penetra a través de los poros del concreto hasta alcanzar y des pasivar al acero de refuerzo. Este momento es conocido por los especialistas como avance del frente de carbonatación (Vidaud, 2012).

2.2.2 Factores que Influyen en la Carbonatación

2.2.2.1 Dióxido de Carbono.

La carbonatación debe su presencia en el concreto al dióxido de carbono (CO₂) presente en el ambiente en forma de gas anhídrido carbónico; máximo en zonas urbanas o con elevados niveles de contaminación, donde sus concentraciones son mayores. La humedad y la temperatura ambiente son factores igualmente importantes como veremos más adelante en este escrito. La carbonatación es un tipo de reacción ácida que puede afectar de manera importante la durabilidad del concreto. Se trata de un proceso lento, que resulta de una reacción química en la que el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), presente en la pasta de cemento, reacciona con el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, y forma carbonato de calcio (CaCO₃); tal y como se representa en la Ecuación química (Vidaud, 2012).



Producto del efecto fisicoquímico resultante de esta reacción, se produce una degradación lenta y de continuo avance; desde la superficie hacia el interior del elemento de concreto. El pH del concreto, en condiciones normales de trabajo, oscila entre valores de 12 ó 13. No olvidemos que en el proceso de hidratación del cemento Portland se

produce $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (también llamado Portlandita) a partir de la combinación de los grupos puros de silicatos y de aluminatos con el agua. La Portlandita o hidróxido de calcio, junto con los álcalis de sodio y de potasio aportados por las arcillas, es el mayor responsable de la elevada alcalinidad (basicidad) de la pasta en el concreto (Vidaud, 2012).

Se afirma en diversas fuentes especializadas que la pasta de cemento contiene entre un 25 y un 50 % en peso del cemento de hidróxido de calcio; lo que redunda en que la pasta de cemento fresco tenga un pH de 12 como mínimo. En este caso, dada la elevada alcalinidad del concreto, las varillas de acero se encuentran recubiertas por una capa de óxido pasivante que las protege frente a riesgos de oxidación (o corrosión). Por otra parte, el contenido de dióxido de carbono en el aire oscila alrededor del 0.03%; puede llegar a alcanzar, en ambientes agresivos, valores superiores al 0.10%. El CO_2 puede penetrar al concreto a través de los poros y reaccionar así con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, revirtiéndose entonces la basicidad del material (Vidaud, 2012).

El mecanismo de reacción ácida por el cual se produce la carbonatación genera un descenso del pH del concreto, lo que provoca la destrucción de la capa pasivante sobre el acero, y con ello un ascenso en la velocidad de corrosión de las armaduras. Según los especialistas, se establece un valor crítico para el pH, alrededor de 9.5; por debajo del cual ya no puede garantizarse la protección (pasivación) de la armadura y puede comenzar un proceso de corrosión por carbonatación. El nivel de pH de un concreto completamente carbonatado, suele oscilar entre 7 y 8 (Vidaud, 2012).

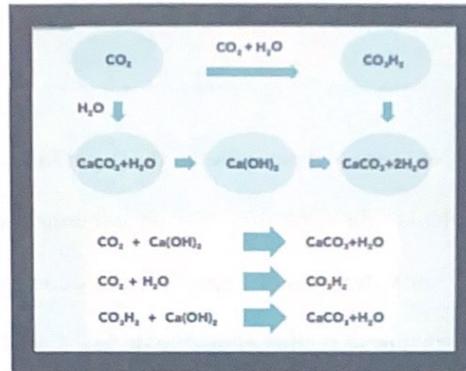


Figura 7 Formulación básica de los procesos de carbonatación en el cemento.

Fuente: (Vidaud, 2012)

Nota. Adaptado de la Formulación básica de los procesos de carbonatación en el cemento.

2.2.2.2 Permeabilidad del Concreto. El concreto permeable se carbonatará más rápidamente. Un concreto con baja permeabilidad genera muchos años de protección contra la carbonatación ya que se tienen una menor cantidad de poros y capilares por donde se incrusta el CO_2 a la estructura del concreto (Cardenas, 2017).

2.2.2.3 Contenido de Humedad. Para que inicie la carbonatación debe haber presencia de humedad. Avanza más rápido cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 50 y 55 %; con humedad más baja no hay suficiente agua en los poros para se disuelva cantidades significativas de hidróxido de calcio; con una humedad por arriba del 75 % los poros se bloquean progresivamente de agua impidiendo la carbonatación (Cardenas, 2017).

El contenido de humedad favorece el proceso de carbonatación en el concreto reforzado. Si regresamos la atención a la Ecuación 1 o la Figura 3, podemos darnos cuenta que esta reacción química, necesariamente se produce en un medio acuoso. El dióxido de carbono se disuelve en el agua formando ácido carbónico, el que reaccionará con el

hidróxido de calcio; obteniéndose como resultado el carbonato de calcio, además del agua (Vidaud, 2012).

2.2.2.4 Recubrimiento del Concreto y desperfectos de superficie. La carbonatación puede inclusive causar problemas de corrosión aún en concreto de alta calidad. Un recubrimiento de bajo espesor y defectos de superficie tales como grietas y pequeños hoyos con una ruta directa para que se realice el ataque de la carbonatación y comenzar con el proceso de oxidación del acero de refuerzo (Cardenas, 2017).

El espesor del recubrimiento del acero de refuerzo juega un papel importante al tener responsabilidad en la variabilidad del tiempo de neutralización del CO_2 que se propaga por los poros llenos de aire del concreto, hasta producir el carbonato de calcio. Se le atribuye al anhídrido carbónico y al hidróxido de calcio la responsabilidad del proceso de carbonatación del cemento Portland, o a la formación de carbonato de calcio (CaCO_3) en el concreto; en presencia de humedad y mediante su combinación química, tal y como se evidencia en la gráfica que a continuación se presenta en la Figura 3 (Vidaud, 2012).

Las grietas en el concreto, como es fácil de suponer, permiten el acceso del dióxido de carbono a través de la superficie del elemento, y se produce la carbonatación. Los especialistas consideran que el coeficiente de difusión activo del CO_2 en una grieta de 0.20 mm de ancho de abertura, como promedio es de aproximadamente tres órdenes de magnitud (1000 veces), mayor que en un concreto sano, libre de grietas. Esta es la razón por la que en ambientes agresivos, se debe de establecer un proceso de cuidado estricto en la colocación del concreto, a fin de evitar indeseados procesos de contracción, que incidan en el desarrollo de agrietamientos en las primeras edades (Vidaud, 2012).

Puede afirmarse que el avance del frente de carbonatación será mayor en el elemento de concreto cuanto mayor sea la porosidad del material, de ahí que una buena medida de atenuar la velocidad de corrosión en un elemento de concreto es precisamente el empleo de concretos densos, perfectamente vibrados y colocados, en donde el nivel de porosidad sea mínimo. Lo anterior traerá consigo, por supuesto, una mayor pérdida de alcalinidad; fundamentalmente en las capas más superficiales, en donde precisamente se ubica el acero de refuerzo (Vidaud, 2012).

Si el concreto está demasiado seco (Humedad Relativa menor al 40%) el CO₂ no se disuelve y no se produce el fenómeno de la carbonatación; si por el contrario el concreto se encuentra demasiado húmedo (Humedad Relativa mayor al 90%) el CO₂ no puede penetrar al concreto y por tanto este, tampoco puede ser carbonatado. La literatura especializada refiere que las condiciones óptimas para que se produzca la carbonatación, es cuando la humedad relativa se encuentra entre 40 y 90%. Respecto a lo anterior, se comenta que en el proceso de difusión de la carbonatación, la humedad relativa del aire de los poros existentes en la masa de concreto, juega un papel decisivo, debido a que el coeficiente de difusión del CO₂ es mucho mayor en el aire que en el agua, por tanto, si los poros están saturados de agua la penetración del gas es muy débil y la reacción es prácticamente inexistente (Vidaud, 2012).

2.2.2.5 Tipo de Cemento. En base a la observación de probetas cortadas por la mitad, a las que se aplicó fenolftaleína, se pudo observar que los cementos que presentaron el mejor comportamiento frente al ataque de CO₂ fueron el Portland corriente y el Portland Siderúrgico, siendo el segundo un 25% menos efectivo. Las mayores penetraciones se encontraron en los cementos Portland Puzolánico y Siderúrgico, los cuales mostraron penetraciones que duplicaron las del Portland corriente. Por otra parte, la penetración de

CO₂ en probetas confeccionadas con la razón agua/cemento 0,45 fue aproximadamente el 50% inferior a la penetración obtenida con las razones agua/cemento 0,50 y 0,55. Además se pudo observar que no existe gran diferencia en los comportamientos de estas dos últimas por lo cual, si se considerara exclusivamente este factor, podría usarse una u otra indistintamente (Ana María Carvajal, 2007).

Los valores de coeficiente de carbonatación KCO₂ obtenidos después de 21 días de exposición indicarían que valores menores que 11 mm /año^{0,5} corresponden a hormigones de buena calidad, y sobre 83 mm /año^{0,5} serían hormigones de mala calidad en relación a su resistencia a la difusión de CO₂, según Cruz y Andrade (1993). Estos resultados no son concluyentes, sino que solo representan el punto de partida para investigaciones futuras respecto de la durabilidad proyectada para los hormigones reales y la posibilidad de compararlos frente a la velocidad de carbonatación en un tiempo muy reducido (Ana María Carvajal, 2007).

2.2.2.6 Altas Temperaturas. El concreto fue expuesto a las temperaturas señaladas en la tabla 1. Los primeros síntomas que presenta el concreto es la presencia de fisuras, que conforme se incrementa la temperatura se transforman en grietas de tal forma que los elementos de estructura expuesta a alta temperatura en la parte más superficial del concreto pierde aproximadamente el 20 - 25% de su resistencia mecánica a la compresión (f'_c) respecto de la de diseño, de la gráfica se observa que la resistencia cae un 20 % a la temperatura de 300°C, a la temperatura de 500°C la resistencia a compresión (f'_c) disminuye un 60% y para el caso de 750°C la f'_c fue del 80%, en el caso de la temperatura de 1000°C no se reportan datos ya que estos elementos de concreto se fracturaron y no cumplían con la condición que solicita la norma para realizar el ensayo (Quiroz, 2023).

Tiempo de exposición (horas)	Temperatura	Porcentaje de resistencia residual del concreto a compresión (% del original)
2	< 300°C	100 a 80
	300- 600°C	80 a 40
	600-900°C	40 a 20
	900-1200°C	20 a 0

Tabla 1 Presenta el cambio de $f'c$ con la temperatura

Fuente: (Quiroz, 2023).

Nota. Adaptado del Estudio del comportamiento del concreto sometido a alta temperatura.

La pérdida de resistencia mecánica está relacionada con la presencia de fisuras y grietas, las cuales son causados por las altas temperaturas donde el hidróxido de calcio (CaOH_2) se descompone en óxido de calcio (CaO) y agua (H_2O), el agua se evapora y ejerce tanta presión interna (aproximadamente el 15% de la $f'c$) que fisura internamente al concreto, el cual comienza a perder cohesión entre las partículas, disminuyendo así su resistencia mecánica tal como se observa en la figura 3.18. Aunado a lo anterior conforme aumenta la temperatura, el carbonato de calcio (CaCO_3) se descompone en óxido de calcio (CaO) y anhídrido carbónico (CO_2), gas que produce el mismo efecto que el vapor de agua, además de provocar la carbonatación (CaCO_3) del concreto (Quiroz, 2023).

La severidad del agrietamiento, la descomposición de la pasta de cemento y la descohesión de los componentes del concreto, favorecen el desprendimiento total del recubrimiento de concreto (“spalling”), dejando al descubierto al acero de refuerzo, que hasta entonces estaba protegido y mantenía sus propiedades; el desprendimiento y la acumulación de calor en el sitio, conlleva al inicio de la pérdida de resistencia del acero en ocasiones desde los 250 °C de temperatura. La inspección visual realizada a los ítems

ensayados reportó un ligero cambio de color que fue del tono gris a un tono color amarillo, además de los cambios físicos arriba mencionados (Quiroz, 2023).

2.2.2.7 Proporción del Material. Se investigó la influencia de la carbonatación en morteros que contienen un 25% de ceniza volante en sustitución del material cementante. Se fabricaron especímenes cilíndricos de mortero para cuatro relaciones Agua/Cementante (A/C) de 0.35, 0.45, 0.55 y 0.65. Los morteros con y sin ceniza volante fueron sometidos a un proceso acelerado de carbonatación. Se determinó el peso volumétrico, la absorción, la resistencia a la compresión, la permeabilidad al agua, el pH y la poro simetría por intrusión de mercurio. Por efecto de la potencialidad puzolánica de la ceniza volante, para las cuatro relaciones A/C, los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días de los morteros con y sin ceniza volante permanecen similares. Los morteros con ceniza volante presentan coeficientes de permeabilidad al agua, a 28 días, similares a los morteros sin ceniza volante. Los resultados de pH indican que la reducción de la alcalinidad es menor en los morteros que contienen ceniza volante en comparación con aquellos que contienen sólo cemento. Para todos los morteros, los resultados de los análisis poro simétricos indican que la porosidad disminuye por efecto de la carbonatación; asimismo, muestran el predominio de los macro y mesoporos (Valdez-Tamez, 2009).

