



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

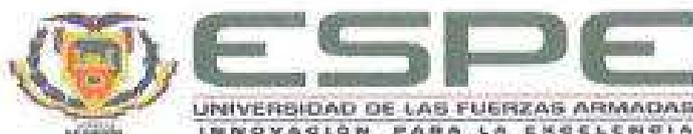
TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

TEMA: “AUSCULTACIÓN DEL HORMIGÓN LANZADO COMO
SISTEMA DE PROTECCIÓN DE TALUDES MEDIANTE
ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS”

AUTORA: PAMELA ABIGAIL COZAR GALEAS

DIRECTOR: ING. BYRON MORALES

SANGOLQUÍ, 2016



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "AUSCULTACIÓN DEL HORMIGÓN LANZADO COMO SISTEMA DE PROTECCIÓN DE TALUDES MEDIANTE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS", realizado por la señorita Pamela Abigail Cozar Galeas, ha sido guiado y revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos técnicos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar a la suscrita para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Noviembre de 2016

Ing. Byron Morales
Director



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

YO, PAMELA ABIGAIL COZAR GALEAS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado "AUSCULTACIÓN DEL HORMIGÓN LANZADO COMO SISTEMA DE PROTECCIÓN DE TALUDES MEDIANTE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Noviembre de 2016

Pamela Abigail Cozar Galeas

CC: 1400436976



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

YO, PAMELA ABIGAIL COZAR GALEAS

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación: "AUSCULTACIÓN DEL HORMIGÓN LANZADO COMO SISTEMA DE PROTECCIÓN DE TALUDES MEDIANTE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Noviembre de 2016

Pamela Abigail Cozar Galeas

CC: 1400436976

DEDICATORIA

A mis padres, que gracias a su esfuerzo y amor incondicional han sido el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional y formación como persona.

A mis hermanos, quienes me han motivado para concluir con esta parte importante de mi vida.

A mis profesores, quienes con sus conocimientos y enseñanzas me han formado para los nuevos caminos por emprender en la vida profesional.

PAMELA ABIGAIL COZAR GALEAS

AGRADECIMIENTO

A Dios, quien me dio la fuerza y sabiduría para culminar cada una de las metas propuestas.

A mi familia, de manera especial a mis padres por su paciencia, apoyo y sacrificio en todo este proceso de formación.

A mis profesores, de manera especial al Ing. Byron Morales, Director de Tesis y al Dr. Vicente Delgado, colaborador incansable en la realización de la misma.

Al personal de laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por la colaboración prestada durante la realización de los ensayos.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron y se vieron involucradas en el desarrollo de este proyecto.

PAMELA ABIGAIL COZAR GALEAS

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPITULO II.....	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Taludes	5
2.2. Revestimiento en taludes.....	6
2.3. Sistemas de recubrimiento de hormigón lanzado	7
2.3.1. Métodos de aplicación del hormigón lanzado	8
2.4. Diseño de la mezcla de hormigón.....	11
2.4.1. Diseño de hormigón proyectado por vía húmeda	12
2.4.2. Diseño de hormigón lanzado por vía seca	16

2.4.3. Materiales constituyentes.....	17
2.5. Anclajes	23
2.6. Lloraderos	24
2.7. Espesores y resistencias mínimas recomendadas	25
2.8. Fabricación del hormigón lanzado in situ	26
2.9. Preparación de la superficie del talud	27
2.10. Colocación y control de calidad del hormigón in situ	28
2.10.1. Colocación de armaduras	28
2.10.2. Colocación de la mezcla de hormigón	29
2.10.3. Técnicas de colocación.....	30
2.10.4. Rebote	32
2.10.5. Control de calidad	32
2.10.5.1. Pre-construcción de testigos.....	33
2.10.5.2. Construcción de testigos.....	35
2.11. Durabilidad y comportamiento del revestimiento	35
2.12. Equipos y herramientas	36
2.12.1. Equipo para mezcla en seco.....	37
2.12.2. Equipo para mezcla húmeda	38
2.12.3. Equipos auxiliares	38
2.13. Sistemas de seguridad, salud y ambiente.....	39
2.13.1. Riesgos afines con la aplicación de hormigón proyectado.....	39
2.13.2. Ambiente de trabajo.....	41
2.13.3. Medio ambiente	41
2.14. Ensayos destructivos y no destructivos en el hormigón.....	42
2.14.1. Ensayo esclerométrico (Martillo Schmidt).....	42
2.14.2. Ensayo de ultrasonido.....	47
2.14.3. Control de fisuras	57
2.14.4. Ensayo de carbonatación por medición de fenolftaleína.....	62
2.15. Causas y efectos de la contaminación atmosférica	67

2.15.1. Concepto de contaminación atmosférica	68
2.15.2. Fuentes de la contaminación del aire	68
2.15.3. Tipos de contaminantes atmosféricos.....	69
2.15.4. Efectos sobre los materiales provocados por los contaminantes.....	73
2.16. Análisis físico y químico de las muestras agua lluvia.....	73
2.16.1. Concepto de agua.....	73
2.16.2. Ciclo del agua	74
2.16.3. Agua lluvia	75
2.16.4. Lluvias ácidas	76
2.16.5. Efectos de las lluvias ácidas	77
2.16.6. Características físicas del agua lluvia	79
2.16.7. Características químicas del agua lluvia	81
2.17. Colectores de agua lluvia.....	91
2.17.1. Tipos de colectores	91
2.17.2. Diseño de colectores.....	92
CAPÍTULO III	94
ELABORACIÓN DEL CASO EN ESTUDIO	94
3.1. Descripción del sitio	94
3.2. Localización geográfica	95
3.3. Condiciones climáticas	98
3.4. Condiciones geológicas	99
3.5. Factores influyentes en la contaminación del aire	99
3.5.1. Densidad Poblacional	99
3.5.2. Tráfico vehicular.....	99
3.5.3. Emisión de gases.....	100
3.6. Ensayos destructivos y no destructivos en los taludes en estudio	103
3.6.1. Ensayo esclerométrico Talud N°1	103
3.6.2. Ensayo esclerométrico Talud N°2	105
3.6.3. Ensayo esclerométrico Talud N°3.....	106

3.6.4. Ensayo de ultrasonido Talud N°1.....	107
3.6.5. Ensayo de ultrasonido Talud N°2.....	111
3.6.6. Ensayo de ultrasonido Talud N°3.....	113
3.6.7. Control de fisuras Talud N°1.....	115
3.6.8. Control de fisuras Talud N°2.....	116
3.6.9. Ensayo de carbonatación por fenolftaleína Talud N°1.....	117
3.6.10. Ensayo de carbonatación por fenolftaleína Talud N°2.....	118
3.6.11. Ensayo de carbonatación por fenolftaleína Talud N°3.....	119
3.7. Control y monitoreo de las muestras de agua lluvia.....	122
3.7.1. Colocación de los colectores.....	122
3.7.2. Recolección y almacenamiento de las muestras.....	122
3.8. Ensayos en las muestras de agua lluvia.....	124
3.8.1. Muestra de agua lluvia Talud N°1.....	124
3.8.2. Muestra de agua lluvia Talud N°2.....	127
3.8.3. Muestra de agua lluvia Talud N°3.....	130
3.9. Guía metodológica para la evaluación y diagnóstico del revestimiento de hormigón lanzado en taludes de corte.....	133
CAPÍTULO IV.....	134
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PRESUPUESTO.....	134
4.1. Estadística descriptiva.....	134
4.1.1. Medidas de tendencia central:.....	134
4.1.2. Medidas de dispersión.....	135
4.2. Análisis de los ensayos destructivos y no destructivos.....	136
4.2.1. Análisis ensayo esclerométrico.....	136
4.2.2. Análisis en ensayo de ultrasonido.....	137
4.2.3. Análisis de ensayo de carbonatación por fenolftaleína.....	138
4.2.4. Análisis en ensayo de control de fisuras.....	140
4.3. Análisis de los ensayos en las muestras de agua lluvia.....	140
4.3.1. Análisis de los ensayos en muestras de agua Talud N°1.....	140
4.3.1. Análisis de los ensayos en muestras de agua Talud N°2.....	144

4.4. Costos.....	152
CAPÍTULO V.....	153
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	153
5.1. Conclusiones	153
5.2. Recomendaciones	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas.....	5
Figura 2. Sistema de mezcla húmeda.....	9
Figura 3. Sistema de mezcla seca	10
Figura 4. Sistema de mezcla semi-húmeda	11
Figura 5. Fibras de acero convencional	23
Figura 6. Anclajes pasivos y lloraderos en taludes de corte	24
Figura 7. Amasadora con eje vertical.....	27
Figura 8. Inclinação y distancia óptima de la boquilla al paramento	31
Figura 9. Aplicación de shotcrete manual de forma metódica	32
Figura 10. Grados de los núcleos de testigos	34
Figura 11. Equipo de bombeo para shotcrete vía seca de doble cámara	37
Figura 12. Detalle de bombeo con desplazamiento positivo por pistón	38
Figura 13. Detalle de la función de la boquilla	39
Figura 14. Medidas de seguridad en la proyección de hormigón lanzado ...	40
Figura 15. Esclerómetro tipo Schmidt	43
Figura 16. Principio de funcionamiento de martillo tipo Schmidt.....	44
Figura 17. Ejecución del ensayo esclerométrico.....	46
Figura 18. Relación entre el índice de rebote y la resistencia a compresión	47
Figura 19. Principio de funcionamiento del aparato de ensayo	50
Figura 20. Calibración del equipo de ultrasonido	52
Figura 21. Arreglo de los palpadores	52
Figura 22. Procedimiento para acoplar los transductores	53
Figura 23. Medición de velocidad de impulso por transmisión indirecta	54
Figura 24. Puntos aleatorios para el ensayo sobre los taludes.....	54
Figura 25. Determinación de la velocidad por transmisión indirecta	56
Figura 26. Fisuración por retracción plástica	58
Figura 27. Fisuración de un muro por contracción térmica inicial	59
Figura 28. Instrumento para medir anchos de fisura.....	62
Figura 29. Ensayo de carbonatación con indicador de fenolftaleína.....	64
Figura 30. Extracción de testigos de hormigón	65

Figura 31. Diagrama del ciclo del agua.....	75
Figura 32. Papel indicador de pH.....	82
Figura 33. Medidor de pH	83
Figura 34. Calibración del equipo para pH.....	84
Figura 35. Solución indicadora de anaranjado de metilo	87
Figura 36. Titulación con ácido clorhídrico.....	87
Figura 37. Medidor de conductividad	89
Figura 38. Tipo de colectores de agua lluvia	92
Figura 39. Colector de agua lluvia, Tipo 1	93
Figura 40. Componentes del colector de agua lluvia	94
Figura 41. Talud N°1 ubicado junto al mural de Manuela Sáenz	96
Figura 42. Talud N°2 Av. Velasco Ibarra.....	97
Figura 43. Talud N°3 Av. Simón Bolívar	98
Figura 44. Concentraciones diarias máximas SO ₂ , año 2014.....	101
Figura 45. Concentraciones máximas en una hora de NO ₂ , año 2014	102
Figura 46. Concentraciones octohorarias máximas para O ₃ , año 2014.....	103
Figura 47. Puntos ensayados con esclerómetro Talud N°1	104
Figura 48. Puntos ensayados con esclerómetro Talud N°2	105
Figura 49. Puntos ensayados con esclerómetro Talud N°3	106
Figura 50. Puntos ensayados con ultrasonido Talud N°1	108
Figura 51. Ecuación de la recta para calcular la pendiente	109
Figura 52. Puntos ensayados con ultrasonido Talud N°2	111
Figura 53. Puntos ensayados con ultrasonido Talud N°3	113
Figura 54. Medición de fisuras Talud N°1	115
Figura 55. Ensayo de carbonatación Talud N°1	117
Figura 56. Ensayo de carbonatación Talud N°2	118
Figura 57. Ensayo de carbonatación Talud N°3	120
Figura 58. Medición de pH en campo	122
Figura 59. Medición de temperatura en campo.....	123
Figura 60. Almacenamiento de las muestras de agua lluvia	123
Figura 61. Gráfico comparativo de resistencias a la compresión.....	137
Figura 62. Gráfico comparativo de velocidades de ultrasonido	138

Figura 63. Gráfico comparativo de los espesores.....	139
Figura 64. Gráfico comparativo de pH Talud N°1	142
Figura 65. Gráfico comparativo de Conductividad Talud N°1	142
Figura 66. Gráfico comparativo de TDS Talud N°1	143
Figura 67. Gráfico comparativo de Potencial Redox Talud N°1	143
Figura 68. Gráfico comparativo de Acidez Talud N°1	144
Figura 69. Gráfico comparativo de pH Talud N°2	146
Figura 70. Gráfico comparativo de Conductividad Talud N°2	146
Figura 71. Gráfico comparativo de TDS Talud N°2.....	147
Figura 72. Gráfico comparativo de Potencial Redox Talud N°2.....	147
Figura 73. Gráfico comparativo de Acidez Talud N°2	148
Figura 74. Gráfico comparativo de pH Talud N°3	150
Figura 75. Gráfico comparativo de Conductividad Talud N°3	150
Figura 76. Gráfico comparativo de TDS Talud N°3.....	151
Figura 77. Gráfico comparativo de Potencial Redox Talud N°3.....	151
Figura 78. Gráfico comparativo de Acidez Talud N°3	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometrías recomendadas para hormigón proyectado	13
Tabla 2. Resistencia del hormigón especificada a los 28 días.....	14
Tabla 3. Diseño de mezcla de hormigón lanzado vía húmeda flujo denso ..	15
Tabla 4. Diseño de mezcla de hormigón lanzado vía húmeda flujo diluido..	15
Tabla 5. Constituyentes de la mezcla húmeda con aire incorporado.....	16
Tabla 6. Diseño de mezcla de hormigón lanzado vía seca	16
Tabla 7. Aditivos químicos en mezclas de concreto	21
Tabla 8. Espesor y resistencias mínimas de diseño recomendadas.....	26
Tabla 9. Ventajas y desventajas del ensayo de ultrasonido	49
Tabla 10. Clasificación del hormigón según Malhotra.....	56
Tabla 11. Niveles de concentración entre aire limpio y aire contaminado ...	67
Tabla 12. Dirección del impacto.....	103
Tabla 13. Resultados ensayo esclerométrico Talud N°1	104
Tabla 14. Resultados ensayo esclerométrico Talud N°2	106
Tabla 15. Resultados ensayo esclerométrico Talud N°3	107
Tabla 16. Resultados ensayo de ultrasonido Talud N°1	109
Tabla 17. Resultados ensayo de ultrasonido Talud N°2	111
Tabla 18. Resultados de ensayo de ultrasonido, Talud N°3	113
Tabla 19. Medición de fisuras Talud N°1	115
Tabla 20. Medición de fisuras talud N°2	116
Tabla 21. Resultados en muestra de agua sobre el talud Talud N°1.....	124
Tabla 22. Resultados en muestra de agua diaria Talud N°1.....	125
Tabla 23. Resultados en muestra de agua acumulada Talud N°1	126
Tabla 24. Resultados en muestra de agua sobre el talud Talud N°2.....	127
Tabla 25. Resultados en muestra de agua diaria Talud N°2.....	128
Tabla 26. Resultados en muestra de agua acumulada Talud N°2.....	129
Tabla 27. Resultados en muestra de agua sobre el talud Talud N°3.....	130
Tabla 28. Resultados en muestra de agua diaria Talud N°3.....	131
Tabla 29. Resultados en muestra de agua acumulada Talud N°3	132
Tabla 30. Parámetros estadísticos en ensayo esclerométrico	136

Tabla 31. Parámetros estadísticos en ensayo de ultrasonido.....	137
Tabla 32. Parámetros estadísticos en ensayo de carbonatación.....	138
Tabla 33. Espesores de los taludes en estudio	139
Tabla 34. Parámetros estadísticos agua diaria Talud N°1	140
Tabla 35. Parámetros estadísticos en agua acumulada Talud N°1	141
Tabla 36. Parámetros estadísticos en agua sobre el Talud N°1	141
Tabla 37. Parámetros estadísticos en agua diaria Talud N°2	144
Tabla 38. Parámetros estadísticos en agua acumulada Talud N°2	145
Tabla 39. Parámetros estadísticos en agua sobre el Talud N°2	145
Tabla 40. Parámetros estadísticos en agua diaria Talud N°3	148
Tabla 41. Parámetros estadísticos en agua acumulada Talud N°3	149
Tabla 42. Parámetros estadísticos en agua sobre el Talud N°3	149
Tabla 43. Costo hormigón lanzado	152
Tabla 44. Costo hormigón lanzado, taludes en estudio	152

RESUMEN

El presente proyecto de investigación está orientado a la evaluación de los sistemas de protección de hormigón lanzado en taludes de corte, mediante ensayos destructivos y no destructivos en el hormigón que tienen como propósito determinar el desgaste, calidad, resistencia, durabilidad y tiempo de vida útil de esta protección. Dichos taludes se encuentran ubicados en dos lugares de la Ciudad de Quito; Sector El Trébol y Av. Simón Bolívar, zonas vulnerables ante la actividad sísmica y con gran afluencia vehicular que provoca altas concentraciones de contaminantes en la atmósfera, que al combinarse con el agua, forman lluvias ácidas afectando al recubrimiento del hormigón en los taludes. Considerando la falta de seguimiento y mantenimiento al sistema de protección, es necesario realizar un auscultamiento del revestimiento de hormigón para evitar un deterioro progresivo en la infraestructura que podría ser causante de pérdidas de vidas humanas, infraestructura habitacional y vial de la zona.

PALABRAS CLAVE

- **TALUDES DE CORTE**
- **HORMIGÓN LANZADO**
- **COLECTORES**
- **LLUVIA ÁCIDA**
- **CARBONATACIÓN**

ABSTRACT

This research project is aimed at evaluating protection systems shotcreting cut slopes by destructive and non-destructive testing in the concrete that are intended to determine wear, quality, strength, durability and lifetime helpful this protection. These slopes are located in two places of the City of Quito; Sector El Trébol and Av. Simon Bolivar, areas vulnerable to seismic activity and high vehicular flow that causes high concentrations of pollutants in the atmosphere, which when combined with water, form acid rain affecting the concrete cover on slopes. Considering the lack of monitoring and protection system maintenance, it is necessary to make a auscultamiento the concrete lining to prevent progressive deterioration in infrastructure that could be causing loss of life, housing and road infrastructure in the area.

KEYWORDS

- **CUT SLOPES**
- **CONCRETE RELEASED**
- **COLLECTORS**
- **ACID RAIN**
- **CARBONATION**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

El crecimiento demográfico tanto urbano y rural, se acentúa año a año en busca de nuevos lugares para construir sus edificaciones y habilitarlas en las diferentes regiones del territorio nacional; dichas áreas o zonas escogidas empíricamente, a veces sin el concurso de técnicos especializados en esta materia, pueden estar expuestas a los fenómenos de deslizamientos y derrumbes, de allí, que es necesario el estudio geológico previo del lugar, a fin de buscar la estabilidad y seguridad de la obra en un futuro. (Ramos, 2006)

En los últimos años, la saturación de los cuerpos de los taludes y el inadecuado uso del suelo por parte de moradores especialmente de bajos recursos económicos, asentados ilegalmente en bordes de quebradas y vías, provocaron deslizamientos y deslaves de consideración en el Distrito Metropolitano de Quito, que causaron la pérdida de bienes, servicios e inclusive de vidas humanas.

Para mitigar la situación de los deslaves en el sector El Trébol y en la Av. Simón Bolívar, la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas ha intervenido de manera oportuna; sin embargo, no se evidencia un mantenimiento a las obras construidas. Por consiguiente, es lógico pensar que no se ha cumplido con el propósito principal de reducir la amenaza existente.

Los problemas de estabilidad que presentan los taludes aledaños al sector, son de una dimensión y complejidad muy grande, es evidente el riesgo de desastre que se puede presentar en cualquier momento, especialmente en épocas de lluvias constantes, en temporadas muy largas y de un volumen por encima de lo normal, como el deslizamiento de tierra

ocurrido a 400 metros del redondel de El Trébol (centro-oriente de Quito) el pasado año.

En la actualidad, esta zona es vulnerable ante la actividad sísmica del volcán Cotopaxi, asociada a la emisión de gases y ceniza que al contacto con el agua forma las llamadas lluvias acidas, afectando considerablemente a las obras de ingeniería, en este caso a los taludes revestidos con hormigón lanzado.

También se han hecho inspecciones visuales a estas obras, donde es evidente la presencia de manchas negras sobre los taludes revestidos con hormigón lanzado, producto de la contaminación a la que están expuestas por su ubicación en una zona de alto flujo vehicular que ha crecido desmesuradamente en los últimos años y los cambios climáticos que han provocado lluvias intensas por largos periodos. Frente a estos temas no se ha hecho ningún trabajo de sensibilización o educación ambiental, mientras el deterioro de los taludes es evidente.

Lo anterior, hace necesario una oportuna intervención y estudio a las obras existentes con el fin de evaluar, diagnosticar las condiciones de resistencia, durabilidad y tiempo de vida útil de este sistema de protección, para prevenir que se genere un desastre catastrófico.

1.2. Justificación

Los desastres naturales suceden en todo el mundo y las poblaciones cercanas a estos eventos son las más afectadas, por ende, el hombre ha visto la necesidad de realizar obras de mitigación, para salvaguardar la vida y minorar los daños causados por el desastre.

El gobierno del Ecuador en los últimos años, se encuentra invirtiendo en proyectos de infraestructura vial y específicamente en estabilidad de taludes

de corte, esto con el fin de prever deslizamientos especialmente en temporadas invernales.

Es esencial considerar que un gran número de taludes en los corredores principales, han sido intervenidos por una campaña de sistemas de protección mediante recubrimiento de hormigón lanzado, los cuales no han sido monitoreados ni evaluados en cuanto al respectivo desempeño desde su fabricación in situ.

Tomando en cuenta la falta de seguimiento y mantenimiento al sistema de protección mediante recubrimiento de hormigón lanzado, es necesario realizar un auscultamiento global del talud y de las condiciones actuales en cuanto a la resistencia y durabilidad, por medio del cual se evita un deterioro progresivo de la infraestructura, generación de un plano de falla y riesgo de pérdidas de vidas humanas, así como la infraestructura habitacional y vial de la zona.

1.3. Planteamiento del problema

El proyecto se centra en dos lugares ubicados en la Ciudad de Quito; Sector El Trébol corredor sentido norte-sur y Av. Simón Bolívar sentido sur-norte. En estos tramos se genera un alto flujo y volumen de tráfico, así como una topografía con relieve montañoso lo que desarrolla un talud con pendiente pronunciada, cargas de edificaciones dispuestas en la corona y sistemas de protección en el cuerpo del talud mediante recubrimiento de hormigón lanzado.

Es importante destacar que el proyecto se ubica en una zona de gran afluencia de movilidad y transporte, en el cual se evidencian emisiones de contaminantes al aire que al combinarse con las precipitaciones, forman las

lluvias ácidas que se depositan sobre los taludes y que afectan directamente al recubrimiento de hormigón lanzado.

La infraestructura lineal del corredor oriental y la influencia de viviendas localizadas directamente en el proyecto, son susceptibles de colapso por factores directos e indirectos que inciden en el talud existente, esto debido a la falta de monitoreo, evaluación y diagnóstico del deterioro del recubrimiento de hormigón lanzado, lo que representa un riesgo para los habitantes y conductores en el área de influencia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar los sistemas de protección de hormigón lanzado en taludes de corte, mediante ensayos destructivos y no destructivos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Obtener información de las áreas de intervención de los sistemas de protección e infraestructura de los taludes en estudio.
- Determinar la pérdida de desgaste para conocer el proceso del deterioro del hormigón lanzado, mediante ensayos destructivos y no destructivos.
- Obtener una guía metodológica para la evaluación y diagnóstico del revestimiento del hormigón lanzado en taludes de corte.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Taludes

Un talud o ladera es una masa de tierra que posee pendientes o cambios de altura significativos (Figura 1.). Se define como ladera cuando su formación tiene como origen un proceso natural a través del tiempo, y talud cuando se conformó artificialmente debido a la injerencia del hombre para su construcción (Suárez, 1998).

Los taludes artificiales se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los muros de contención y los cortes de laderas. Estos últimos se crean principalmente en la excavación en una formación terrea natural a la hora de realizar un proyecto o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil.