2.3 Efectos de la Carbonatación.

2.3.1 Corrosión del Acero de Refuerzo.

La corrosión del acero de refuerzo es un proceso electroquímico de deterioro que afecta la durabilidad de las estructuras de concreto armado, se inicia por efecto de la carbonatación o por la presencia de cloruros en el concreto, de allí que necesita de las

condiciones micro ambientales cercanas a la fase del metal. El óxido producto de la corrosión origina que aparezcan manchas que son zonas de color y aspecto diferente del resto de la generalidad del concreto, específicamente en los bordes de las fisuras que se originan, ya que este óxido es expansivo y crea fuertes movimientos en el concreto que hacen que se rompa por tracción, presentando fisuras estas a la vez siguen las líneas del acero principal e incluso de los estribos si la corrosión ha sido muy fuerte, de ahí la aparición de manchas sobre la masa del concreto (Peña, Rodríguez, Salcedo, & Suarez Pereira, 2022).

El óxido expansivo mencionado, además de las fuertes tensiones en el concreto ocasiona aumento de volumen de aproximadamente diez veces su volumen original, dando lugar en las estructuras a que se produzcan desprendimientos localizados importantes en la capa de recubrimiento, esto es desuniones del concreto respecto a donde se encontraba fijo o unido. Es muy frecuente que aparezcan en elementos estructurales cóncavos, en ángulo en los que el acero de tracción no ha seguido una línea quebrada, ni está perfectamente unida; en los nudos con estribos, con respecto a la armadura de la zona de compresión (Peña, Rodríguez, Salcedo, & Suarez Pereira, 2022).

El incremento del volumen en el interior del concreto como se ha mencionado previamente producto del proceso de oxidación y que se convierte en fuertes tensiones de hasta 400 Kg/cm² en el concreto, origina también disgregaciones y fuerzas de separación con la matriz del concreto que inciden directamente en la adherencia del acero con dicho material. Esto se debe ya a una corrosión generalizada que involucra a todo el metal afectándolo de manera homogénea y en toda su superficie (Peña, Rodríguez, Salcedo, & Suarez Pereira, 2022).

El proceso de corrosión del acero de refuerzo se define como una reacción electroquímica que conlleva a la obtención de un óxido de hierro el cual presenta un volumen de 3 a 4 veces mayor al del acero inicial, este aumento de volumen en el refuerzo genera presiones internas en detrimento de la durabilidad del concreto produciendo fisuras, grietas y delaminaciones, daños que pueden llevar a la estructura inclusive hasta su colapso. Para que haya corrosión se requiere la presencia de 3 factores fundamentales: la des pasivación del acero de refuerzo, la entrada de agua y la entrada de oxígeno (TOXEMENT, 2017).

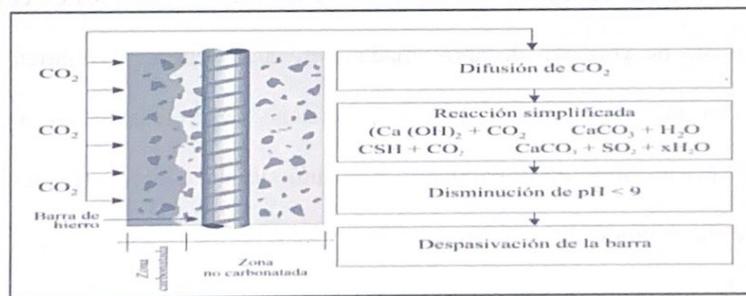


Figura 8 Esquema del Proceso de Carbonatación.

Fuente: (Iloro, 2015)

2.3.2 Ambiente Urbano.

En ambientes urbanos, urbano/industriales o urbano/marinos, la carbonatación es un problema que actualmente está afectando a muchas estructuras en nuestros países, por esa diversidad de climas que poseemos, aunque en menor escala que el problema con los cloruros, pero se tienen dificultades similares para su predicción. Así, estos problemas tienen una relación directa con los parámetros meteorológicos del ambiente al cual se encuentran expuestas las estructuras (TORRES Acosta, 2008).

Se han dado distintas definiciones al concepto de vida en servicio o vida útil relacionada con la idea de durabilidad de una estructura de concreto. Desde el punto de vista de la corrosión de las varillas se ha propuesto un modelo simple, se está intentando definir todos los parámetros que llevarían a poder calcular previamente la vida en servicio o la durabilidad de una determinada estructura en condiciones de servicio con un coeficiente de seguridad suficiente. Estos modelos en conjunto con los resultados de la evaluación fisicoquímica y electroquímica de las diferentes probetas expuestas a ambientes naturales en nuestros países permitirán definir una mejor forma de diseñar obras en concreto durables y reparar adecuadamente las ya existentes que presentan este problema (TORRES Acosta, 2008).

2.3.3 Ambiente Rural

En estructuras ubicadas en ambientes rurales (agresividad moderada), se detectan, a edades de 10 a 30 años, procesos incipientes de corrosión de sus armaduras, debidos a la existencia de espesores de recubrimiento nulos o mínimos y carbonatados. En estos ambientes, la exposición de hormigones a microclimas con elevada concentración de CO debido a las actividades antropogénicas produce un incremento significativo en la velocidad de avance del frente de carbonatación, por lo cual debería ser tenido en cuenta al definir las condiciones de exposición de las estructuras (Maximiliano D. Segovia, 2009).

2.3.4 Ambiente Marino.

En las zonas costeras los principales agentes agresores son cloruros, sulfatos y humedad los cuales penetran a través de la red de poros del concreto. Algunos de estos agentes provocan daños directamente al concreto, pero principalmente producen la

corrosión del acero de refuerzo; esto provoca disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero y posteriormente, el agrietamiento y desprendimiento del concreto (Solís Carcaño, Moreno, & Castro Borges, 2005).

Esta zona, a pesar de no estar en contacto directo con el agua de mar, se caracteriza por recibir un aporte elevado de sales debido a la brisa y la niebla salina. La concentración de las sales contenidas en la niebla salina disminuye con la distancia al mar y con la altura. Aun así, la distancia tierra adentro hasta dónde puede llegar a notarse este efecto puede ser de varios kilómetros, dependiendo de los vientos. En la normativa española se fija esta distancia en cinco kilómetros (Sotilla, 2007).

Cuando un hormigón está en contacto permanente o intermitente con el agua de mar, ésta penetra por absorción capilar a través de los poros capilares del hormigón. En consecuencia, la agresividad del ambiente marino (representada por la concentración de sales) puede producir tanto la degradación del hormigón, por ataques físicos, químicos o biológicos, como la de las armaduras por procesos de corrosión. Los aniones más agresivos para la pasta de cemento del hormigón son los sulfatos, los cuales atacan al hormigón formando compuestos expansivos que provocan su fisuración externa. Para las armaduras del hormigón, los cloruros son los aniones más agresivos, ya que causan la despasivación de la armadura y su corrosión. Por otro lado, el catión más agresivo para la pasta de cemento es el magnesio. En este sentido, a efectos de identificar las concentraciones de iones en aguas marinas (Sotilla, 2007).

2.4 Ecuación de la Recta.

(Joel Espinosa Longi, 2019) presenta la siguiente ecuación de la recta:

$$y = mx + b$$

La ordenada al origen de una recta que corta al eje Y es el valor de la segunda coordenada del punto de intersección de la recta con el eje mencionado. Observa que, si la ecuación de la recta es de la forma $y=mx+b$, el valor de b coincide siempre con el valor de y correspondiente al valor $x=0$, es decir, el valor de b es la ordenada al origen (Joel Espinosa Longi, 2019).

y : variable dependiente.

x : variable independiente.

m : pendiente de la recta (tasa de cambio de y respecto a x).

b : intersección en el eje y (valor de y cuando $x=0$).

Capítulo III

3. Diseño Metodológico.

3.1 Enfoque de la Investigación

En este apartado, se explica que la investigación es de tipo cuantitativa debido a la necesidad de recolectar, analizar y comparar datos numéricos relacionados con la profundidad de carbonatación y su influencia en la pérdida de resistencia del hormigón armado.

3.2 Ensayos no Destructivos.

Los ensayos no destructivos son metodologías que deben ser validadas en construcciones de concreto y en la medida que dicha obra vaya avanzando en su proceso constructivo para obtener los datos más cercanos a la realidad acerca del desempeño del material usado en obra (Concreto, 2024).

3.2.1 Ensayo de Carbonatación.

El ensayo de carbonatación del concreto es una herramienta crucial para entender cómo el concreto interactúa con el medio ambiente a lo largo del tiempo. Este ensayo permite a los ingenieros y constructores prever y prevenir problemas estructurales, asegurando que nuestras edificaciones sean más duraderas y seguras. En este artículo, exploraremos en detalle qué es este ensayo, por qué es importante, cómo se realiza, y los factores que influyen en el proceso de carbonatación (CONSTRUNEIC, 2024).

Este ensayo nos permite entender cómo el concreto va a comportarse a lo largo del tiempo, especialmente en entornos urbanos donde la concentración de CO_2 es mayor. Nos ayuda a prever y prevenir daños en estructuras, asegurando que nuestras construcciones sean más duraderas y seguras (CONSTRUNEIC, 2024).

El ensayo consiste en aplicar sobre la estructura a analizar fenolftaleína (es un indicador de pH que en disoluciones ácidas permanece incoloro, pero en disoluciones básicas), permitiendo mirar la reacción ante el químico y que lectura registra en milímetros el avance (Concrelab).

Se aplica en el momento de extraer el núcleo de concreto, con intención de tener la reacción en alguna cara del concreto que no esté expuesto a la intemperie (Concrelab).

3.2.1.1 Materiales y Equipos.

- Solución Fenolftaleína líquida
- Atomizador
- Flexómetro

3.2.1.2 Coeficiente de Carbonatación.

El coeficiente de carbonatación del hormigón depende de la porosidad y de la permeabilidad del recubrimiento de las armaduras, así como de las condiciones ambientales a las que esté expuesto. Cuando reducimos la relación agua/cemento, dificultamos la difusión de CO_2 en el hormigón. El hecho de que la velocidad de carbonatación sea mayor en hormigones protegidos de la intemperie se debe al bloqueo parcial de los poros por efecto de la lluvia en el exterior no protegido (Piqueras, 2018).

El coeficiente de carbonatación K_{CO_2} tendría un valor entre 3 y 6 mm / año de tal forma que un hormigón de alta calidad presentaría un valor menor de 3 mm / año y un hormigón de baja calidad presentaría un valor de más de 6 mm/año (Ana María Carvajal, 2007).

3.2.1.3 Procedimiento.

- Se enumeraron las muestras a ensayar y se limpió la superficie de cada una para evitar alteraciones al aplicar el indicador de carbonatación.
- Posteriormente, se aplicó el indicador de carbonatación en todas las muestras y se dejó actuar durante aproximadamente 25 minutos.
- A continuación, se diferenciaron visualmente los cambios de color en la superficie de cada muestra, identificando el área carbonatada, que mantuvo su color original, y el área no carbonatada, que tomó un color rosáceo.
- Luego, se midió el área carbonatada utilizando una regla o flexómetro, desde la parte exterior hacia la parte interior de la muestra ubicada en la pila, obteniendo así la profundidad de carbonatación en milímetros.
- Finalmente, con la longitud carbonatada de cada probeta, se calculó el coeficiente de carbonatación utilizando la fórmula correspondiente.

Según (Vidaud, 2012) en la Instrucción del Hormigón Estructural EH-08, del Ministerio de Fomento y del Gobierno de España, esta fórmula permite determinar un modelo interesante para la correlación entre el período de tiempo (t), necesario para que se desarrolle la carbonatación en una profundidad de frente (d).

$$t = \left(\frac{d}{k_c}\right)^2$$

En donde K_c , se conoce como coeficiente de carbonatación, y se puede determinar como una función del medio de exposición, de la porosidad del concreto, del tipo de cementantes en la mezcla y de la resistencia media del concreto a la compresión (Vidaud, 2012).

3.2.1.4 Norma UNE-EN 14630:2007

El método de ensayo con fenolftaleína es apropiado para medir la profundidad de la capa carbonatada situada cerca de la superficie del hormigón endurecido. No es conveniente para el hormigón fabricado con cemento cálcico aluminoso. Se puede utilizar in situ o en el laboratorio, en probetas de ensayo, o en trozos o fragmentos tomados previamente de la estructura de hormigón endurecido (Española, 2007).