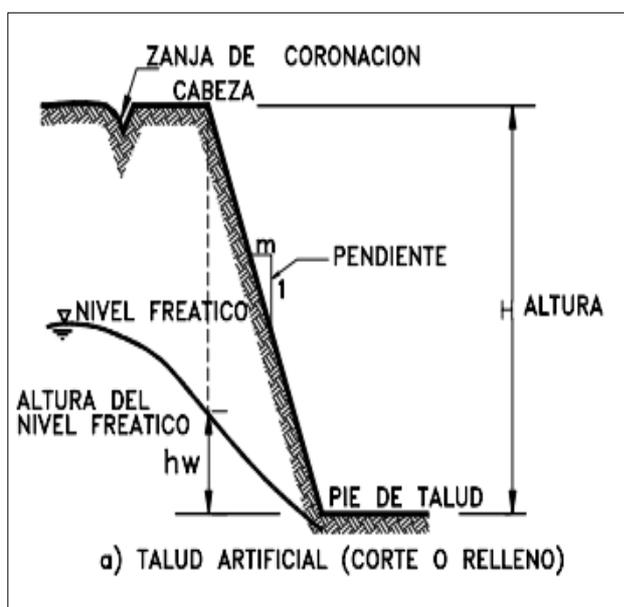


Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas

Fuente: (Suárez, 1998)

Nomenclatura de taludes

1. **Altura:** Es la distancia vertical entre la cabeza y el pie.
2. **Pie:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza:** Es el sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** Distancia vertical desde el pie del talud hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera.

2.2. Revestimiento en taludes

Generalidades

Los taludes naturales que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar en forma inesperada debido a cambios en la geometría, lluvias intensas, actividad volcánica, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, factores de origen natural o antrópico que alteran el estado natural de estabilidad.

El revestimiento es una estructura necesaria en taludes artificiales o taludes naturales, se realiza principalmente para controlar la erosión en suelos o rocas blandas, propensos a deslizamientos masivos.

La protección superficial de la cara del talud se puede realizar de distintas formas: mediante la revegetación del talud, colocando concreto lanzado o utilizando geomatrices (Morales, 2015). Además, por medio de un enrocado se puede recubrir las márgenes en los taludes de las presas hidráulicas.

El revestimiento debe satisfacer los principales requerimientos que garanticen una construcción segura, económica y que se adapte según las necesidades al proceso de construcción. Al mismo tiempo se consideran los

siguientes aspectos: vida útil, seguridad, costos de operación, mantenimiento y calidad del producto.

2.3. Sistemas de recubrimiento de hormigón lanzado

Desde la década de los cincuenta en el siglo XX, el American Concrete Institute (ACI), adoptó el término de concreto lanzado o proyectado (shotcrete), definiéndolo como “un mortero o concreto que es lanzado a altas velocidades en forma neumática sobre una superficie, que puede ser piedra, terreno natural, mampostería, acero, madera, etcétera”. La proyección a velocidades altas permite compactar el concreto, logrando disminuir los tiempos del proceso productivo (Ochoa, 2014).

La aplicación de esta técnica en el campo de la ingeniería, tuvo sus inicios en el revestimiento de túneles, como parte del diseño y proceso constructivo, que se lleva a cabo rápidamente después de la excavación, como parte del sostenimiento o después de éste cuando se considera como revestimiento (Ubaldo, 2016). El desarrollo científico de los materiales y la mejora de su rendimiento, han hecho del concreto lanzado el material por excelencia para la construcción de obras subterráneas. Debido a su modo de aplicación, permite el sostenimiento inmediato y una excelente impermeabilidad, adaptándose perfectamente al contorno de la excavación. (BASF, 2009).

Con base en lo anterior, la popularidad ha aumentado en los últimos años por sus evidentes ventajas: versatilidad al trabajarse, alto rendimiento, optimización en tiempos de ejecución y flexibilidad para modificar las características según requisitos particulares para cualquier proyecto (Claussen, 2015).

En la actualidad, el hormigón lanzado es implementado como revestimiento en taludes de corte, funciona como una estructura de soporte y protección al terreno a fin de preservar su estabilidad, aunado a la alta tecnología desarrollada, han permitido alcanzar los requerimientos técnicos y disminuir los tiempos del proceso productivo en la ejecución de las obras,

además de brindar una solución inmediata mientras se cumpla con las exigencias y requerimientos básicos para su utilización.

2.3.1. Métodos de aplicación del hormigón lanzado

En la actualidad se usan tres procesos distintos para la ejecución del hormigón lanzado:

1. Sistema de mezcla húmeda

La gunita de mezcla húmeda consigue morteros y hormigones de propiedades equivalentes a la mezcla seca con técnicas de dosificación y aditivos, pero se consigue una disminución importante de la dispersión de resultados, causa y preocupación del control de aplicación (Rey A. , 2007).

El cemento, los áridos, el agua y los aditivos se mezclan en la planta de hormigón adecuadamente hasta lograr una homogeneidad de la mezcla. La mezcla se transporta mediante dos tipos de procedimientos (Figura 2.), por flujo diluido (transporte por aire comprimido) y por flujo denso (bombeo). Dichas máquinas se limitan a un bombeo a alta velocidad, a través de mangueras hasta la boquilla de proyección provista de un chorro de aire comprimido, obteniéndose así un mortero u hormigón con una compactación suficiente (Lozano, 2003).

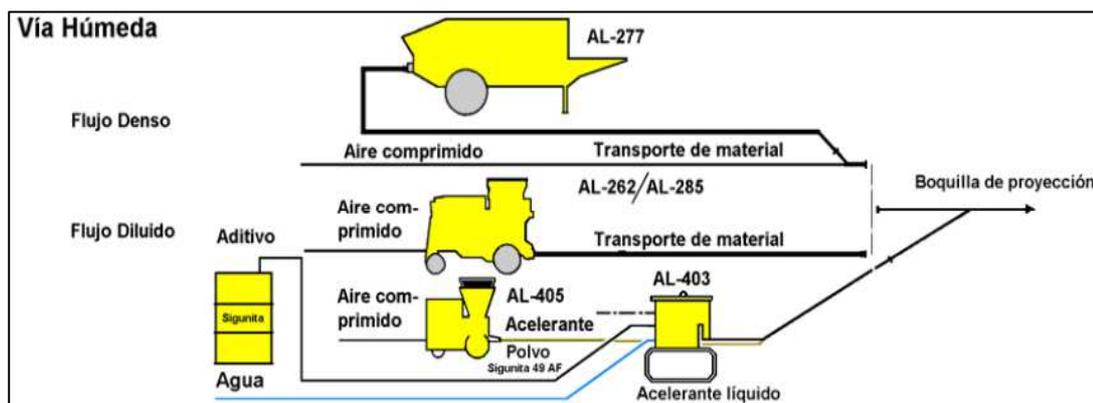


Figura 2. Sistema de mezcla húmeda

Fuente: (Rey A. , 2006)

Es el sistema de proyección más utilizado gracias a su versatilidad y eficiencia. Incluye una gunita de características homogéneas a lo largo de toda la obra, por medio del constante control de la relación A/C. Las ventajas de utilizar este método residen en el ahorro de material, en el rebote y generación de polvo. La aplicación más usual es para trabajos con altos rendimientos (más de 25 m³/h) y alta exigencia en calidad (Aetos, 2014).

2. Sistema de mezcla seca

El sistema de mezcla seca consta de una serie de fases, y requiere unos equipos especializados (Figura 3.). Es un procedimiento mediante el cual todos los componentes del hormigón se mezclan previamente, excepto el agua que se añade en la boquilla antes de la proyección de la mezcla, transportándose la mezcla en seco a través de mangueras de forma neumática hasta la boquilla (Rey A. , 2007).

El sistema de mezcla vía seca, está compuesto por las siguientes fases (Sika, 2009):

1. Los áridos y el cemento se mezclan adecuadamente hasta conseguir una mezcla homogénea.

2. La mezcla de cemento/áridos en seco, se introduce en la máquina de proyección a través de la tolva de alimentación.
3. La mezcla entra en la manguera de transporte mediante una rueda o distribuidor, en esta fase se pueden añadir los aditivos.
4. La mezcla se transporta mediante aire comprimido hasta una boquilla que está equipada con un distribuidor múltiple perforado a través del cual se pulveriza el agua a presión y/o el aditivo acelerante de fraguado líquido que se mezcla con el conjunto cemento/áridos.
5. La mezcla ya húmeda se proyecta desde la boquilla sobre la superficie que debe gunitarse.

Este tipo de sistema de mezcla se emplea con frecuencia cuando se requiere resistencias iniciales altas y trabajos de pequeña entidad, es decir, con niveles de producción relativamente reducida (menos de $25\text{m}^3/\text{h}$), para el sellado preliminar contra infiltraciones, trabajos de impermeabilización, entre otros, sin embargo en este procedimiento se genera grandes cantidades de rebotes y polvos lo cual incrementa los costos (Aetos, 2014).

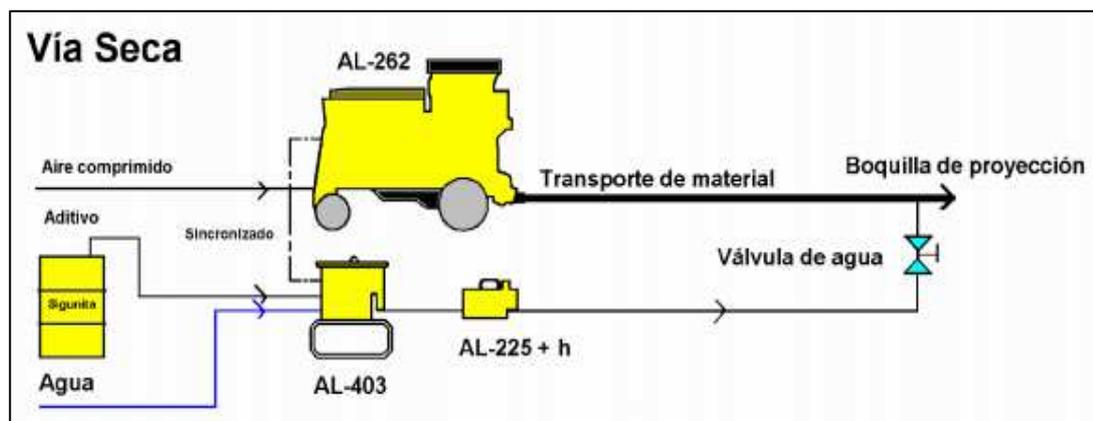


Figura 3. Sistema de mezcla seca

Fuente: (Rey A. , 2006)

3. Sistema de mezcla semi-húmeda

Este procedimiento es similar al sistema de mezcla seca, diferenciándose únicamente en que a una distancia de 4-5 m de la boquilla, se genera la adición de agua y se debe humedecer los áridos hasta un 10 %, por lo que se mejoran las propiedades de la mezcla al llegar a la boquilla, de la que saldrá el mortero u hormigón proyectado. (Rey A. , 2007).

La ventaja del sistema de mezcla semi-húmeda, radica en la incorporación del agua durante esos 5 m a la mezcla, por lo tanto se obtiene una perfecta homogeneidad con un control más apropiado de relación agua/cemento. Además se disminuye las cantidades de rebote, las pérdidas de cemento y se minimiza los costes. Ver Figura 4.

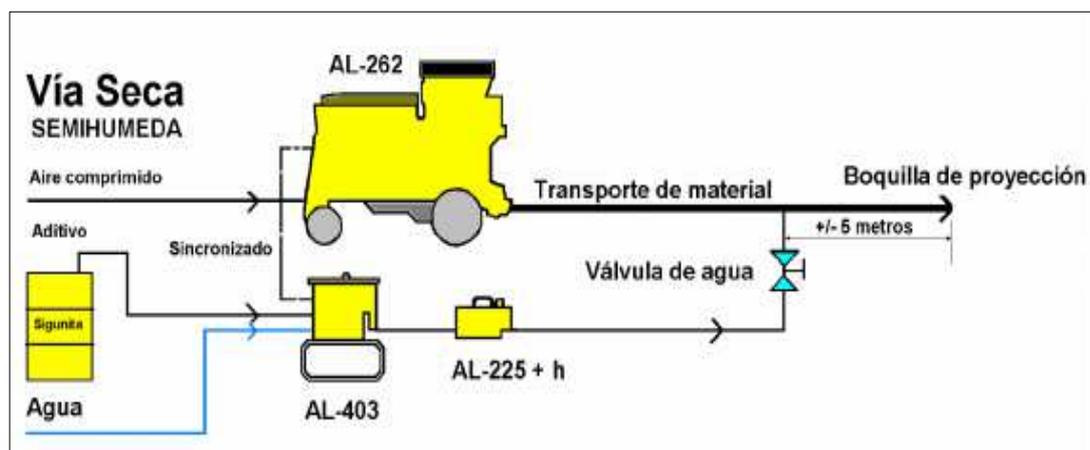


Figura 4. Sistema de mezcla semi-húmeda

Fuente: (Rey A. , 2006)

2.4. Diseño de la mezcla de hormigón

Al igual que el hormigón convencional, el hormigón proyectado está constituido por cemento, agua, agregados, aditivos y eventualmente adiciones (microsílice y fibras) para conseguir los rendimientos previstos, disminuir la formación de polvos, mejorar las propiedades mecánicas y físicas del hormigón (ICH, 2015).

El diseño de una mezcla de hormigón proyectado debe basarse en los requerimientos de resistencia, tipo de estructura, logística a utilizarse y sitio de aplicación (condiciones de temperatura), para cumplir los niveles de desempeño y calidad.

Además de los parámetros antes mencionados, para el adecuado diseño de un proyecto de hormigón proyectado, deben considerarse los siguientes aspectos (Aetos, 2014):

- Las funciones y el uso al que está destinado.
- La naturaleza y calidad del elemento soporte sobre el que se proyecta.
- La adecuada valoración geomecánica del terreno.
- La estimación de tensiones y naturaleza del macizo-terreno.

Diseño por condiciones de durabilidad

La durabilidad es la capacidad de una estructura para resistir a las condiciones de exposición medioambientales (ataque químico al hormigón y corrosión de la armadura) que puedan ocurrir durante su vida proyectada sin la necesidad de un mantenimiento excesivo. Los requisitos de durabilidad se satisfacen mediante el control de medidas tales como limitar la máxima relación a/c, la mínima cantidad de cemento o la máxima permeabilidad aceptable. (ICH, 2015).

Se define como años de operación (n), al tiempo comprendido desde la inauguración del proyecto hasta el término de su vida útil (MTOP, 2012). Los taludes de corte revestidos de hormigón lanzado pertenecen al grupo de proyectos de rehabilitación y mejoras, por lo tanto la vida útil del proyecto es $n = 20$ años.

2.4.1. Diseño de hormigón proyectado por vía húmeda

La elección de las proporciones de los materiales en la mezcla para la proyección de hormigón de grandes obras de infraestructura, se basa por lo general en la resistencia especificada a la compresión, límites al asentamiento, resistencia a la flexión o tenacidad, densidad, permeabilidad, retracción por secado, durabilidad y la aplicación en terreno. Las mezclas bombeables normalmente contienen un mayor porcentaje de arena/finos para eliminar la segregación y para la lubricación (ICH, 2015).

La posibilidad de alcanzar un diseño satisfactorio de la mezcla, está relacionado con la elección de los materiales en las proporciones correctas y el cumplimiento de las normas ecuatorianas u otras normas pertinentes antes de aceptar su uso. Para la mezcla de los áridos se debe considerar las granulometrías recomendadas que se muestran en la Tabla 1., de los códigos internacionales de mayor uso. En el caso de requerir un hormigón proyectado fino (mortero), se emplea la curva fina de la norma ACI 506.

Tabla 1.

Granulometrías recomendadas para hormigón proyectado

Malla	EFNARC	ACI 506-G1	ACI 506-G2	Austria	RTA B82	
ASTM	mm	Min-Max	Min-Max	Min-Max	Min-Max	
#100	0,15	6 - 16	2 – 10	2 – 10	6 – 12	2 - 10
#50	0,30	14 - 32	10 – 30	8 – 20	10 – 17	8 - 20
#30	0,60	26 - 56	25 – 60	20 – 35	21 – 29	20 - 40
#16	1,20	41 - 76	50 – 85	35 – 55	33 – 44	35 - 55
#8	2,40	59 - 92	80 – 98	50 – 70	50 – 60	50 - 70
#4	4,75	77 - 100	95 – 100	70 – 85	70 – 80	70 - 85
3/8"	10	93 - 100	100	90 – 100	90 – 97	90 - 100
5/8"	16	100		100	100	100

Fuente: (ICH, 2015)

Las dosificaciones para hormigón proyectado varían dependiendo de las particulares características de cada proyecto, diseño, materiales y técnicas

de proyección a utilizar, entre otros. Por lo general, la dosificación de los materiales para una resistencia de 28 Mpa está compuesta por (ACI 506R-05, 2005):

- Cemento: 390 a 450 kg/m³
- Agregados:
 - Grava (13 mm máx.): 20 a 30%
 - Arena: 70 al 80%
- Relación A/C entre 0.4 - 0.5

El contenido de aire total mínimo antes de ser bombeado deberá ser de un 6%, ya que al disparar el hormigón proyectado se pierde el contenido del aire inicial (ACI 506R-05, 2005). Se puede conseguir una resistencia de 28Mpa a los 28 días si se tiene un asentamiento de 50 a 100 mm, un contenido de aire máximo de 10% y una relación A/C máxima de 0,5 (Byrne, 2004).

En la Tabla 2., se observa la resistencia del hormigón especificada a los 28 días de acuerdo al contenido de cemento.

Tabla 2.

Resistencia del hormigón especificada a los 28 días

Resistencia especificada a los 28 días	Contenido de cemento kg/m ³
21	295 – 385
28	325 – 415
35	385 – 505

Fuente: (ACI 506R-05, 2005)

En la Tabla 3. y Tabla 4., se indica el diseño para mezcla de hormigón vía húmeda con flujo denso y diluido respectivamente (Hofler, 2004).

Tabla 3.

Diseño de mezcla de hormigón lanzado vía húmeda flujo denso

Mezcla de hormigón lanzado vía húmeda flujo denso		
Cemento	425 kg	135 l
SikaFume® HR/-TU	20 kg	9 l
Agregado:		
0 – 4 mm con 4% humedad inherente (60%)	967 kg	358 l
4 – 8 mm con 2% de humedad inherente (40%)	791 kg	293 l
Agua agregada (A/C = 0.47)	155 kg	155 l
Vacíos de aire (4.5%)		45 l
Fibras de acero	40 kg	5 l
Concreto proyectado		1000 l
Densidad por m³	2398 kg	

Fuente: (Hofler, 2004)

Tabla 4.

Diseño de mezcla de hormigón lanzado vía húmeda flujo diluido

Mezcla de hormigón lanzado vía húmeda flujo diluido		
Cemento	400 kg	127 l
Agregado		
0 – 4 mm con 4% humedad inherente (50%)	891 kg	330 l
4 – 8 mm con 2% de humedad inherente (50%)	891 kg	330 l
Agua agregada (A/C = 0.47)	168 kg	168 l
Vacíos de aire (4.5%)		45 l
Concreto proyectado		
Densidad por m³	2350 kg	

Fuente: (Hofler, 2004)

El diseño para una mezcla húmeda con aire incorporado debe cumplir con los requisitos de la normativa ACI 506.5R-09 que se indica en la Tabla 5.

Tabla 5.

Constituyentes de la mezcla húmeda con aire incorporado

	Constituyentes	Mezcla Húmeda de Hormigón Proyectado con Aire Incorporado		
		Hormigón Proyectado Normal	Con Humo de Sílice	Con Fibras y Humo de Sílice
ACI-506.5R-09	Agua	300 lb/yd ³ (180 kg/m ³)	300 lb/yd ³ (180 kg/m ³)	300 lb/yd ³ (180 kg/m ³)
	Cemento	675 lb/yd ³ (400 kg/m ³)	605 lb/yd ³ (360 kg/m ³)	605 lb/yd ³ (360 kg/m ³)
	Humo de Sílice	—	70 lb/yd ³ (40 kg/m ³)	70 lb/yd ³ (40 kg/m ³)
	Arena	2100 lb/yd ³ (1250 kg/m ³)	2100 lb/yd ³ (1250 kg/m ³)	2100 lb/yd ³ (1250 kg/m ³)
	Agregado Grueso (Máximo 3/8 dentro. [9.5 mm])	840 lb/yd ³ (500 kg/m ³)	840 lb/yd ³ (500 kg/m ³)	800 lb/yd ³ (475 kg/m ³)
	Fibras de Acero	—	—	85 lb/yd ³ (50 kg/m ³)
	Aditivo Incorporador de Aire	8 fl oz/yd ³ (0.3 L/m ³)	8 fl oz/yd ³ (0.3 L/m ³)	13 fl oz/yd ³ (0.5 L/m ³)
	Aditivo Reductor de Agua	40 fl oz/yd ³ (1.5 L/m ³)	40 fl oz/yd ³ (1.5 L/m ³)	40 fl oz/yd ³ (1.5 L/m ³)
	Alto Rango de Agua Reductor de la Mezcla	—	26 fl oz/yd ³ (1.0 L/m ³)	40 fl oz/yd ³ (1.5 L/m ³)
	Asentamiento antes de la Proyección	3 a 5 dentro. (75 a 125 mm)	3 a 5 dentro. (75 a 125 mm)	3 a 5 dentro. (75 a 125 mm)
	Contenido de Aire antes de la Proyección	7 a 10%	7 a 10%	7 a 10%

Fuente: (Pacheco, 2012)

2.4.2. Diseño de hormigón lanzado por vía seca

En el diseño de la mezcla del hormigón lanzado vía seca, la elección del tipo de cemento y su contenido, tipo de agregado, contenido de agua y cantidad de aditivos, depende de ciertos parámetros y especificaciones de resistencia temprana, la necesidad de disminuir la generación de polvo y rebote. Los agregados deben ser previamente ensayados y satisfacer los requerimientos de humedad inherente entre 2% y 5%, caso contrario se debe obtener a través de instalaciones especiales (Hofler, 2004). El diseño de mezcla de hormigón lanzado vía seca se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Diseño de mezcla de hormigón lanzado vía seca

Mezcla de hormigón lanzado vía seca	
Cemento	288 kg
SikaFume® - HR / - TU	20 kg
55% 0 – 4 mm con 4% de humedad	aprox. 680 kg
45% 4 – 8 mm con 2% de humedad	aprox. 560 kg
Humedad de la mezcla seca m ³	aprox. 1540 kg
Contenido de cemento Por cada 1000 l de mezcla seca, se agregan 280 kg de cemento a 800 l de agregado Por cada 1250 l de mezcla seca, se agregan 350 kg de cemento a 1000 l de agregado	
1 m³ de concreto proyectado en la pared da: Acelerado con Sigunit®AF Polvo (rebote 16 – 20%) 0.58 – 0.61 m ³ Acelerado con Sigunit®AF Líquido (rebote 20 – 25%) 0.55 – 0.58 m ³ Contenido de cemento en el concreto proyectado es aprox. 450 kg/m ³	

Fuente: (Hofler, 2004)

2.4.3. Materiales constituyentes

Los materiales constituyentes para la dosificación de la mezcla del hormigón proyectado, deben cumplir con las especificaciones necesarias para conseguir la resistencia, compactación, durabilidad y trabajabilidad requeridas para el diseño, así como el proceso y orden de cada uno de ellos para conseguir que la calidad del producto final sea óptima. Se deben realizar ensayos previos de los materiales a emplear.

El hormigón proyectado por mezcla seca o mezcla húmeda, debe cumplir con lo estipulado en ACI 506R-05 Guide to Shotcrete, ACI 506.2-95 Specification for Shotcrete y ACI 506.5R-09 Guide for Specifying Underground Shotcrete.

1. Cemento

En nuestro medio para hormigón lanzado se dispone permanentemente de cemento portland, que debe cumplir la norma INEN 152:2012 y estar conforme a ASTM C150.

El cemento es el aglomerante hidráulico más empleado para hormigones estructurales, se define a partir de su composición y características químicas y físicas. El compuesto principal del cemento es el clinker portland y es determinante en el comportamiento del hormigón proyectado en el proceso de puesto en obra, en estado fresco y endurecido.

Normalmente se recomienda que los cementos a utilizar en los morteros u hormigones proyectados sean del Tipo I, además se ocupan cementos de aluminato de calcio o cemento de alta alúmina, son de hidratación rápida que se utiliza principalmente para aplicaciones de refractarios. Se requiere cementos resistentes a sulfatos (sulforesistente) en casos especiales, por ejemplo: hormigones expuestos a la acción de suelos o aguas subterráneas con una alta concentración de sulfatos (ACI 506R-05, 2005).

2. Agua de mezclado

El agua de amasado debe cumplir los requisitos de composición y desempeño establecidos en la norma INEN 2617:2012 y conforme a los parámetros de ASTM C1602/C1602M.

El agua para curar y mezclar debe ser limpia, potable y libre de sustancias que pueda dañar al hormigón o al acero (ACI 506.5R-09, 2009).