3.2.1.5 Norma UNE 112011:2011

Esta norma tiene por objeto describir un método de ensayo para determinar la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. Con este ensayo puede obtenerse información del estado de carbonatación de un elemento estructural en un momento determinado de su vida. La principal indicación que se pretende conseguir con esta medida es conocer si la carbonatación ha llegado o no hasta

la ar madura, lo que permitirá establecer si ha podido provocar o contribuir al desarrollo de la corrosión, cuando se haya producido (Española, 2007).

3.2.2 Ensayo de Pachometría



Figura 9 Ensayo Pachometro Paso a desnivel Tarqui.

Fuente: Elaboración propia

Es un ensayo realizado por un equipo para la medición no destructiva que detecta elementos metálicos ocultos en el material, como las armaduras del propio hormigón. La medición permite determinar la posición de las barras de acero y la dirección de estas mediante lectura en una pantalla digital. Al mismo tiempo, nos proporciona información aproximada de la profundidad a la que dichas barras se encuentran, pudiendo conocer el recubrimiento de las armaduras en el elemento estructural y determinar así el proceso de deterioro del elemento estructural (Tep205, 2018).

3.2.2.1 Materiales y Equipos.

- Pachómetro
- Regla.
- Marcador, lápiz o tiza.

3.2.2.2 Procedimiento.

- Se enciende el equipo y se configura para determinar la ubicación del acero posicionando vertical y horizontalmente el detector.
- Se aplica una fuerza uniforme sobre el detector para que los sensores detecten cada varilla.

3.2.3 *Ensayo de Esclerometría.*

El esclerómetro es el ensayo no destructivo más usado y, probablemente, el más abusado sobre las estructuras de hormigón debido a su sencillez y bajo coste. El ensayo puede realizarse en probetas moldeadas, como en una planta de prefabricado o en obras in situ, y en evaluaciones estructurales sobre elementos existentes, tanto en probetas testigo como directamente sobre los elementos. El martillo de resorte fue desarrollado y patentado por Ernst Schmidt en 1948, por lo cual lleva su nombre, Schmidt Hammer (Castaño, 2023).

El elemento básico es una masa metálica que, impulsada con una energía de percusión de $0,225 \text{ m} \cdot \text{kp}$, choca con el hormigón. La cantidad de energía recuperada en el rebote de la masa permite obtener un índice de dureza de la superficie sobre una escala graduada. La energía la proporciona a la masa mediante un muelle que hace que, dicha masa, golpee contra un vástago metálico apoyado sobre el hormigón (Castaño, 2023).

3.2.3.1 Materiales y Equipos

- Martillo Schmidt
- Piedra abrasiva.
- Regla y escuadra
- Lápiz o Marcador
- Formato para anotación.

3.2.3.2 Procedimiento

- El esclerómetro se calibra antes de su uso en un bloque de referencia para asegurar que está funcionando correctamente.
- Se coloca el esclerómetro en la superficie del hormigón de manera perpendicular.
- Se presiona el esclerómetro contra la superficie hasta que el resorte se dispare y golpee el pistón, produciendo el rebote.
- En los esclerómetros manuales, el índice de rebote se lee directamente en una escala marcada en el cuerpo del dispositivo. En los modelos digitales, el valor aparece en la pantalla.
- Se repiten varias mediciones (de 9 a 12) en diferentes puntos cercanos para obtener una media representativa.
- Se usa la tabla de correlación para convertir el valor medio de rebote en una estimación de la resistencia a compresión.

3.2.3.3 Norma ASTM C805

Esta norma se aplica para evaluar la uniformidad del concreto in situ, para delinear regiones de concreto in situ, para delinear regiones de una estructura de calidad pobre u concreto deteriorado y para estimar el desarrollo de la resistencia in-situ (R, 2022).

3.3 Ensayos Destructivos y Semidestructivos.

Los Ensayos destructivos y semidestructivos, tales como la obtención y ensayo de corazones diamantinos de concreto, sirven para determinar características físico-mecánicas, químicos y microscópicos del concreto con los cuales se determina la resistencia al concreto, el frente de carbonatación del concreto o el tipo de agregados utilizados. En Perú el método para la obtención y ensayo de estas muestras se regulan por el NTP 339.059:2001 (Glemcompe, 2020).

3.3.1 Ensayo de Extracción de Núcleo o Testigo.

Este método de ensayo cubre la obtención, preparación y ensayo de: (1) núcleos perforados de concreto para determinar su longitud, o su resistencia a la compresión, o su resistencia a la tracción indirecta y (2) vigas de concreto aserradas para determinar su resistencia a la flexión (Bravo).

3.3.1.1 Materiales y Equipos

- Taladro de Núcleos
- Generador
- Pachómetro
- Taladro Estándar
- Broca 25 mm
- Equipo de Protección Personal (EPP)



Figura 10 Taladro Diamantina

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Procedimiento.

- Preparación de la superficie: Limpiar la superficie a perforar para eliminar polvo, suciedad y partículas sueltas.
- Marque el lugar exacto de perforación según el plan de inspección.
- Instale y nivele el taladro: Coloque la broca de diamante sobre el área marcada, asegurándose de que quede perpendicular a la superficie de concreto para obtener un núcleo recto.
- Sujete firmemente el taladro para que no se mueva mientras perfora.
- Perforación de núcleos: Comience a perforar con la máquina a baja velocidad para realizar marcas iniciales y evitar deslizamientos.
- Enfríe constantemente la broca de diamante con agua para reducir el desgaste de la herramienta.
- Continúe perforando a una velocidad media-alta, asegurando una presión uniforme y constante.
- Evite el uso de maquinaria pesada para evitar dañar la broca y el núcleo.
- Taladre los agujeros a la profundidad requerida, normalmente de 100 a 200 mm, dependiendo de los requisitos de la prueba.
- Extracción de núcleos: Retire la sembradora y retire el núcleo con cuidado para evitar roturas. Si el núcleo no sale inmediatamente, utilice un mango pequeño o una ventosa especial sin aplicar demasiada presión.
- Medición y marcado de núcleos: mida la longitud y el diámetro del núcleo para garantizar que cumpla con las especificaciones.
- Marque el núcleo con un número de identificación y regístrelo en el informe de prueba.

- Pruebas de laboratorio: El núcleo se envía al laboratorio para realizar pruebas de resistencia a la compresión, profundidad de carbonatación, relación de carbonatación y otras pruebas que puedan ser necesarias.
- Realizar una prueba de compresión mediante prensa hidráulica y registrar los valores obtenidos.
- Registro de resultados: documentar todas las observaciones, mediciones y resultados de laboratorio en un informe técnico.
- Agregue fotografías, gráficos y tablas según sea necesario.

3.3.1.3 Norma ASTM C42/C42M

Este método de ensayo cubre la obtención, preparación y ensayo de núcleos taladrados de concreto para la determinación de la longitud o resistencia a la compresión o tensión por partidura y vigas aserradas de concreto para determinar la resistencia a la flexión (Medrano).

3.3.2 *Ensayo de Compresión en Cilindros de Concreto.*

El ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concretos es un método en el cual mediante la compresión axial producida por un equipo que cumpla con las especificaciones de la norma se obtiene la resistencia a la compresión de cilindros de muestra, en el que se hará a determinadas edades de cilindros de concreto, (3, 7, 14, 28 días) este dato es necesario para el control de la calidad del concreto, además de corroborar el diseño de la mezcla concuerde con lo obtenido de este ensayo (SIGUD, 2017).



Figura 11 Prensa para Ensayos de Hormigón Laboratorio de Suelos Uleam.

Fuente: Elaboración propia

La resistencia hace referencia a la capacidad de un material para no deformarse y/o fallar en el caso del concreto, el cilindro es la forma en la que se toman estas pruebas que se someten a maquinas con ciertas especificaciones que ayudan a determinar la resistencia dividiendo la máxima carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de este cilindro y finalmente el concreto es un material usado en la construcción que tiene como ser un elemento estructural al ser combinado con otros materiales (SIGUD, 2017).

3.3.2.1 Materiales y Equipos

- Prensa Hidráulica de Compresión
- Calibrador Vernier o regla
- Equipos de Protección Personal.

3.3.2.2 Procedimiento.

- Se realizar tres mediciones en la punta de cada testigo para hallar un promedio de diámetro y posteriormente se coloca en la prensa, se configura la máquina para un cilindro relación 5:10 cm.
- Se Activa la prensa hidráulica y aplica una carga gradual hasta la ruptura de la muestra.
- Luego debemos anotar en nuestra hoja de laboratorio la carga máxima que alcanzo la maquina y calcula la resistencia a la compresión en función del área de la sección transversal.

3.3.2.3 Norma ASTM C39/C39M-21

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón, como cilindros moldeados y núcleos perforados. Está limitado al hormigón que tiene una densidad superior a 800 kg/m³ | 50 lb/ft³ | (ASTM INTERNATIONAL, 2023).

Los resultados de este método de prueba se utilizan como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezcla y colocación del hormigón; determinación del cumplimiento de las especificaciones; control para evaluar la eficacia de los aditivos; y usos similares (ASTM INTERNATIONAL, 2023).

3.4 Correlación Ecuación de la Recta.

(Joel Espinosa Longi, 2019) presenta la siguiente ecuación de la recta:

$$y = mx + b$$

y: variable dependiente.

x: variable independiente.

m: pendiente de la recta (tasa de cambio de y respecto a x).

b: intersección en el eje y (valor de y cuando x=0).

La ordenada al origen de una recta que corta al eje Y es el valor de la segunda coordenada del punto de intersección de la recta con el eje mencionado. Observa que, si la ecuación de la recta es de la forma $y=mx+b$, el valor de b coincide siempre con el valor de y correspondiente al valor $x=0$, es decir, el valor de b es la ordenada al origen (Joel Espinosa Longi, 2019).

En este caso, se cambian las variables generales x y y por:

R: Variable independiente (predictora).

P: Variable dependiente (respuesta).

La ecuación de la recta se reescribe como:

$$P = a + bR$$

b: pendiente de la recta.

a: intersección con el eje P

Las fórmulas para calcular la pendiente (b) y la intersección (a) se derivan de minimizar la suma de los errores al cuadrado (método de mínimos cuadrados):

$$b = \frac{n \sum(RP) - \sum(R) \sum(P)}{n \sum R^2 - (\sum R)^2}$$

$$a = \frac{\sum(P) - b \sum(R)}{n}$$

Esto calcula el valor de P cuando R=0

Σ : Indica la suma de los valores.

n: Número de observaciones.

RP: Producto de los valores de R y P.

R²: Cuadrado de los valores de R.

Estas fórmulas permiten obtener la mejor línea recta que explica la relación entre R (predictora) y P (respuesta), usada en análisis estadísticos y modelado de datos.

3.5 Influencia del Coeficiente de Carbonatación en la pérdida de Resistencia del Hormigón Armado.

3.5.1 Hormigón Armado.

El hormigón armado se define como un material compuesto que combina hormigón reforzado con barras de acero, denominadas armaduras. Esta integración permite aprovechar la resistencia a la compresión del hormigón junto con la resistencia a la tracción del acero, generando un material altamente resistente y versátil. (HOLCIM, 2024).

El hormigón armado, aunque pueda parecer un término técnico, tiene aplicaciones ampliamente visibles en la mayoría de las estructuras modernas. Desde rascacielos hasta puentes, este material se ha convertido en un elemento fundamental en el ámbito de la construcción debido a su resistencia y versatilidad, desempeñando un papel crucial en el desarrollo de infraestructuras. (HOLCIM, 2024).

3.5.2 Acero de Refuerzo.

Los aceros de refuerzo son materiales altamente funcionales y de excelente calidad para proyectos de construcción. Estos se instalan estratégicamente en el interior de las estructuras, brindando un soporte excepcional. Su nombre se debe a su capacidad

para absorber y resistir los intensos esfuerzos y tensiones generados por el peso de la construcción, las cargas aplicadas y los movimientos del suelo (INGETEK, 2023).

Cuando se trata del refuerzo estructural en la construcción, la calidad y el proceso de fabricación del acero, son aspectos de vital importancia. Para asegurar la máxima eficiencia y seguridad, es esencial que el acero utilizado cumpla con las normas de calidad establecidas, lo cual requiere un proceso minucioso y el uso de materias primas específicas. Durante este proceso, se llevan a cabo rigurosos estudios de los límites químicos y físicos, así como de la resistencia, grosor y ductilidad del material. En este artículo hablaremos de las características del acero de refuerzo, así como las propiedades del acero de refuerzo en beneficio de tu proyecto de construcción (INGETEK, 2023)

3.5.3 Resistencia a Compresión del Hormigón Armado.

La resistencia a la compresión del hormigón es una propiedad mecánica fundamental que mide la capacidad del material para soportar cargas aplicadas en dirección opuesta a su eje longitudinal. En otras palabras, es la capacidad del hormigón para resistir la compresión o aplastamiento sin romperse. Esta característica es esencial en la industria de la construcción, ya que determina la seguridad y durabilidad de las estructuras (INCOBER, 2023).