Debido a la posibilidad de uso de fibras metálicas, a través de muestras también deben ser controlados los siguientes parámetros (Aetos, 2014):

- Exponente de hidrógeno pH
- Hidratos de carbono
- Ion de cloruro menor a 3 g/l
- Sustancias orgánicas solubles en éter menores a 15 g/l

- Sulfatos menor a 5 g/l

En caso de no disponer agua potable, se debe verificar por medio de cubos que la resistencia a la compresión sea de al menos al 90% en comparación a la mezcla con agua destilada. Los valores máximos de ion de cloruro en el agua por porcentaje de peso son 0.06 para hormigón reforzado, 0.15 para hormigón expuesto a cloruro, 1.0 para hormigón seco o protegido a la humedad, otros 0.3. El agua de curado también debe estar libre de impurezas y no debe ser menor a los 10°C (ACI 506R-05, 2005).

3. Agregados

Los áridos son el material granular formado por: arena, grava, piedra triturada o escoria de altos hornos de hierro. Son utilizados como un cementante para elaborar hormigón o mortero de cemento hidráulico y ocupan la mayor parte del volumen por lo que las propiedades de los mismos tienen influencia definitiva sobre el comportamiento del hormigón.

Los factores más importantes en los áridos son: distribución granulométrica, humedad natural y absorción de los áridos, coeficientes de desgaste y forma de los áridos (Aetos, 2014). Además deben cumplir con los siguientes requisitos:

- INEN 694:2010 Hormigón y áridos para elaborar hormigón.
- INEN 696:2011 Análisis granulométrico en los áridos, finos y grueso.
- ASTM C33-07 Especificación normalizada de agregados para Concreto.
- ASTM C330-05 Especificación normalizada para agregados livianos para concreto estructural.

Los áridos se clasifican en función a la densidad de los materiales y de acuerdo al tamaño de las partículas en finos y gruesos (INEN 694:2010, 2010):

Árido fino: Material que pasa por el tamiz de 4.75 mm (N°4) y es retenido en el tamiz de 75 μ m (N° 200).

Árido grueso: Es la fracción mineral en que la mayor parte de sus partículas quedan retenidas en el tamiz de 4.75 mm (N°4).

Estarán compuestos de partículas limpias, resistentes y de una calidad uniforme. Su forma redondeada o cúbica no contendrá más del 15% de partículas planas. El empleo de áridos finos o gruesos, o una mezcla, es de acuerdo con el espesor a aplicar en el hormigón proyectado (Rey A. , 2006).

Los agregados tienen diferentes funciones entre las cuales destacan (Hofler, 2004):

- Parámetros que determinan el requerimiento de agua.
- Consecución de propiedades mecánicas (resistencias).
- Fuerte influencia en la manejabilidad de la mezcla.
- Alta influencia en la durabilidad requerida.

4. Aditivos

Los aditivos permiten acelerar el fraguado rápido, disminuir los espesores y reducir las cantidades agua. Se utilizan con frecuencia en proyectos donde existan filtraciones de agua y son ideales para trabajos en altura (ACI 506R-05, 2005).

Los aceleradores de fraguado para hormigón proyectado incluyen diferentes grupos químicos en relación al hormigón convencional, por lo tanto se generan distintos efectos (ICH, 2015). Los reductores de agua, retardantes y controladores de la hidratación deben estar conformes a los requisitos de ASTM C1141 (ACI 506.5R-09, 2009).

Existen varias clasificaciones según los códigos internacionales, los aditivos químicos a ser agregados a mezclas para concreto (Tabla 7.), se clasifican según (ASTM C-494, 2005):

Tabla 7.

Aditivos químicos en mezclas de hormigón

ADITIVOS	TIPO
Reductores de agua	A
Retardadores	B
Aceleradores	C
Reductores de agua y retardadores	D
Reductores de agua y aceleradores	E
Reductores de agua de alto rango	F
Reductores de agua de alto rango y retardadores	G
Aditivos de comportamiento específico	S

5. Refuerzos

Las fibras para hormigón proyectado se clasifican de acuerdo al tipo de material en (ASTM C-1116, 2015):

1. Tipo I: Fibras de acero inoxidable, de aleación o al carbón.
2. Tipo II: Fibras de vidrio resistentes a los álcalis.
3. Tipo III: Fibras sintéticas (polipropileno).
4. Tipo IV: Fibras naturales (de origen como coco, madera, yute).

Las fibras con resistencia a la tracción, homogéneamente distribuidas confieren gran ductilidad y tenacidad al hormigón que puede llegar a ser considerable en la medida en que sea elevada la resistencia misma de las fibras y su cantidad. Por otro lado, constituyen una micro-armadura eficaz para contrastar el fenómeno de la fisuración por retracción (Gallovich, 2007).

Las fibras de acero varían de 20-70 kg/m³ y su tamaño está comprendido entre 30-40 mm. También existen fibras sintéticas, las más empleadas son de polipropileno, su tamaño varía de 25 a 50 mm. (ACI 506R-05, 2005). Ver Figura 5.

Para taludes revestidos con hormigón lanzado, como en un hormigón reforzado normal, se emplea el acero de refuerzo para resistir esfuerzos estructurales o de temperatura. Por lo general, se usa una tela de malla electrosoldada, cuyo peso, diámetro, separación y tipo, dependen de los requerimientos peculiares en cada caso y son fabricadas según la norma ASTM A497-A01.

La malla electrosoldada debe ser de acero corrugado con dimensiones según el diseño, fabricado con acero grado 70 como mínimo y de acuerdo con la especificación AASHTO M-55-81. Además, debe asegurarse una malla con pines de acero No.3, con una longitud no menor de 75 cm para mantenerla en posición mientras se coloca el concreto lanzado (Véliz, 2009).

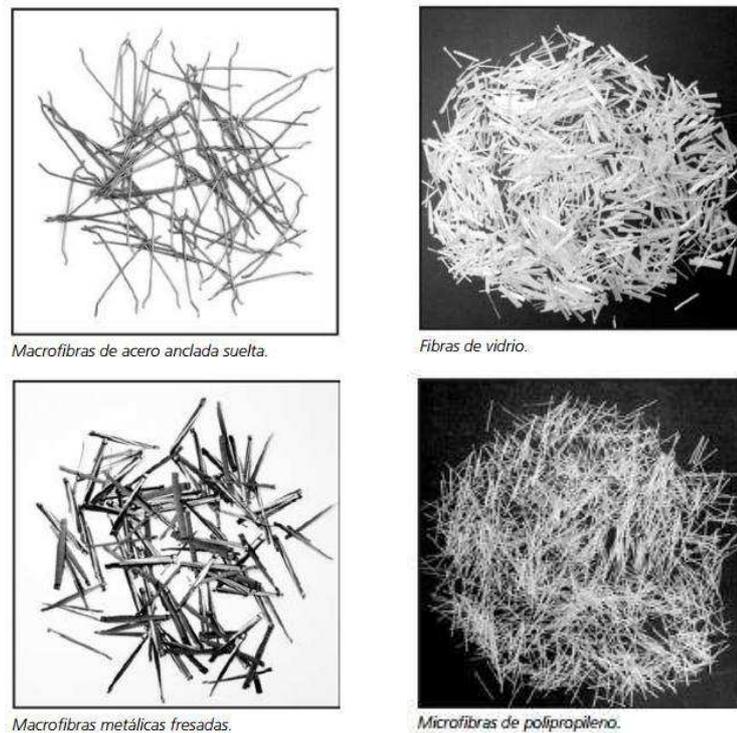


Figura 5. Fibras de acero convencional

Fuente: (Gallovich, 2007)

2.5. Anclajes

Los anclajes determinan un sistema constructivo que ofrece soporte y son elementos capaces de transmitir una carga de tracción al terreno. Los anclajes pueden ser barras de acero huecas o macizas y de cables de acero (Artur, 2001). Son elementos de diámetros pequeños, que se introducen al terreno a través de una perforación que es rellenada parcialmente con una lechada o mortero de cemento. Ver Figura 6.

En general los sistemas de anclajes se dividen, según el nivel de carga inicial, en activos y pasivos. A los primeros se les somete a una carga de tesado, después de su instalación, mientras que a los segundos se les deja con una carga inicial baja (AETESS, 2001).

Según su vida de servicio se los puede clasificar en anclajes temporales y anclajes fijos. La diferencia radica en su vida de servicio que puede ser de 18 a 36 meses para los temporales y de 75 a 100 años para los fijos que además, requieren un sistema de protección anticorrosivo.

2.6. Lloraderos

Los deslizamientos o daños que ocurren ocasionalmente en taludes se deben en la mayor parte de los casos, a la sobrecarga del suelo o por un aumento en el contenido de agua en los materiales que lo conforman. En este último caso, la presión hidrostática que genera el agua acumulada producida por las lluvias intensas, aumenta la posibilidad de erosión interna en los taludes. Para evitar este fenómeno se realizan perforaciones de pequeñas longitudes en las cuales se colocan tuberías de polietileno o PVC, generalmente en diámetros 2 o 3" (Suarez, 2015). Ver Figura 6.

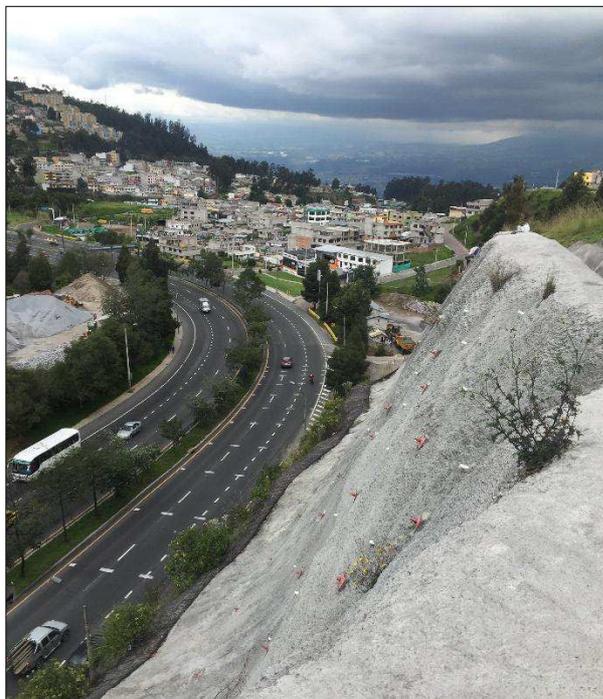


Figura 6. Anclajes pasivos y lloraderos en taludes de corte

2.7. Espesores y resistencias mínimas recomendadas

Un mínimo grosor es normalmente necesario para un sistema de soporte de suelo igual al indicado en los planos y citado en las especificaciones del contrato. También puede ser requerido para proteger el acero de refuerzo de corrosión o para protección de fuego (ACI 506.5R-09, 2009).

La fuerza de compresión en la mezcla vía seca, puede ser entre 40-50 Mpa y para la mezcla húmeda varía entre 30-50 Mpa. La fuerza de enlace del hormigón con la superficie, generalmente es de 1 Mpa (ACI 506R-05, 2005).

Aetos, la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas y representante de la International Tunneling Association (ITA), establece un sistema de nomenclatura que define los diferentes hormigones proyectados:

Según la composición de adiciones de refuerzo (fibra), se clasifican en:

- HMP: Hormigón en masa proyectado, sin fibras ni elementos auxiliares.
- HRP: Hormigón reforzado proyectado, cuando contenga algún tipo de fibra, o en su estado final exista algún elemento de refuerzo.

Según el uso o funciones al que va destinado se distinguen tres categorías:

- I: Hormigón proyectado sin función estructural. Se utilizan como capa de relleno de pequeñas cavidades, sellado, regularización y protección.
- II: Hormigón proyectado con función estructural. Se utilizan como sostenimiento primario.
- III: Hormigón proyectado (con función estructural o no). Se utilizan como revestimiento definitivo y hormigones para reparación.

Con base en las variables antes mencionadas, se recomienda adoptar los valores de referencia según el tipo de hormigón que se indican en la Tabla 8.

Tabla 8.

Espesor y resistencias mínimas de diseño recomendadas

Tipo HMP/HRP	Espesor mínimo y tolerancia (mm)	Resistencia mínima (Mpa)	Resistencia recomendada (Mpa)
I	30 ± 15	20	25
II	40 ± 15	25	30
III	50 ± 10	30	>30

Fuente: (Aetos, 2014)

2.8. Fabricación del hormigón lanzado in situ

La preparación de la mezcla del hormigón proyectado necesita realizarse preferentemente en una planta con mezcladora, a ser posible de eje vertical (Figura 7). Las exigencias técnicas y las características de sostenimiento obligan una mezcla de los materiales homogénea, sobre todo en la incorporación de las adiciones. Si por motivos especiales se realiza en plantas dosificadoras, sin mezcladora, los tiempos de amasado y la incorporación de las adiciones deben garantizar un producto homogéneo (Rey A. , 2006).