El cálculo de la resistencia a la compresión del hormigón se expresa en unidades de presión, generalmente en megapascuales (MPa). Por ejemplo, un hormigón con una resistencia a la compresión de 30 MPa puede soportar una carga de compresión de 30 millones de pascales por metro cuadrado sin fallar. Es importante destacar que esta propiedad puede variar según el tipo de hormigón, su mezcla, curado y otros factores que afectan su calidad (INCOBER, 2023).

3.5.4 *Influencia del Coeficiente de Carbonatación.*

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar (Montani, 2000).

Capítulo VI

4. Resultados y Discusión

3.1 Ubicación del Paso a Desnivel Tarqui.

El puente se encuentra ubicado en la Ciudad de Manta, en la parroquia Tarqui cerca del Río Manta en la Avenida 4 de noviembre.

Paso elevado inaugurado en 1992 por Jhony Loor, fue una obra de desarrollo vial Manta-Tarqui construido de hormigón armado con vigas tipo ducto cajón, pilas centrales y secundarias. Actualmente es de gran aporte para el transporte de vehículos que constantemente transitan en el lugar, no solo por necesidad particular, sino también por factores como trabajo, convirtiéndose en una obra emblemática de la de la Parroquia Tarqui del Cantón Manta.

3.2 Ensayos de Campo

3.2.1 Ensayo de Esclerometría.

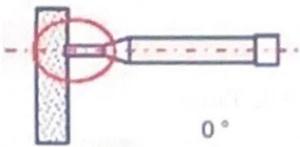
Ensayos en Pilas del Paso a Desnivel de Tarqui.



Impact Strength (N)	Concrete Strength (MPa)	Concrete Strength (ksi)
10	10.0	1.45
15	15.0	2.18
20	20.0	2.90
25	25.0	3.62
30	30.0	4.34
35	35.0	5.06
40	40.0	5.78
45	45.0	6.50
50	50.0	7.22
55	55.0	7.94
60	60.0	8.66
65	65.0	9.38
70	70.0	10.10
75	75.0	10.82
80	80.0	11.54
85	85.0	12.26
90	90.0	12.98
95	95.0	13.70
100	100.0	14.42
105	105.0	15.14
110	110.0	15.86
115	115.0	16.58
120	120.0	17.30
125	125.0	18.02
130	130.0	18.74
135	135.0	19.46
140	140.0	20.18
145	145.0	20.90
150	150.0	21.62
155	155.0	22.34
160	160.0	23.06
165	165.0	23.78
170	170.0	24.50
175	175.0	25.22
180	180.0	25.94
185	185.0	26.66
190	190.0	27.38
195	195.0	28.10
200	200.0	28.82
205	205.0	29.54
210	210.0	30.26
215	215.0	30.98
220	220.0	31.70
225	225.0	32.42
230	230.0	33.14
235	235.0	33.86
240	240.0	34.58
245	245.0	35.30
250	250.0	36.02
255	255.0	36.74
260	260.0	37.46
265	265.0	38.18
270	270.0	38.90
275	275.0	39.62
280	280.0	40.34
285	285.0	41.06
290	290.0	41.78
295	295.0	42.50
300	300.0	43.22
305	305.0	43.94
310	310.0	44.66
315	315.0	45.38
320	320.0	46.10
325	325.0	46.82
330	330.0	47.54
335	335.0	48.26
340	340.0	48.98
345	345.0	49.70
350	350.0	50.42
355	355.0	51.14
360	360.0	51.86
365	365.0	52.58
370	370.0	53.30
375	375.0	54.02
380	380.0	54.74
385	385.0	55.46
390	390.0	56.18
395	395.0	56.90
400	400.0	57.62
405	405.0	58.34
410	410.0	59.06
415	415.0	59.78
420	420.0	60.50
425	425.0	61.22
430	430.0	61.94
435	435.0	62.66
440	440.0	63.38
445	445.0	64.10
450	450.0	64.82
455	455.0	65.54
460	460.0	66.26
465	465.0	66.98
470	470.0	67.70
475	475.0	68.42
480	480.0	69.14
485	485.0	69.86
490	490.0	70.58
495	495.0	71.30
500	500.0	72.02
505	505.0	72.74
510	510.0	73.46
515	515.0	74.18
520	520.0	74.90
525	525.0	75.62
530	530.0	76.34
535	535.0	77.06
540	540.0	77.78
545	545.0	78.50
550	550.0	79.22
555	555.0	79.94
560	560.0	80.66
565	565.0	81.38
570	570.0	82.10
575	575.0	82.82
580	580.0	83.54
585	585.0	84.26
590	590.0	84.98
595	595.0	85.70
600	600.0	86.42
605	605.0	87.14
610	610.0	87.86
615	615.0	88.58
620	620.0	89.30
625	625.0	90.02
630	630.0	90.74
635	635.0	91.46
640	640.0	92.18
645	645.0	92.90
650	650.0	93.62
655	655.0	94.34
660	660.0	95.06
665	665.0	95.78
670	670.0	96.50
675	675.0	97.22
680	680.0	97.94
685	685.0	98.66
690	690.0	99.38
695	695.0	100.10
700	700.0	100.82
705	705.0	101.54
710	710.0	102.26
715	715.0	102.98
720	720.0	103.70
725	725.0	104.42
730	730.0	105.14
735	735.0	105.86
740	740.0	106.58
745	745.0	107.30
750	750.0	108.02
755	755.0	108.74
760	760.0	109.46
765	765.0	110.18
770	770.0	110.90
775	775.0	111.62
780	780.0	112.34
785	785.0	113.06
790	790.0	113.78
795	795.0	114.50
800	800.0	115.22
805	805.0	115.94
810	810.0	116.66
815	815.0	117.38
820	820.0	118.10
825	825.0	118.82
830	830.0	119.54
835	835.0	120.26
840	840.0	120.98
845	845.0	121.70
850	850.0	122.42
855	855.0	123.14
860	860.0	123.86
865	865.0	124.58
870	870.0	125.30
875	875.0	126.02
880	880.0	126.74
885	885.0	127.46
890	890.0	128.18
895	895.0	128.90
900	900.0	129.62
905	905.0	130.34
910	910.0	131.06
915	915.0	131.78
920	920.0	132.50
925	925.0	133.22
930	930.0	133.94
935	935.0	134.66
940	940.0	135.38
945	945.0	136.10
950	950.0	136.82
955	955.0	137.54
960	960.0	138.26
965	965.0	138.98
970	970.0	139.70
975	975.0	140.42
980	980.0	141.14
985	985.0	141.86
990	990.0	142.58
995	995.0	143.30
1000	1000.0	144.02

Figura 12. Correlación Martillo Schmidt. Laboratorio Uleam

Fuente: Elaboración Propia

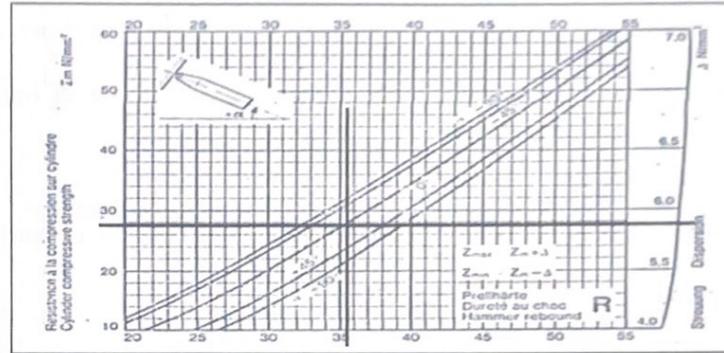
ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN					
 <p>0° Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>					
LECTURAS MARTILLO					
UBICACIÓN		PILA N°1 -LECTURA 1			
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (lecturas ≠ 6)		LO: Lecturas Ordenadas	
1	38	38		33	
2	37	37		34	
3	35	35		34	
4	34	34		35	
5	36	36		35	
6	33	33		35	35
7	35	35		36	36
8	37	37		36	
9	36	36		36	
10	35	35		37	
11	34	34		37	
12	36	36		38	
				35,5	
Sumatoria	426	IR Promediado		35,5	
		f'c (kN/mm ²)		27,5	
		f'c (kg/cm ²)		275	
		f'c (Psi)		3910,5	

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas; elegimos dos valores intermedios 35 y 36 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 35.5

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado

Figura 12 y se obtiene un valor de 27.5 N/mm²

Resistencia a la Compresión = 275 kg/cm² ± 55 Dispersión



Gráfica 1. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°1.

Fuente: (Ávila, 2023).

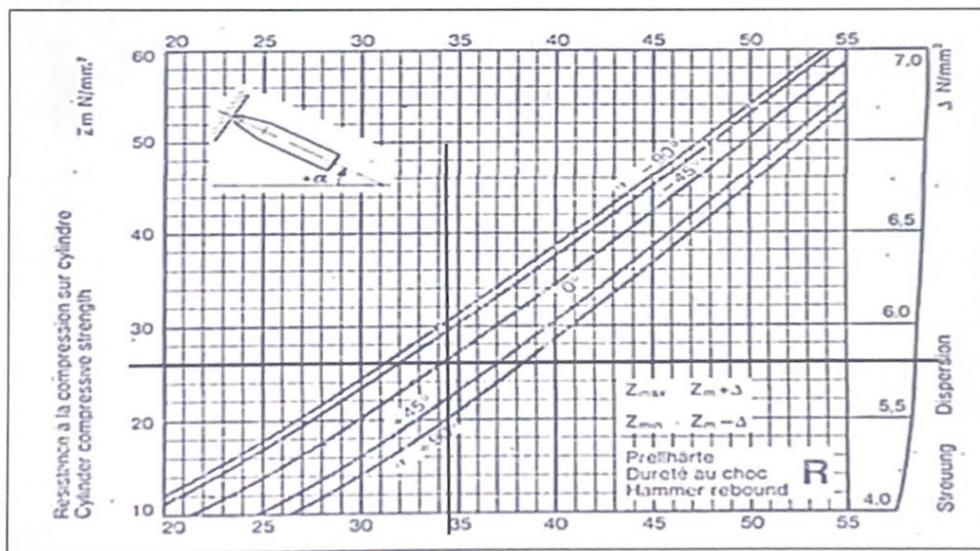
ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN					
<p>Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>					
LECTURAS MARTILLO					
UBICACIÓN		PILA N°1 -LECTURA 2			
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (lecturas \neq 6)		LO: Lecturas Ordenadas	
1	32	32		31	
2	34	34		32	
3	36	36		32	
4	35	35		32	
5	34	34		33	
6	32	32		34	
7	37	37		34	34
8	37	37		35	35
9	31	31		36	
10	36	36		36	
11	33	33		37	
12	32	32		37	
				34,0833	
Sumatoria	409	IR Promediado		34,5	
		f'c (kN/mm ²)		25,5	
		f'c (kg/cm ²)		255	
		f'c (Psi)		3626,1	

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, elegimos los valores intermedios 34 y 35 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 34.5

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado

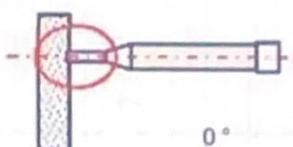
Figura 12 y se obtiene un valor de 25.5 N/mm^2

Resistencia a la Compresión = $255 \text{ kg/cm}^2 \pm 55.6$ Dispersión



Gráfica 2. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°2.

Fuente: (Ávila, 2023).

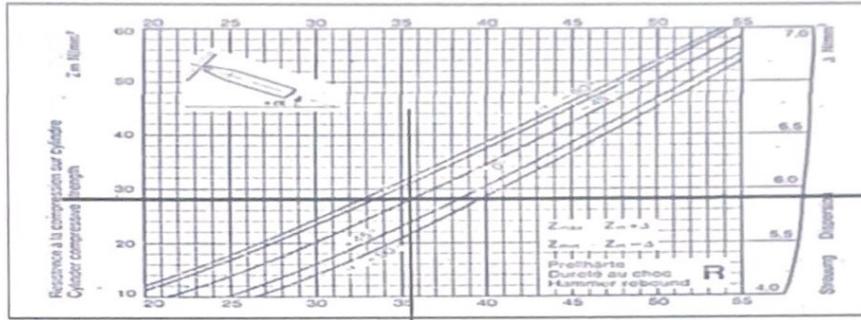
ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN					
 <p style="text-align: center;">0° Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>					
LECTURAS MARTILLO					
UBICACIÓN		PILA N°2 - LECTURA 3			
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (lecturas $\neq 6$)		LO: Lecturas Ordenadas	
1	33	33		32	
2	38	38		33	
3	34	34		33	
4	36	36		34	
5	34	34		34	
6	35	35		34	
7	34	34		35	35
8	37	37		36	36
9	32	32		36	
10	33	33		36	
11	36	36		37	
12	36	36		38	
				34,8333	
Sumatoria	418	IR Promediado		35,5	
		f'c (kN/mm ²)		28,4	
		f'c (kg/cm ²)		284	
		f'c (Psi)		4038,48	

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, elegimos nos valores intermedios 35 y 36 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 35.5

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado

Figura 12 y se obtiene un valor de 28.4 N/mm^2 .