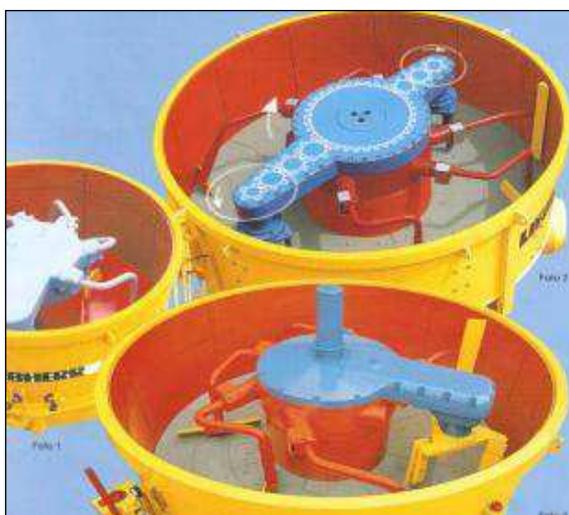


Figura 7. Amasadora con eje vertical

Fuente: (Monter, 2012)

El tiempo y el orden de mezclado de los componentes se deben ajustar a la optimización estudiada, considerando que la temperatura de la mezcla tras la carga debe estar entre 10 y 25 °C. Se deben mezclar siempre los componentes de mayor a menor peso, por lo que el orden usual será el siguiente (Aetos, 2014):

- Áridos finos o arenas
- Áridos gruesos o gravilla
- Cemento y adiciones
- Agua
- Aditivos

Habitualmente para el transporte del hormigón se usan mezcladores limpios, sin restos de hormigón y sin agua en su interior, de tal manera que no se reduzca la calidad del producto. Si se utiliza otro medio (contenedores), el hormigón debe ser re-agitado antes de la proyección (Aetos, 2014).

Las mezclas por vía húmeda se deben proyectar dentro de 45 minutos desde su fabricación, si la temperatura es muy alta el tiempo máximo es 15 minutos. Sin embargo, como consecuencia de un retraso es necesario demorar el proceso de proyección, se deben considerar las recomendaciones del fabricante (ACI 506R-05, 2005).

Un “método” tan utilizado en el sostenimiento de túneles y taludes como es el hormigón proyectado, necesita instalaciones bien estudiadas que permitan desarrollar una mezcla y un transporte adecuado según las normas establecidas y conseguir los resultados requeridos (Rey A. , 2006).

2.9. Preparación de la superficie del talud

El sistema de hormigón proyectado precisa una preparación de la superficie, según como sea el soporte. En líneas generales se deberá hacer siempre mediante la humectación del soporte para conseguir unas condiciones óptimas de adherencia y retirar los restos de materiales sueltos evitando la creación de falsas zonas.

Antes de proyectar el hormigón, se deben llevar a cabo las siguientes operaciones y cumplir los siguientes parámetros (ACI 506R-05, 2005):

- **Superficie de tierra:** No debe ser colocado si el suelo es esponjoso o si se encuentra congelado. Debe mojarse la superficie con anticipación para prevenir un derrumbe del hormigón en lugares donde existen filtraciones, se debe canalizar dichas filtraciones antes de realizar la proyección o bien proceder a su sellado.
- **Superficie de acero:** Todo material suelto, pintura u otro contaminante debe ser retirado de la superficie, se ocupa agua a alta presión para el retiro de contaminantes que puedan inhibir la unión.
- **Superficies de hormigón:** Retirar todo el material suelto, las imperfecciones o parte de hormigón contaminado, se debe evitar los cambios bruscos de grosor en caso de ser una reparación.
- **Superficie de roca:** Se deben quitar todo el material suelto existente y se debe humedecer antes de colocar el hormigón.

2.10. Colocación y control de calidad del hormigón in situ

2.10.1. Colocación de armaduras

Se pueden denominar como fijaciones ligeras los sistemas normalmente utilizados de fijación de mallas. En obras de ingeniería, como túneles, muros y taludes es necesario la fijación de la armadura por medio de sistemas pesados, como bulones, barras o anclajes (Rey A. , 2006). En la mayoría de

los casos la malla se fija al talud mediante anclajes cortos, formando una cuadrícula con separación previamente determinada.

El hormigón debe ser lo suficientemente plástico y proyectado con una velocidad tal que el hormigón puede esparcirse correctamente a través del refuerzo (ACI 506.2-95, 1995). Se utiliza piezas especiales en las zonas especificadas en los planos del proyecto según las características y las calidades detalladas con la finalidad de anclar, espaciar o apoyar el acero de refuerzo del hormigón proyectado.

2.10.2. Colocación de la mezcla de hormigón

A pesar de las técnicas que se especifican en cada sistema (húmeda y seca), el operador debe cumplir los requisitos para una aplicación apropiada, estos son descritos en ACI 506R y tendría que ser seguido como requerimiento básico de todo proyecto por medio de hormigón lanzado.

La colocación de la mezcla del hormigón tanto en climas cálidos como en climas fríos, presenta ciertas limitaciones en cuanto a condiciones climáticas (ACI 506.2-95, 1995):

- No se puede realizar la colocación cuando la temperatura del material es sobre 32° C y por vía seca si la temperatura es mayor a 38° C.
- Si la temperatura esta sobre 4,5°C y sigue aumentando a los 10°C, se puede ejecutar la proyección.

A continuación se detallan los parámetros más representativos involucrados en la aplicación del hormigón proyectado (ACI 506.5R-09, 2009):

Condiciones para la proyección

Las plataformas deben ser seguras y adecuadas para las máquinas y bombas de modo que el operador pueda acceder al área de trabajo en condiciones óptimas. Dependiendo en la complejidad, adicionalmente se requiere soportes bajo tierra en donde el sustrato es de mala calidad.

Limpieza del sustrato

Las áreas adyacentes a la superficie de recibir el hormigón y el sustrato deben ser limpias. Se deben tomar precauciones para impedir el rebote o residuos en el área de trabajo.

Ventilación

Se consideran las precauciones pertinentes para impedir que el viento o agua influyan en la calidad del trabajo, sustrato o superficie acabada.

Control de grosor

El ancho de espesor y la tolerancia deber ser igual al mostrado en los dibujos de proyecto y citado en las especificaciones de contrato.

2.10.3. Técnicas de colocación

Es fundamental mantener la tobera enfrentada ortogonalmente a la superficie y en los rincones debe apuntar en forma directa con un ángulo de 45° (ACI 506.2-95, 1995).

El ángulo de incidencia sobre la superficie influye en la cantidad de rebote y en la calidad del producto final, una oblicuidad pronunciada en el ángulo de incidencia, crea mayor pérdida de material. La velocidad con que

sale proyectado el material desde la tobera debe ser entre 30-50 m/s (Aetos, 2014).

La distancia óptima a la que debe mantenerse la boquilla de la superficie soporte es de 1-2 m (Figura 8), el espesor especificado puede requerir de dos o más capas por nivel para disminuir el desprendimiento (UNE-EN 14487-2, 2008).

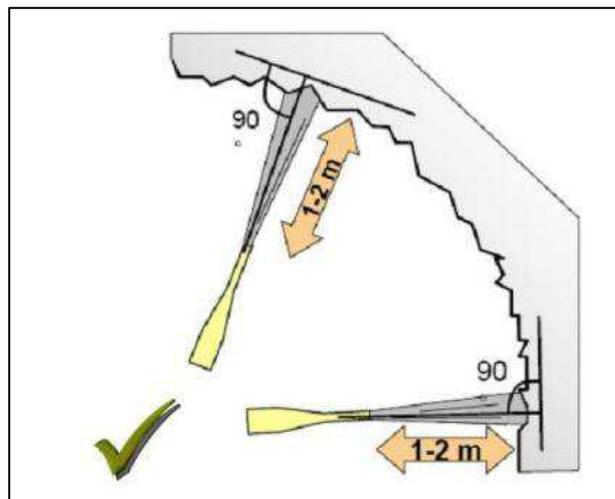


Figura 8. Inclinación y distancia óptima de la boquilla al paramento

Fuente: (Aetos, 2014)

Primero se debe rellenar todos los desniveles y quiebres que existan, zonas de debilidad tales como fallas, fisuras, zonas de grava y partes blandas si corresponde (este proceso se limita normalmente a superficies de roca o suelo). La proyección debe comenzar desde las secciones inferiores y moverse metódicamente hacia arriba. Ver Figura 9.

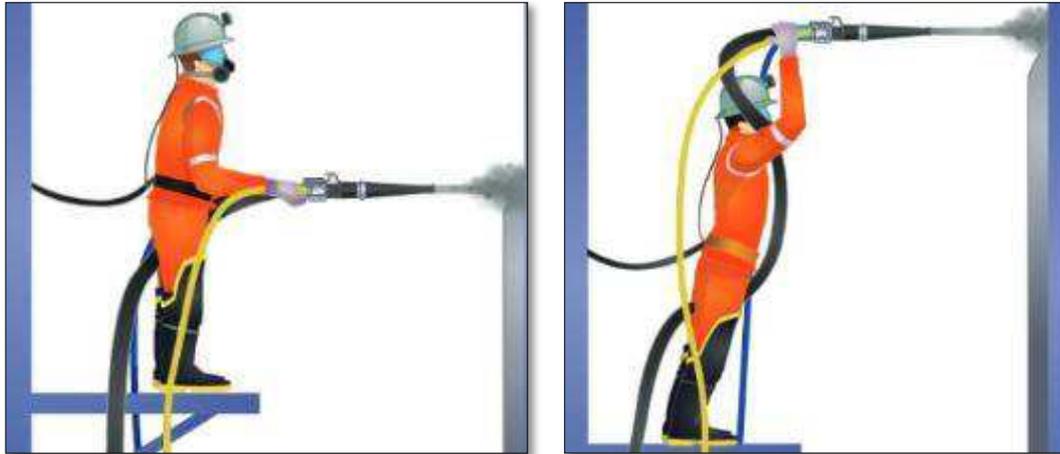


Figura 9. Aplicación de shotcrete manual de forma metódica

Fuente: (ICH, 2015)

2.10.4. Rebote

Los factores que influyen principalmente en la cantidad de rebote producido son (Aetos, 2014):

- Ángulo entre la boquilla y el sustrato: Es importante mantener la boquilla en ángulo recto respecto a la superficie del sustrato.
- Dosificación de acelerante: El porcentaje de rechazo disminuye con el uso de cantidades ajustadas de acelerante de fraguado.
- Zona de aplicación: El rebote será considerablemente mayor a medida que la superficie sobre la que se proyecte pierda verticalidad y se sitúe en desplome.
- Distancia de la boquilla al sustrato: Con una velocidad constante, la distancia condiciona la fuerza del impacto.

2.10.5. Control de calidad

El control de calidad es una combinación de acciones y decisiones en cumplimiento de los controles y especificaciones para que se cumplan los requisitos que se indican a continuación (ACI 506.2-95, 1995):

2.10.5.1. Pre-construcción de testigos

Se deben preparar los testigos de paneles de pre-construcción para ser examinados por el arquitecto/ingeniero antes de la colocación del hormigón proyectado. En la elaboración de los testigos la mezcla deberá cumplir con la dosificación, incorporar los mismos refuerzos y con la misma separación que en el trabajo requerido, luego obtener seis testigos, tres con refuerzos y tres sin refuerzos.

Grados de los núcleos de testigos

- 1. Grado 1:** Las muestras son sólidas, no hay láminas, zonas arenosas o huecos de aire no mayores a 1/8 in y de longitud 1/4 in, detrás de los refuerzos de acero no pueden haber bolsas de arena o huecos.
- 2. Grado 2:** Las muestras no tendrán más de 2 láminas o zonas de arena con dimensiones que excedan 1/8 in de espesor y 1 in de largo. El ancho, altura y profundidad de los huecos no debe superar las 3/8 in, las áreas porosas detrás del acero no deben superar la 1/2 in.
- 3. Grado 3:** Las muestras no tendrán más de 2 láminas o zonas de arena con dimensiones que excedan 3/16 in de espesor y 1-1/4 in de largo. Las bolsas de arena o vacíos, no deben exceder las 5/8 in de espesor y 1-1/4 in de ancho.
- 4. Grado 4:** Puede tener una falla con una dimensión máxima de 1 in perpendicular a la cara del núcleo, con un ancho máximo de 1-1/2 in.

Contiene vacíos que debido al excesivo rocío de hormigón que pueden alcanzar una profundidad de 1/8 in.

- 5. Grado 5:** Si no cumple las condiciones del núcleo 4 y es de peor calidad se clasificará como de grado 5.

Se determinará el grado (Figura 10.) del hormigón proyectado correspondiente a la zona en análisis por el promedio de al menos tres testigos.

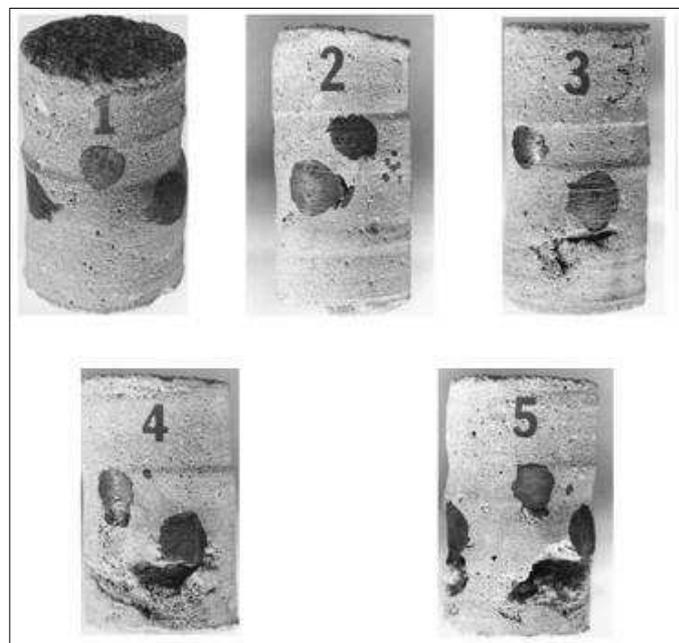


Figura 10. Grados de los núcleos de testigos

Fuente: (ACI 506.2-95, 1995)

Criterio de rechazo de muestras, por graduación

La partida en análisis será rechazada si su graduación promedio resulta ser mayor o igual a 2,5 o si uno de los testigos posee un grado mayor que 3.

2.10.5.2. Construcción de testigos

Se debe producir un panel para cada mezcla y cada día de trabajo o para 50 m³ colocados, el panel de ensayo se debe mantener húmedo hasta que se traslade a las pruebas de laboratorio, alrededor de los 24°C.

La resistencia media a la compresión de una serie de 3 núcleos deberá ser igual o superior a 0,85f'c, y ninguno de los núcleos deberá ser menor a 0,75f'c. La media de tres cubos debe ser igual o superior a f'c y cada cubo no debe ser menor que 0,88f'c. Los resultados de prueba de la construcción indican si el hormigón está conformado según a las especificaciones del proyecto y para darle la aceptación o rechazo a la mezcla antes de la proyección.

2.11. Durabilidad y comportamiento del revestimiento

La durabilidad es una propiedad del hormigón, es indispensable que tenga la capacidad y calidad para resistir las condiciones de exposición y servicio a que está sometida. El ACI 201.2R (2001) la define como: la capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente.

Entre los diversos factores de carácter no estructural que suelen ocasionar el deterioro prematuro del concreto, por su frecuencia e importancia de los efectos en la durabilidad, se encuentran los siguientes: ataque por sulfatos, corrosión del acero de refuerzo, ciclos de congelación y deshielo, reacción álcali – agregado, abrasión y el taque por sustancias ácidas (Ottazzi, 2004).

Considerando el hormigón lanzado como un revestimiento, se presta especial atención a los efectos generados por los agentes atmosféricos con el fin de preservar su función a lo largo de la vida útil.

Por su parte el ACI (2001) American Concrete Institute – Guía para la durabilidad del hormigón, contiene un apartado especial referido a las recomendaciones de durabilidad. Los hormigones expuestos a una combinación de humedad y ciclos de congelamiento exigen lo siguiente:

- Diseño de la estructura
- Baja relación A/C (máximo 0.50)
- Adecuada incorporación de aire
- Materiales de buena calidad
- Curado
- Prácticas constructivas

El diseñar una estructura por durabilidad contribuye ventajas técnicas y económicas. Permite que la estructura tenga un mejor desempeño ante sus condiciones de servicio y minimiza rubros, entre los principales destacan (Hernández, 2006):

- Mejor desempeño y conservación ante las condiciones de servicio
- Mayor vida útil
- Menor valor presente de costo de la construcción y de sus costos de mantenimiento
- Menores costos de reparaciones

2.12. Equipos y herramientas

2.12.1. Equipo para mezcla en seco

Los equipos para hormigón proyectado de mezcla en seco se pueden dividir en dos tipos, ya sean máquinas de cámara simple o doble y máquinas de alimentación continua o rotatoria (ICH, 2015):

Máquinas de cámara simple o doble

Las máquinas de una sola cámara tienen un funcionamiento discontinuo, operan colocando el material en la cámara, esta se cierra y se presuriza con aire haciendo que el material se introduzca en el tubo de descarga y las máquinas de doble cámara permiten una operación más continua mediante el uso de la cámara superior como una compuerta de aire durante el ciclo de alimentación de material. Ver Figura 11.

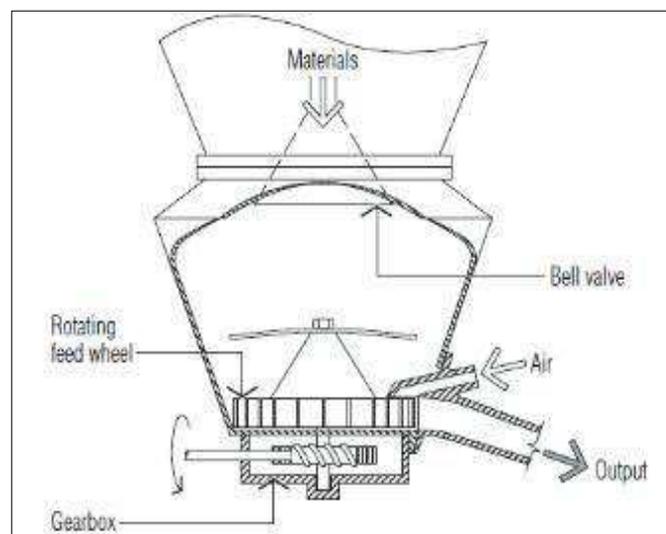


Figura 11. Equipo de bombeo para shotcrete vía seca de doble cámara

Fuente: (ICH, 2015)

2.12.2. Equipo para mezcla húmeda

Los equipos de hormigón lanzado para mezcla pueden ser de desplazamiento positivo o máquinas neumáticas. Las máquinas de desplazamiento positivo forman la mayor parte del mercado y pueden ser de pistones propulsados hidráulica o mecánicamente (Figura 12.), o también pueden ser bombas de compresión de tipo peristáltico.

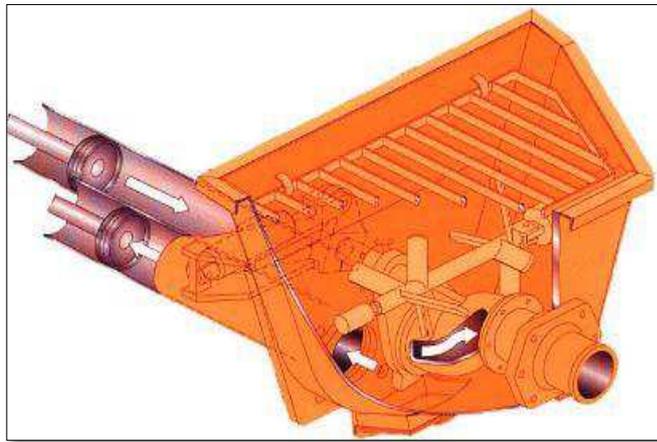


Figura 12. Detalle de bombeo con desplazamiento positivo por pistón

Fuente: (ICH, 2015)

2.12.3. Equipos auxiliares

Bombas y sistemas de dosificación de acelerantes

El tipo de bomba es importante debido a la necesidad de tener un volumen de alimentación regular y preciso. Típicamente los dos tipos de bombas utilizadas para lograr esto son bombas “del tipo mono” o bombas peristálticas. La capacidad de la bomba de dosificación también es importante, ya que puede ser necesaria una tasa de hasta el 10% del contenido de cemento por metro cúbico de hormigón proyectado.

Boquillas

El diseño de la boquilla es importante ya que afecta la compactación del hormigón proyectado, el rebote durante la proyección y la consistencia de la mezcla cuando la proyección es en seco. En la mayoría de los casos la mezcla del acelerador se produce en la boquilla de hormigón proyectado y hace más relevante sus características y su mantenimiento o reemplazo en caso de desgaste. Ver Figura 13.

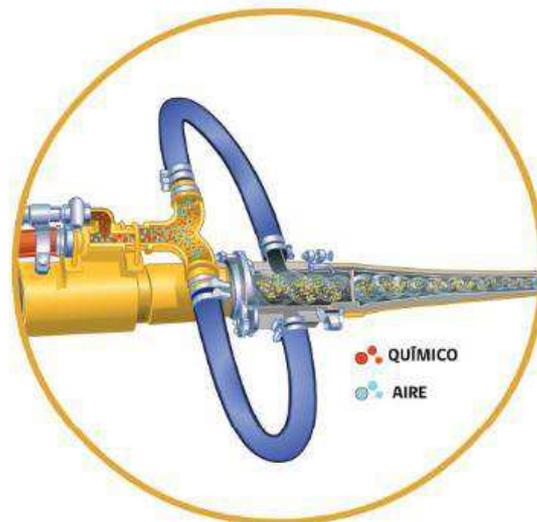


Figura 13. Detalle de la función de la boquilla

Fuente: (ICH, 2015)

Equipos de control remoto

Los equipos de proyección de hormigón con mando a distancia se utilizan para mejorar la seguridad y la productividad de los operadores, debido a que mantienen al operador alejado del suelo sin soporte, reducen al mínimo la exposición al rebote y permiten el acceso a zonas difíciles.

2.13. Sistemas de seguridad, salud y ambiente

2.13.1. Riesgos afines con la aplicación de hormigón proyectado

El trabajo en obra del hormigón proyectado contempla múltiples riesgos, derivados del uso de equipos pesados y en movimiento, las líneas de alta presión (aire, agua y materiales) y la producción del rebote de proyección, los cuales se pueden reducir con el uso de equipos mecanizados de proyección. Deben trabajar a una distancia segura (Figura 14.) y utilizar equipos de protección, tales como gafas, máscaras para el polvo o respiradores, camisas de manga larga para proteger contra las quemaduras de cemento, protección para los oídos, entre otros (Aetos, 2014).

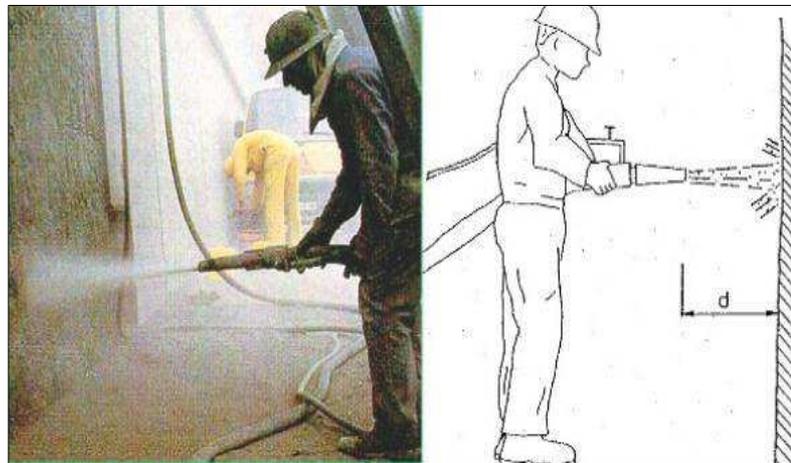


Figura 14. Medidas de seguridad en la proyección de hormigón lanzado

Fuente: (Tolentino, 2015)

Se debe prestar cuidado a los requerimientos de seguridad e instrucciones de manipulación de los equipos y proveedores de materiales que facilitan los fabricantes. El personal implicado en la colocación del hormigón debe usar siempre los equipos de protección individual y asegurarse de que existe una ventilación apropiada en el lugar de trabajo ya que la puesta en obra del hormigón genera grandes cantidades de polvo, humo y contaminación del aire.