Resistencia a la Compresión = $284 \text{ kg/cm}^2 \pm 55.8$ Dispersión



Gráfica 3. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°3.

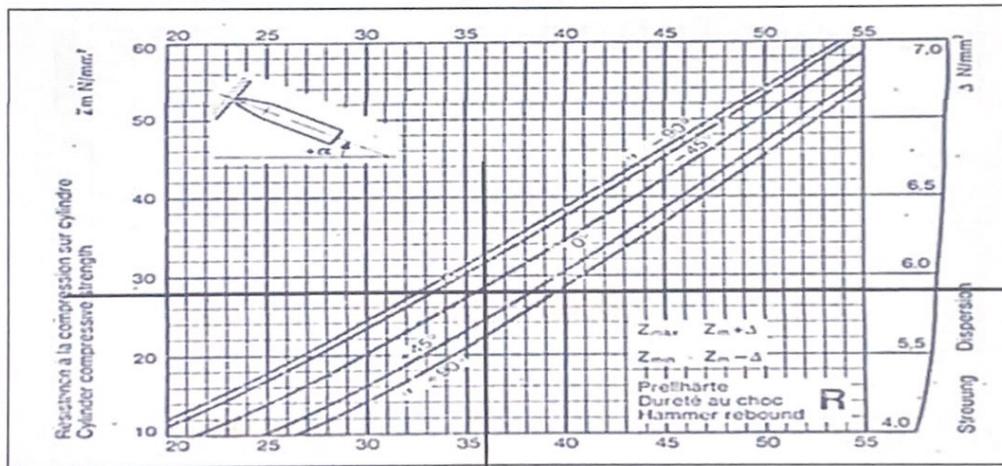
Fuente: (Ávila, 2023)

ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN					
<p>Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>					
LECTURAS MARTILLO					
UBICACIÓN		PILA N°2 -LECTURA 4			
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (1 lecturas ± 6)		LO: Lecturas Ordenadas	
		Ninguna			
1	39	39	33		
2	41	41	34		
3	38	38	35		
4	36	36	35		
5	37	37	35		
6	38	38	36	36	
7	35	35	36	36	
8	34	34	37		
9	36	36	38		
10	35	35	38		
11	33	33	39		
12	35	35	41		
			36,4167		
Sumatoria	437	IR Promediado	36		
		f'c (kN/mm ²)	28,4		
		f'c (kg/cm ²)	284		
		f'c (Psi)	4038,48		

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, encontramos; elegimos los valores intermedios 36 y 36 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 36

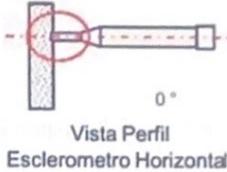
Resistencia a la Compresión = $284 \text{ kg/cm}^2 \pm 55.8$ Dispersión

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado **Figura 12** y se obtiene un valor de 28.4 N/mm^2 .



Gráfica 4. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°4.

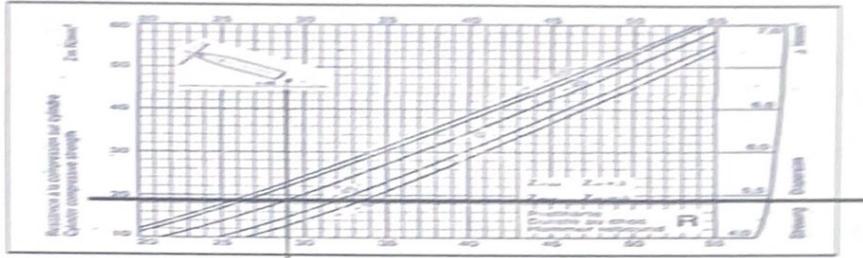
Fuente: (Ávila, 2023)

ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN						
 <p>0° Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>						
LECTURAS MARTILLO						
UBICACIÓN		PILA N°3 -LECTURA 5				
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (1 lecturas ≠ 6)		LO: Lecturas Ordenadas		
1	32	32		27		
2	29	29		28		
3	33	33		28		
4	28	28		28		
5	27	27		29		
6	29	29		29	29	
7	31	31		29	29	
8	35	35		31		
9	32	32		32		
10	29	29		32		
11	28	28		33		
12	28	28		35		
				30,0833		
Sumatoria	361	IR Promediado		29		
		f'c (kN/mm ²)		18,5		
		f'c (kg/cm ²)		185		
		f'c (Psi)		2630,7		

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, elegimos dos valores intermedios 29 y 29 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 29

Resistencia a la Compresión = $185 \text{ kg/cm}^2 \pm 52$ Dispersión

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado **Figura 12** y se obtiene un valor de 18.5 N/mm^2 .



Gráfica 5. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°5.

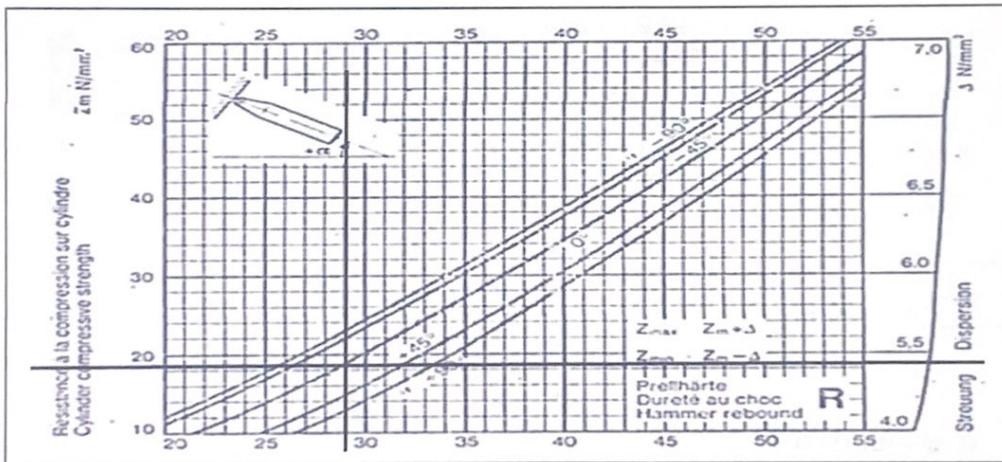
Fuente: (Ávila, 2023)

ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN				
<p>Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>				
LECTURAS MARTILLO				
UBICACIÓN		PILA N°3 - LECTURA 6		
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (lecturas = 6)	LO: Lecturas Ordenadas	
1	26	26	26	
2	28	28	26	
3	29	29	27	
4	28	28	28	
5	32	32	28	
6	29	29	29	29
7	31	31	29	29
8	32	32	29	
9	27	27	30	
10	26	26	31	
11	29	29	32	
12	30	30	32	
			28,9167	
Sumatoria	347	IR Promediado	29	
		f_c (kN/mm ²)	18,5	
		f_c (kg/cm ²)	185	
		f_c (Psi)	2630,7	

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, elegimos dos valores intermedios 29 y 29 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 29

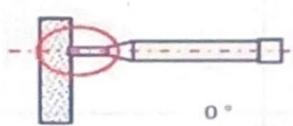
Resistencia a la Compresión = $185 \text{ kg/cm}^2 \pm 52$ Dispersión

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado **Figura 12** y se obtiene un valor de 18.5 N/mm^2 .



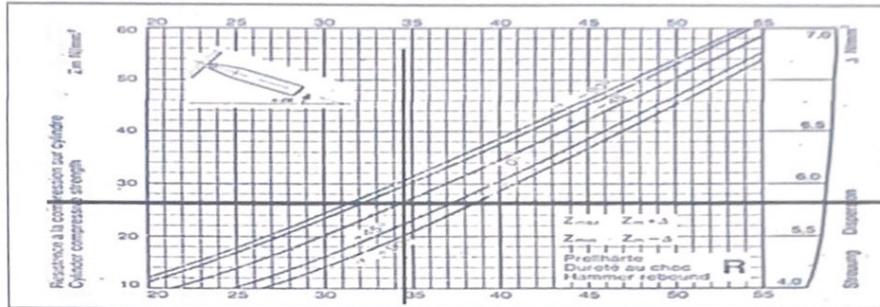
Gráfica 6. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°6.

Fuente: (Ávila, 2023).

ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN					
 <p>0° Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>					
LECTURAS MARTILLO					
UBICACIÓN		PILA N°4 -LECTURA 7			
NÚMERO DE LECTURA		LD: Lecturas Descartadas (lecturas ≠ 6)	LO: Lecturas Ordenadas		
		Ninguna			
1	34	34	31		
2	33	33	32		
3	35	35	32		
4	35	35	33		
5	36	36	33		
6	37	37	34	34	
7	36	36	35	35	
8	35	35	35		
9	31	31	35		
10	32	32	36		
11	32	32	36		
12	33	33	37		
			34,0833		
Sumatoria	409	IR Promediado	34,5		
		f'c (kN/mm2)	25,5		
		f'c (kg/cm2)	255		
		f'c (Psi)	3626,1		

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, elegimos dos valores intermedios 34 y 35 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 34.5

Resistencia a la Compresión = $255 \text{ kg/cm}^2 \pm 55.8$ Dispersión Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado **Figura 12** y se obtiene un valor de 25.5 N/mm^2 .



Gráfica 7. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°7.

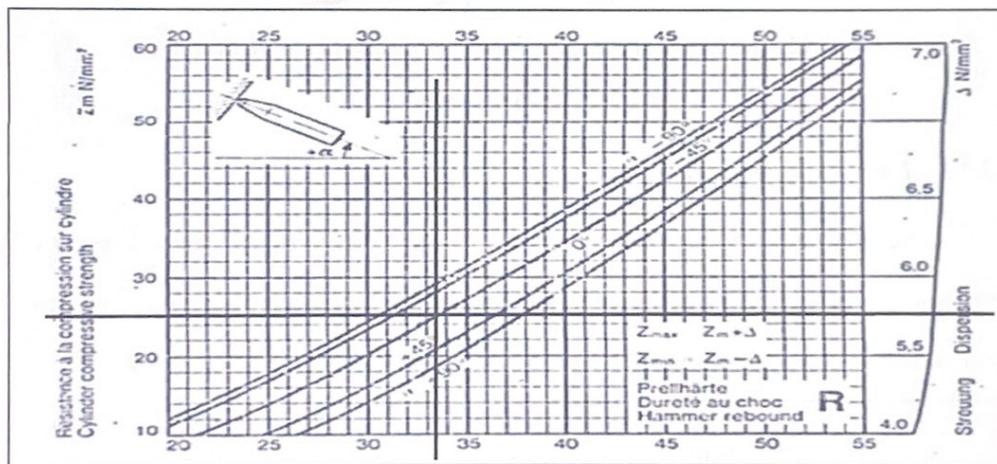
Fuente: (Ávila, 2023).

ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN				
<p>Vista Perfil Esclerometro Horizontal</p>				
LECTURAS MARTILLO				
UBICACIÓN	PILA N°4 - LECTURA 8			
		LD: Lecturas Descartadas (2 lecturas \neq 6)	LO: Lecturas Ordenadas	
NÚMERO DE LECTURA				
1	25	25	25	
2	29	29	29	
3	32	32	32	
4	34	34	32	
5	36	36	33	
6	34	34	33	33
7	33	33	34	34
8	35	35	34	
9	36	36	35	
10	37	37	36	
11	32	32	36	
12	33	33	37	
			33	
Sumatoria	396	IR Promediado	33,5	
		f'c (kN/mm ²)	25,5	
		f'c (kg/cm ²)	255	
		f'c (Psi)	3626,1	

Se verifica que no existan valores desfasados en las lecturas realizadas, encontramos; elegimos los valores intermedios 33 y 34 los promediamos para obtener el valor de Índice de Rebote 33.5

Resistencia a la Compresión = $255 \text{ kg/cm}^2 \pm 55.7$ Dispersión

Verificamos el valor de la resistencia a la compresión dada por el martillo usado **Figura 12** y se obtiene un valor de 47.1 N/mm^2 .



Gráfica 8. Correlación del Índice de Rebote con la resistencia a Compresión Ensayo N°8.

Fuente: (Ávila, 2023).

3.2.2 Extracción de Núcleo

Ensayos en Pilas del Paso a Desnivel de Tarqui.

Se extrajeron ocho testigos de diferentes pilas del paso de desnivel, luego se procedió a cortar los testigos con una relación 1:2 como indica la **Norma ASTM C39/C39M-21**; donde el valor de 1 será el diámetro del testigo extraído y el valor de 2 será la longitud del testigo. Se debe respetar el criterio para realizar el ensayo a compresión.



Figura 13 Extracción de Núcleo en Paso a desnivel Tarquí.

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Ensayo Carbonatación

Se analizan las 8 muestras extraídas de las diferentes pilas del paso a desnivel y se ensayan una por una aplicando fenolftaleína en toda el área de las muestras considerando la cara del testigo del lado que estuvo expuesto al medio ambiente.

N°	Estructura y/o identificación	Diámetro Testigo	Largo Testigo
		cm	cm
1	PILA 1	5	10
2	PILA 1	5	10
3	PILA 2	5	10
4	PILA 2	5	10
5	PILA 3	5	10
6	PILA 3	5	10
7	PILA 4	5	10
8	PILA 4	5	10

Tabla 2 Identificación Testigos Extraídos.

Fuente: Elaboración Propia

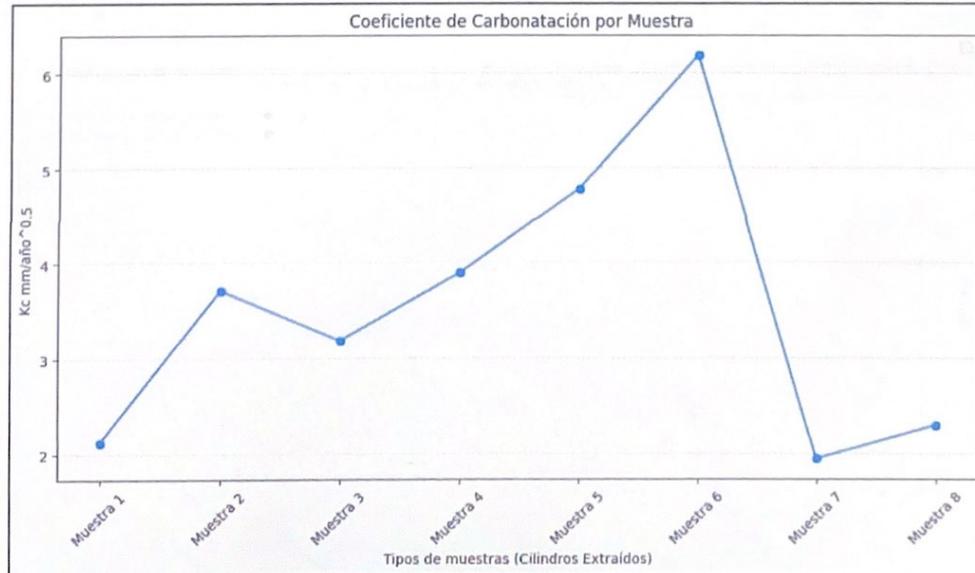
Nº	Coloración	Años	Xc mm	Kc mm/año ^{0.5}	Área superficial de la muestra
M1	Incolora	32	12	2,121320344	Zona Carbonatada
M2	Incolora	32	21	3,712310601	Zona Carbonatada
M3	Incolora	32	18	3,181980515	Zona Carbonatada
M4	Incolora	32	22	3,889087297	Zona Carbonatada
M5	Incolora	32	27	4,772970773	Zona Carbonatada
M6	Incolora	32	35	6,187184335	Zona Carbonatada
M7	Incolora	32	11	1,944543648	Zona Carbonatada
M8	Incolora	32	13	2,298097039	Zona Carbonatada

Tabla 3 Resultados Ensayo de Carbonatación.

Fuente: Elaboración Propia

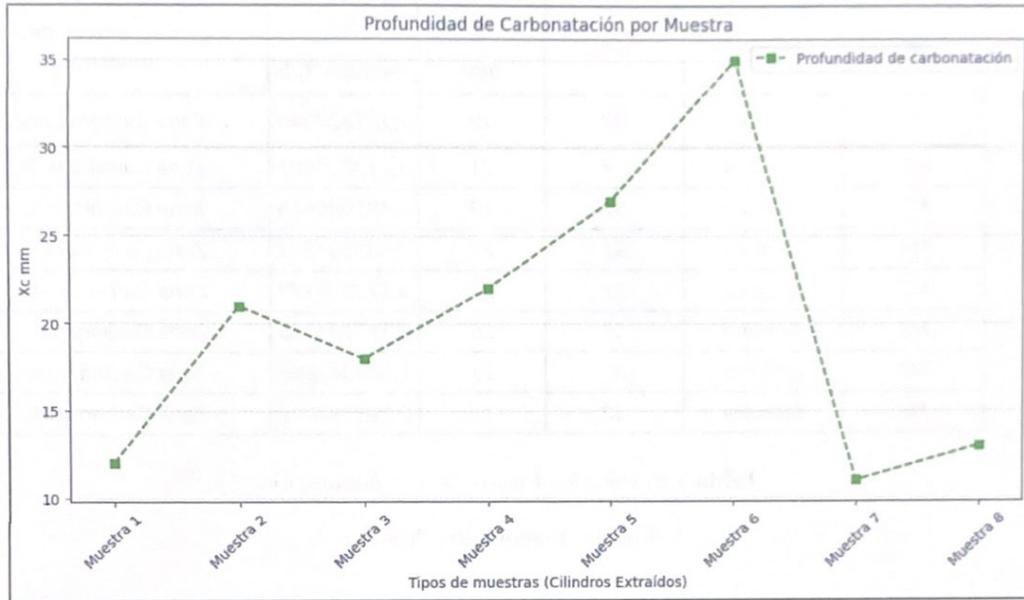
Xc: Profundidad de Carbonatación.

Kc: Coeficiente de Carbonatación.



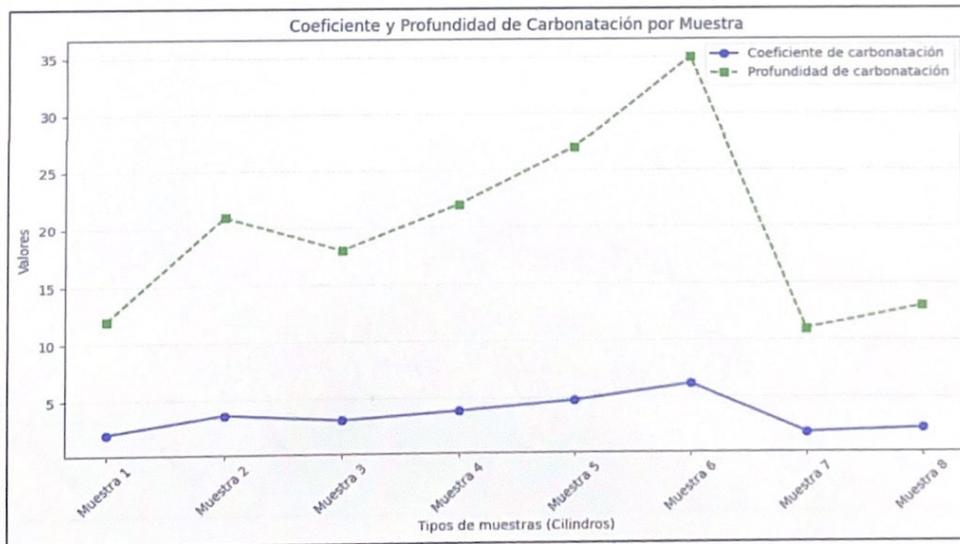
Gráfica 9 Coeficiente de Carbonatación.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.



Gráfica 10 Profundidad de Carbonatación.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.



Gráfica 11 Gráfica Coeficiente y Profundidad de Carbonatación.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.

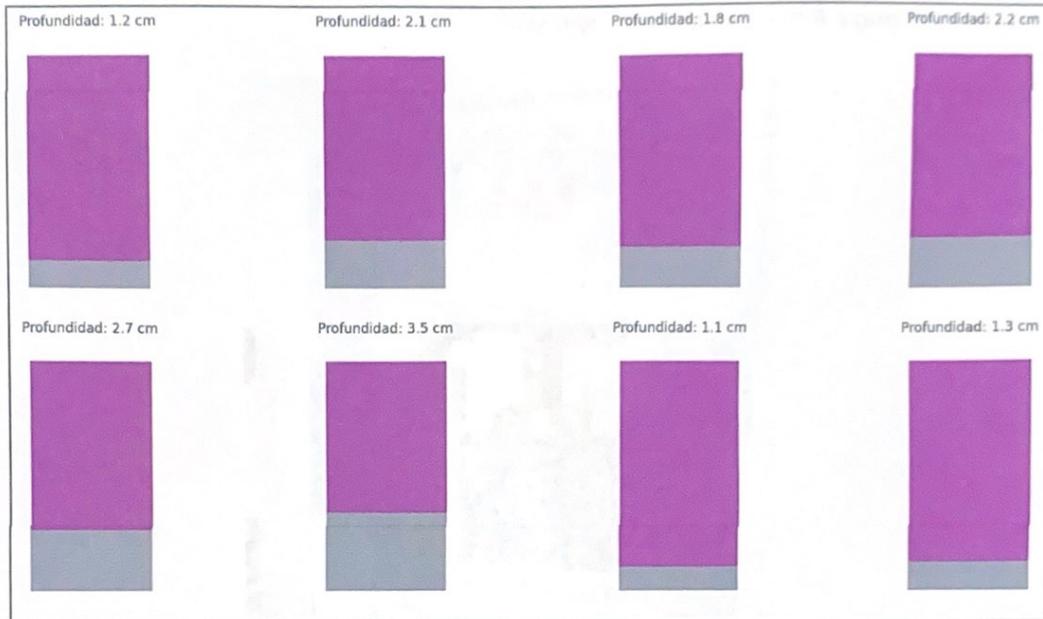


Figura 14 Interpretación Profundidad de Carbonatación en Cilindros Extraídos.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.

Se observan los 8 cilindros extraídos de las diferentes pilas del paso a desnivel de Tarqui, el área de color gris representa a la profundidad de carbonatación en cm y el área de color púrpura representa la zona no carbonatada.

3.2.4 Ensayo Resistencia a la Compresión



Figura 15 Ensayo Compresión Prensa Laboratorio de Suelos Carrera de Ingeniería Civil.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.

Luego de moldear los diferentes testigos con una relación 1:2 se proceden a medir tres valores de diámetros para cada testigo y luego se obtiene un diámetro promedio con el que podremos calcular el área y posteriormente la resistencia en kgf/cm^2 .

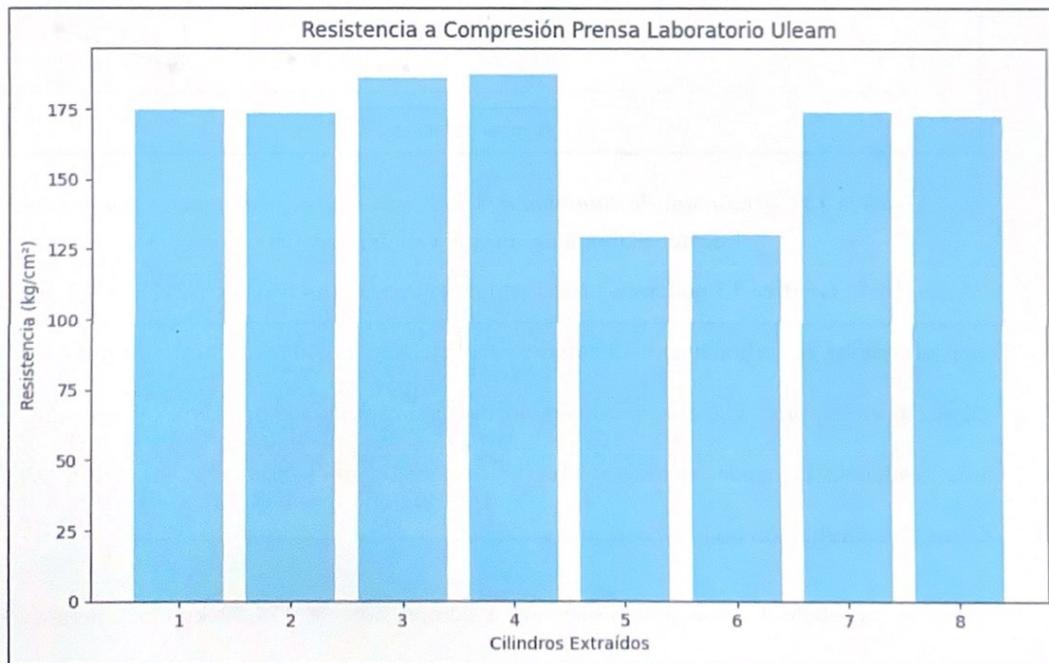
La fuerza máxima se obtiene del ensayo realizado en la prensa ELE ADR3000 del laboratorio de mecánica de suelos de la Carrera de Ingeniería Civil.

Se evidencia en los testigos 5 y 6 que existe una pila la cual posee valores inferiores de resistencia con respecto a las demás pilas. Este análisis se puede relacionar con la profundidad de carbonatación presente en la pila 4 que poseen los cilindros 5 y 6.

Fc (kg/cm ²)		280						
# de Especímenes (unidad)	Diámetros (cm)			Diámetro Promedio (cm)	Área (cm)	Fuerza Máxima (kgf)	Resistencia (kgf/cm ²)	Porcentaje (%)
1	4,95	4,97	4,97	4,96	19,35	3382	174,80	62,43
2	4,95	4,98	4,96	4,96	19,35	3354	173,35	61,91
3	4,95	4,97	4,97	4,96	19,35	3598,6	185,99	66,43
4	4,95	4,96	4,97	4,96	19,32	3623,4	187,53	66,97
5	4,98	4,95	4,97	4,97	19,37	2496,5	128,86	46,02
6	4,97	4,97	4,97	4,97	19,40	2523	130,05	46,45
7	4,95	4,97	4,95	4,96	19,30	3352,1	173,72	62,04
8	4,96	4,97	4,97	4,97	19,37	3339,6	172,38	61,56

Tabla 4 Resultados Ensayo de Compresión Laboratorio de Suelos Uleam.

Nota. Elaboración propia.

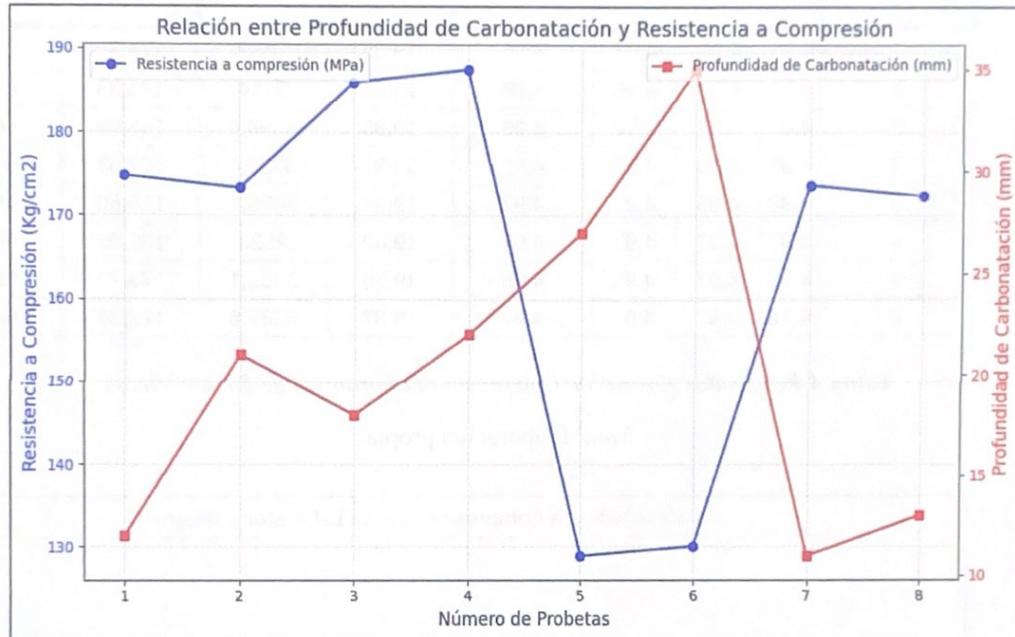


Gráfica 12 Resistencia a Compresión de los cilindros extraídos.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.

3.2.5 Correlación entre la Profundidad de carbonatación y la Resistencia a

Compresión



Gráfica 13 Correlación Profundidad de Carbonatación-Resistencia a Compresión.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.

En la **Gráfica 13** podemos observar una tendencia inversa, la cual, a medida que la profundidad de carbonatación disminuye en el eje derecho, la resistencia a compresión tiende a ser mayor en el eje izquierdo. Por tanto, este comportamiento de la gráfica sigue una tendencia esperada, debido a que la carbonatación deteriora la estructura del hormigón debilitando poco a poco su resistencia.

La probeta 1 tiene una resistencia a compresión de 174.80 kg/cm², pero su profundidad es relativamente baja 12 mm. Por otro lado, la probeta 6 tiene una resistencia relativamente baja en comparación a la probeta 1 con un valor de 130.05 kg/cm², pero posee una profundidad de carbonatación alta 35 mm.

(Joel Espinosa Longi, 2019) presenta la siguiente ecuación de la recta:

$$y = mx + b$$

Por tanto, reemplazamos nuestra variables dependientes e independientes en la ecuación de la recta para obtener la siguiente fórmula:

$$P = a + bR$$

$$b = \frac{n \sum(RP) - \sum(R) \sum(P)}{n \sum R^2 - (\sum R)^2}$$

$$a = \frac{\sum(P) - b \sum(R)}{n}$$

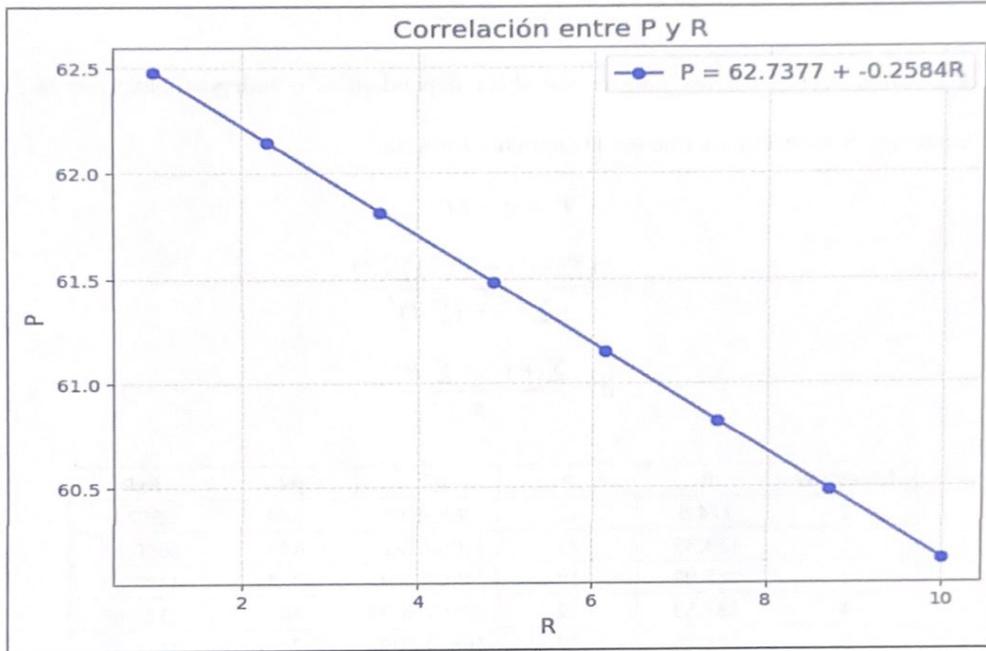
Muestras	R	P	R ²	P ²	RxP
1	174,8	12	30555,04	144	2097,6
2	173,35	21	30050,2225	441	3640,35
3	185,99	18	34592,2801	324	3347,82
4	187,53	22	35167,5009	484	4125,66
5	128,86	27	16604,8996	729	3479,22
6	130,05	35	16913,0025	1225	4551,75
7	173,72	11	30178,6384	121	1910,92
8	172,38	13	29714,8644	169	2240,94
Sumatoria	1326,68	159	223776,448	3637	25394,26

Obtenemos los valores de a y b

$$a = 62,7377$$

$$b = -0,2584$$

Luego podemos obtener la gráfica de correlación entre la profundidad de carbonatación (P) y la resistencia a compresión (R), de acuerdo con los valores obtenidos de los ensayos de carbonatación y resistencia a compresión podemos determinar esta correlación. La cual permitirá identificar el valor de profundidad de carbonatación para una valor determinado de resistencia a compresión.



Gráfica 14 Correlación dada por la Ecuación de la Recta.

Fuente: Elaboración Propia Colab Research Google.

En la **gráfica 14** se observa que presenta una relación lineal negativa entre R y P. El valor de 62.7377 representa al intercepto de a y su vez significa que cuando $R=0$, P va a tener un valor de 62.7377. El valor de -0.2584 representa a la disminución de P por cada incremento que realice R; quiere decir que, por cada incremento unitario de R, P disminuirá 0.2584.

La gráfica también hace referencia a una pendiente negativa lo que significa que la relación de R y P será inversamente proporcional, por tanto, cuando R aumente, P va a disminuir de forma lineal.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con las muestras analizadas de las 8 extracciones de núcleo, se logró obtener como resultado las profundidades de carbonatación en unidades de milímetros en las 4 pilas ensayadas, obteniendo profundidades variables de acuerdo con cada pila del paso a desnivel Tarqui.
- En la **Tabla 4** se puede observar los resultados de los ensayos a compresión realizados en la Prensa para ensayos de Hormigón ADR 3000 de los testigos extraídos por medio del ensayo diamantina.
- En la **Gráfica 13** se evidencia la correlación obtenida de las ocho profundidades de carbonatación y las ocho resistencias a compresión; la gráfica claramente correlaciona ambos parámetros obteniendo como resultado que el hormigón se encuentra afectado en su resistencia a compresión en las áreas donde posee mayor profundidad de carbonatación como es el caso de la Pila N° 3 de las muestras 5 y 6 respectivamente.
- Según la **Gráfica 10** se puede observar que existen 2 muestras que poseen mayor profundidad de carbonatación muestra 5 y 6, las cuales pertenecen a la pila N°3; y en la **Gráfica 12** podemos revisar que las mismas muestras 5 y 6 presentan baja resistencia a compresión de acuerdo con los ensayos realizados en el laboratorio.
- Por medio de la ecuación de la recta se obtuvo una ecuación lineal como muestra la **Gráfica 14**, permite correlacionar variables dependientes e independientes y obtener resultados confiables, por tanto, la ecuación mencionada es factible para decidir con rapidez en situaciones donde se requiera calcular la profundidad de carbonatación.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar recubrimientos protectores o tratamientos superficiales a las áreas más afectadas por la carbonatación, especialmente en las muestras 5 y 6 de la pila N°3. Esto ayudará a prevenir la progresión de la carbonatación y a preservar la integridad estructural.
- Establecer un programa de inspecciones regulares que incluya mediciones de profundidad de carbonatación y ensayos de resistencia a compresión. Esto permitirá identificar tempranamente las zonas críticas y planificar intervenciones antes de que los daños comprometan la estructura.
- Utilizar hormigones con propiedades mejoradas, como menor permeabilidad y mayor resistencia a la carbonatación, en reparaciones o nuevas construcciones. Esto puede lograrse mediante el empleo de cementos con menor contenido de clínker, adiciones puzolánicas o aditivos específicos.
- Incorporar en los proyectos de infraestructura un diseño que considere mayores recubrimientos de hormigón, así como el uso de refuerzos tratados contra la corrosión. Además, implementar protocolos de mantenimiento preventivo específicos para las zonas más expuestas.
- Aprovechar la ecuación obtenida en la Gráfica 14 como herramienta práctica para calcular de forma rápida y confiable las profundidades de carbonatación en áreas similares. Esto facilitará la evaluación del estado del hormigón y la priorización de acciones correctivas en zonas críticas.

REFERENCIAS

- Ana María Carvajal, S. C. (2007). *Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones*. Chile: Revista de la Construcción.
- ASTM INTERNATIONAL. (2023). *Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón*.
- Ávila, A. C. (2023). Ensayo mediante esclerómetro.
- Bravo, F. (s.f.). *Ensayo Diamantina*. Scrib .
- Cardenas, M. A. (12 de Septiembre de 2017). *La carbonatación del concreto... Un problema en un mundo industrializado [Fotografía]*. Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/la-carbonataci%C3%B3n-del-concreto-un-problema-en-mundo-alvarez-cardenas>
- Castaño, A. (2023). *Ensayo mediante esclerómetro*.
- Concrelab. (s.f.). *Patología y Diseños*. Bogotá.
- Concreto, 3. (2024). *ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO: UN APOORTE A LA EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y SOLUCIÓN*.
- CONSTRUNEIC. (2024). *Ensayo de carbonatación del concreto Guia 2024*.
- Española, N. (2007). *Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína*. MADRID: AENOR.
- Glemcompe. (2020). *Ensayos destructivos, semidestructivos y no destructivos en la evaluación de estructuras*. ESTUDIOS Y PROYECTOS SAC.
- HOLCIM. (2024). *Hormigón Armado: La Fortaleza en la Construcción Moderna*. ESPAÑA.
- Iloro, F. (2015). *EFFECTOS DEL CO2 AMBIENTAL SOBRE LA CARBONATACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON DISTINTOS CEMENTOS*. Ciencia y Tecnología de los Materiales.
- INCOBER. (2023). *Resistencia a la compresión del hormigón*. Obtenido de <https://incober.es/blog/resistencia-a-la-compresion-del-hormigon/>
- INGETEK. (2023). *Aceros de refuerzo: Características y propiedades*. Obtenido de <https://blog.ingetek.mx/aceros-de-refuerzo-caracteristicas-y-propiedades>
- Joel Espinosa Longi. (2019). *Diversas formas de la ecuación de la recta*. Instituto de Matemáticas.
- Lázaro, R. (2024). *Tipología Constructiva de Puentes | Las Pilas*. España: ALSINA.
- Maximiliano D. Segovia, A. I. (2009). *Carbonatación de Estructuras de Hormigón Armado en la Región Centro-Este Argentina: Influencia de la Contaminación Ambiental Urbana*. (pág. 14). Santa Fe: Revista Tecnología y ciencia.

- Medrano, F. P. (s.f.). *ASTM Designación C 42 – 03 Método de Ensayo Estándar para Obtención y Ensayo de Núcleos Taladrados y Vigas Aserradas de Concreto*. Academia.edu.
- Montani, R. (2000). *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- MTOP. (2016). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES*.
- Oscar Arellano. (2024). *Entendiendo la Carbonatación en el Concreto*. 6.
- Peña, D., Rodríguez, J., Salcedo, D., & Suarez Pereira, M. (2022). *ESTIMACIÓN DE DAÑOS OCASIONADOS POR LA CARBONATACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE NIRGUA*. NIRGUA, VENEZUELA: Gaceta Técnica.
- Piqueras, V. Y. (2018). *La captura de dióxido de carbono: la carbonatación del hormigón*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Quiroz, J. T. (2023). *Estudio del comportamiento del concreto sometido a alta temperatura*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- R, A. K. (2022). *AASTM C805 NUMERO DE REBOTE DE CONCRETO ENDURECIDO*. Universidad Tecnológica de Panamá.
- SIGUD. (2017). *GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS*. Universidad Distrital Francisco de Caldas.
- Solís Carcaño, R. G., Moreno, É. I., & Castro Borges, P. (2005). *Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera*. Yucatán, México: Redalyc.
- Sotilla, S. d. (2007). *EL AMBIENTE MARINO Y SUS PROCESOS DE DEGRADACIÓN SOBRE EL HORMIGÓN*. Catalunya.
- Tep205. (2018). *Ensayos no Destructivos*. Sevilla: _re-HABITAR.
- TORRES Acosta, A. P. (Diciembre de 2008). *Avances del proyecto Iberoamericano DURACON: Carbonatación del concreto en ambientes urbanos y urbano/marinos de México Y España*. Instituto Mexicano de Transporte, Artículo 2.
- TOXEMENT, E. G. (2017). *PATOLOGÍA CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO*. BARRANQUILLA: CONSTRUYENDO MEJOR PROYECTOS.
- Valdez-Tamez, P. (2009). *Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante*. Ciudad de México: SCIELO.
- Vidaud, E. (2012). *La carbonatación en el concreto reforzado*. IMCYC.



2017

2017



2017



2017

ANEXOS

Ensayo Carbonatación

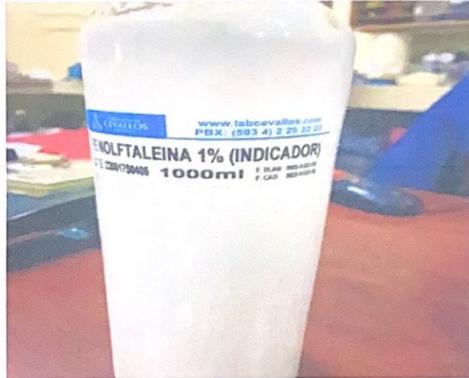


Figura 16 Indicador de Carbonatación



Figura 17 Ensayo Carbonatación Testigo 1



Figura 18 Ensayo Carbonatación Testigo 2



Figura 19 Ensayo Carbonatación Testigo 3



Figura 20 Ensayo Carbonatación Testigo 4



Figura 21 Ensayo Carbonatación Testigo 5



Figura 22 Ensayo Carbonatación Testigo 6

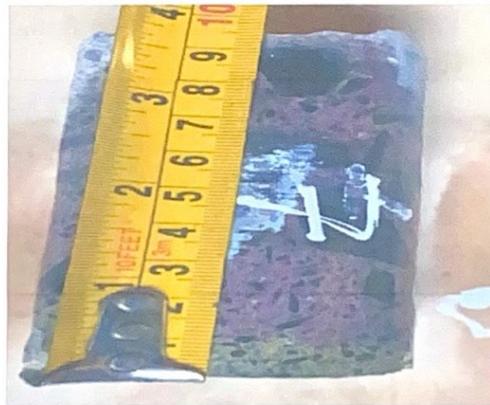


Figura 23 Ensayo Carbonatación Testigo 7



Figura 24 Ensayo Carbonatación Testigo 8

Ensayo Esclerometría



Figura 25 Ensayo Esclerometría



Figura 26 Ensayo Esclerometría

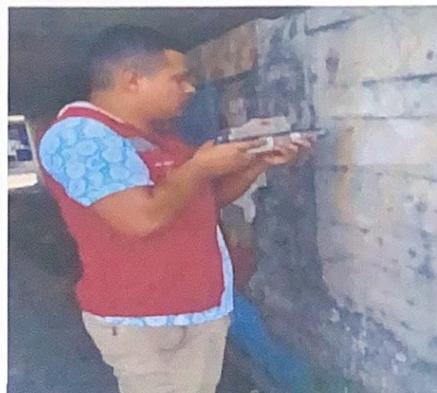


Figura 27 Ensayo Esclerometría

Extracción de Núcleo o Ensayo de Diamantina

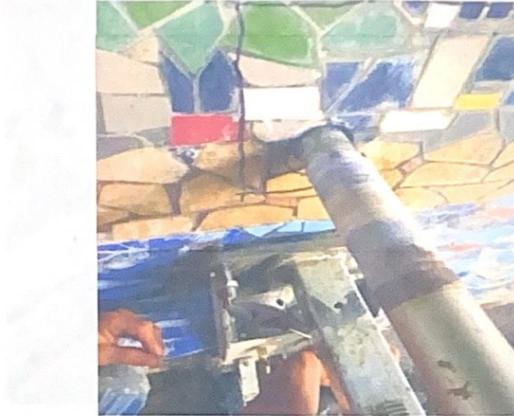


Figura 28 Ensayo Diamantina



Figura 29 Ensayo Diamantina



Figura 30 Ensayo Diamantina



Figura 31 Ensayo Diamantina



Figura 32 Ensayo Diamantina



Figura 33 Ensayo Diamantina



Figura 34 Pila ensayada.



Figura 35 Perforación para tacos.



Figura 36 Pachometría previo a Ensayo



Figura 37 Bomba Manual para Taladro



Figura 38 Taladro Ensayo Diamantina



Figura 39 Pachometría en pilas.



Figura 40 Tacos sujetación bases Taladro.



Figura 41 Tacos Metálicos.



Figura 42 Perforación de pilas.

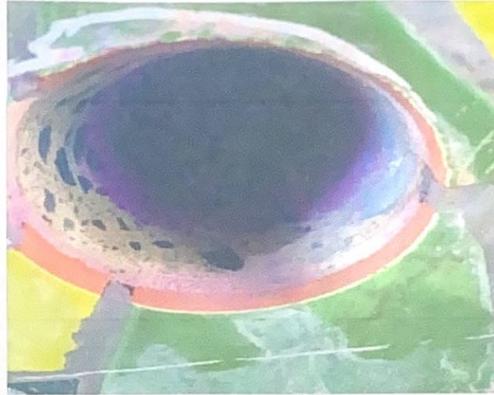


Figura 43 Carbonatación en sitio.



Figura 44 Pachometría



Figura 45 Prensa Ensayo a Compresión



Figura 46 Ensayo Resistencia a Compresión.



Figura 47 Ensayo Resistencia a Compresión.



Figura 48 Testigos ensayados.



Figura 49 Testigos ensayados.



Figura 50 Testigos ensayados.



Figura 51 Ensayo Laboratorio Ingeniería Civil



Figura 52 Corte de Testigos para relación 1:2



Figura 53 Corte de Testigos para relación 1:2



Figura 54 Corte de Testigos para relación 1:2

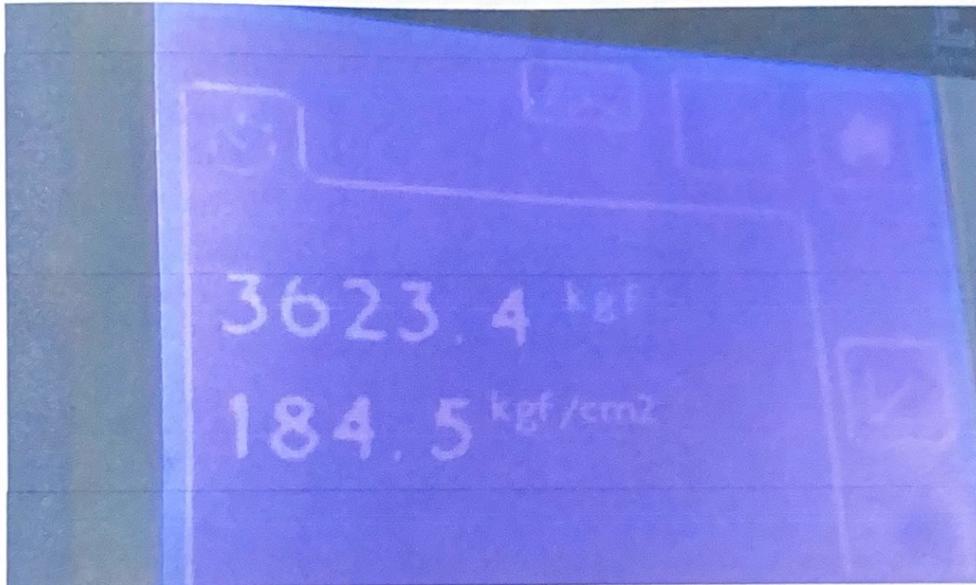


Figura 55 Resultados Ensayo a Compresión.



Figura 56 Resultados Ensayo a Compresión.

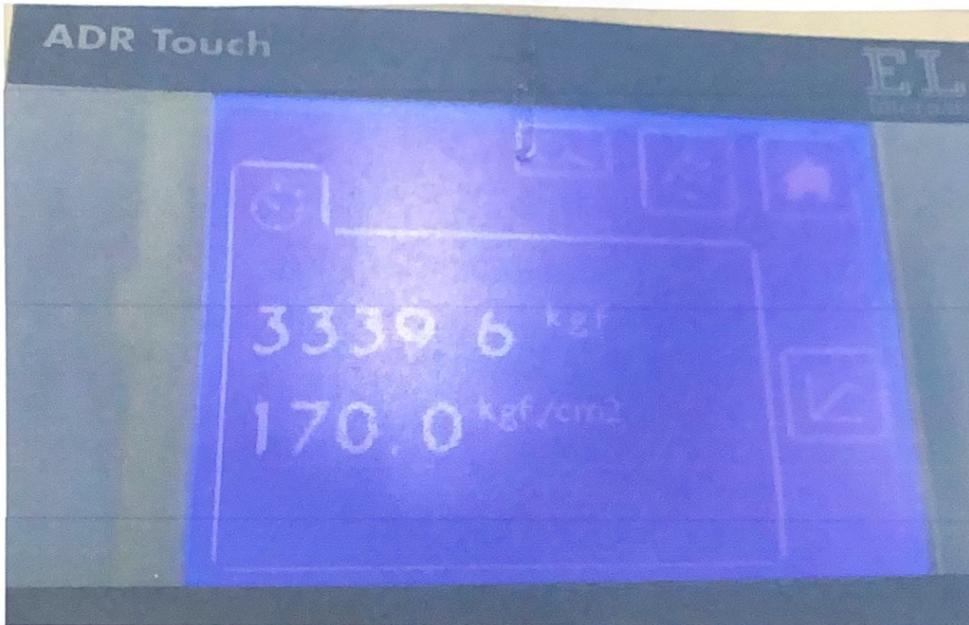


Figura 57 Resultados Ensayo a Compresión.



Figura 58 Resultados Ensayo a Compresión.