Aditivos químicos

Los aditivos, en especial los reductores de agua, así como los productos complementarios, se consideran en general inofensivos para los seres humanos, se recomienda el uso de acelerantes libres de álcali para cualquier aplicación. Dado que algunos acelerantes son levemente ácidos o corrosivos, se requieren envases de acero inoxidable o de plástico (Aetos, 2014).

2.13.2. Ambiente de trabajo

El área de trabajo en torno a la proyección debe quedar protegida del rebote, del polvo de cemento y del producto químico en suspensión, por todo ello se requiere el uso permanente de máscaras, respiradores y protección para ojos y oídos. Es necesaria la protección de la piel debido a la naturaleza irritante del cemento y los diversos productos químicos utilizados (ICH, 2015).

Cuando se trabaja con el sistema de vía seca las mediciones de polvo fino normalmente dan como resultado más de tres veces de la cantidad permitida (6 mg/m^3 de aire). Con la introducción del método de vía húmeda, las mejoras del ambiente de trabajo son evidentes y la cantidad de polvo fino está ahora normalmente por debajo del valor máximo tolerado (Aetos, 2014).

2.13.3. Medio ambiente

Las nuevas tecnologías de hormigón proyectado contribuyen a la protección del medio ambiente: menor consumo de energía, agua y formación de residuos. Deben reciclar o eliminar los restos y vertidos sin poner en peligro la salud humana y sin dañar el medioambiente, en especial (ICH, 2015):

- Poner en peligro el agua, aire, suelo, flora y fauna.
- Provocar ruidos u olores indebidos.

- Afectar negativamente al entorno o el paisaje.

2.14. Ensayos destructivos y no destructivos en el hormigón

Los ensayos en el hormigón tienen un papel relevante en la determinación de las características internas y externas del hormigón. A través de estos ensayos es posible obtener información del estado actual de las obras de ingeniería, especialmente de los taludes y crear hormigones de mayor calidad para cada situación que se requiera.

Los ensayos en el hormigón pueden ser de dos tipos:

- No destructivos: son los ensayos que permiten conocer la resistencia del hormigón sin afectar o destruir su estructura interna. La importancia de este ensayo reside en que se puede realizar inspecciones de obras en servicio.
- Destructivos: Se denominan ensayos destructivos a los que determinan la caracterización del hormigón por medio de la extracción y rotura de piezas o probetas de hormigón.

Nos centraremos primero en los ensayos no destructivos: ensayo esclerométrico, de ultrasonido y control de fisuras.

2.14.1. Ensayo esclerométrico (Martillo Schmidt)

Para determinar el índice esclerométrico en los taludes de hormigón revestido, se cumple el procedimiento detallado en la norma ASTM C 805 (Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete). Debido a su simplicidad y bajo costo, el dispositivo que se utiliza para el ensayo es el esclerómetro tipo Schmidt (Figura 15.), su valor de rebote "R" permite determinar la dureza del hormigón in situ.



Figura 15. Esclerómetro tipo Schmidt

Fundamento y descripción del método

Este método permite determinar el índice esclerométrico en el concreto endurecido, con el que se puede inferir la resistencia del hormigón. Sin embargo, tiene una exactitud no mayor a 20 o 25%, por lo tanto no es alternativo a los ensayos normales de compresión y no se puede emplear como base para la aceptación o rechazo del hormigón. Se emplea para supervisar rápidamente grandes áreas de hormigón, delimitar zonas de concreto pobre o deteriorado en las estructuras, evaluar la uniformidad del hormigón y estimar el desarrollo de resistencias in situ (I.N.V.E-413, 2007).

El equipo consiste en un vástago, a lo largo del cual se desliza una masa puesta en movimiento por un resorte. La masa golpea contra un retén del vástago, con una cierta energía que se transmite al hormigón, el que sufre una deformación elastoplástica (Figura 16.). Al recuperar el hormigón su deformación elástica, hace rebotar la masa, la misma que arrastra una aguja una escala graduada, donde se lee el índice esclerométrico o índice de rebote (Ercolani, 2007).

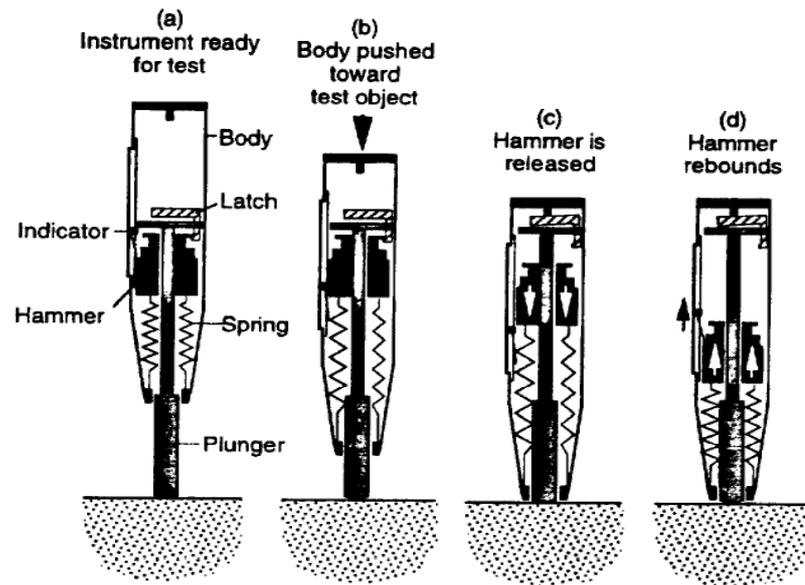


Figura 16. Principio de funcionamiento de martillo tipo Schmidt

Fuente: (Carino, 1997)

El informe del ACI 228 describe algunos de los factores que influyen directamente al número de rebote en el hormigón (ACI 228.1R, 1995):

- El contenido de humedad del hormigón superficial afecta al número de rebotes, una superficie seca da como resultado un mayor número.
- Aumenta el número de rebote una capa superficial de carbonatación en el hormigón o la concentración de árido grueso en la superficie.
- La textura de la superficie afecta al número de rebote, una superficie llana da valores más altos que una superficie de textura rugosa.

Procedimiento

Antes de realizar el ensayo, es necesario efectuar un reconocimiento visual de los puntos que se van a ensayar con el fin de identificar la presencia de huecos, fisuras y la rugosidad de la superficie.

El ensayo esclerométrico puede realizarse según ciertos parámetros, las principales según el Instituto Nacional de Vías son (I.N.V.E-413, 2007):

1. Plan de Muestreo

Para cada superficie en estudio se debe determinar previamente el número y distribución de acuerdo con el objetivo que se persigue.

2. Selección de la superficie a ensayar

Los elementos de hormigón por ensayar deben tener un espesor igual o mayor que 100mm y estar fijos dentro de una estructura. Se deben evitar las áreas atípicas que presenten texturas ásperas o alta porosidad, considerando que las áreas de ensayo tengan una misma terminación superficial.

3. Preparación de la superficie por ensayar

Se limita el área por ensayar creando una superficie cuadrada de al menos 200 mm por lado. En caso de observar superficies ásperas se deben emparejar con la piedra abrasiva o con mortero, si las superficies son lisas o allanadas se pueden ensayar sin pulir.

4. Ejecución

Se debe sujetar firmemente el martillo en una posición que permita golpear perpendicularmente la superficie (Figura 17.) y aumentar gradualmente la presión hasta que el martillo dispare. La posición normal de trabajo es horizontal, pero cuando se realicen golpes en otras posiciones, se deben hacer las correcciones de acuerdo a las correlaciones del fabricante.

El valor del rebote se descarta si el impacto causa trituración superficial. Se debe repetir la operación efectuando impactos uniformemente repartidos en la superficie de ensayo hasta completar 10 valores registrados.



Figura 17. Ejecución del ensayo esclerométrico

Cálculo

Según los requerimientos del ASTM C 805 es necesario seguir el procedimiento básico que se indica a continuación (ASTM C-805, 2002):

- Se debe descartar cualquier lectura que difiera en más de 7 unidades del promedio de los 10 valores registrados (distanciados entre si más

de 25 mm). Cuando se descarten más de dos valores registrados, se deben descartar todas las lecturas de la superficie de ensayo.

- Se calcula y registra el índice esclerométrico como el promedio de las lecturas no eliminadas.

El valor del índice de rebote se verá afectado por la posición del aparato que puede ser: horizontal, inclinado hacia arriba o hacia abajo, por lo tanto, la componente de la gravedad actuará de una manera favorable o desfavorable. Los fabricantes de aparatos acostumbran colocar las curvas de calibración como la mostrada en la Figura 18.

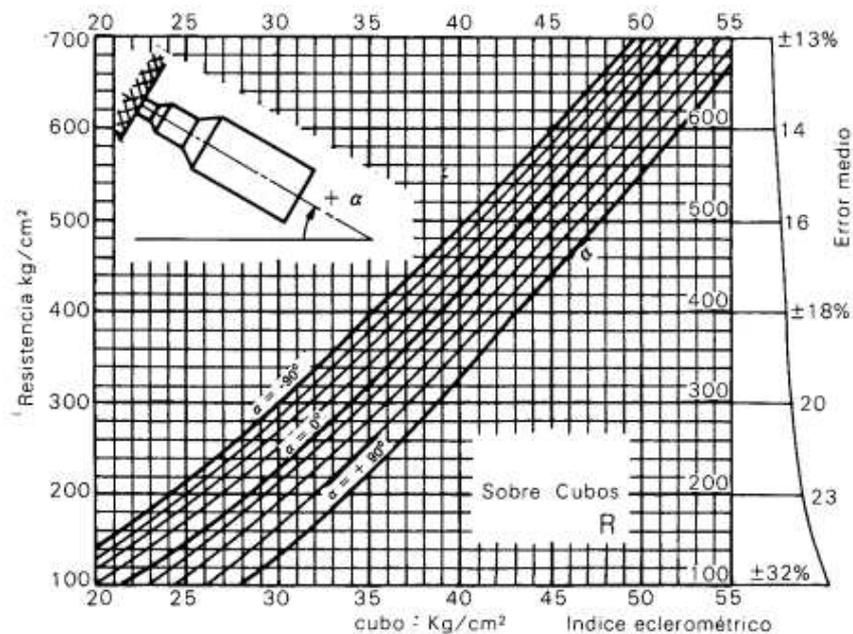


Figura 18. Relación entre el índice de rebote y la resistencia a compresión

Fuente: (Gomez, 2013)

2.14.2. Ensayo de ultrasonido

La norma ASTM C597-16 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete) especifica el método para la determinación de la velocidad de propagación de pulsos de ondas longitudinales de ultrasonidos a través del hormigón endurecido. Es un ensayo no destructivo aplicable

para la inspección de estructuras y para valorar la severidad del deterioro o del agrietamiento en el hormigón. También es aplicable para estimar la uniformidad y la calidad del hormigón (ASTM C-597, 2016).

Factores que afectan a los ultrasonidos

Los métodos ultrasónicos son afectados por algunos factores, entre los principales se encuentran (Pellicer, 2014):

- **Longitud del recorrido:** Debido a la heterogeneidad del hormigón es conveniente que el recorrido sea bien extenso. Para un mismo hormigón, se han encontrado diferencias de velocidad de propagación, al medir distintos espesores.
- **Contacto entre superficies y transductores:** Las superficies llanas en general no presentan problemas o se pueden eliminar utilizando una piedra de pulir. Por lo general, se suele colocar una película de vaselina entre el hormigón y transductor.
- **Humedad del hormigón:** La velocidad de propagación en el hormigón aumenta a medida que su contenido de humedad es mayor.
- **Armaduras metálicas:** Las armaduras afectan considerablemente las medidas de velocidad, debido a que en el acero la velocidad de propagación puede ser hasta 2 veces mayor que en el hormigón.

Además de los factores que afectan al ensayo de ultrasonido, es importante considerar las principales ventajas e inconvenientes del método, estos puntos son válidos para cualquier tipo de elemento sujeto a evaluación, como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9.

Ventajas y desventajas del ensayo de ultrasonido

Ventajas	Desventajas
No destructivo	Formación previa del operario
Ahorro económico, equipo empleado no costoso	Superficies rugosas son difíciles de examinar
Portabilidad	Se requiere curvas de calibración para estimar la resistencias
Capacidad volumétrica de la exploración	La operación manual requiere la atención cuidadosa
Alta sensibilidad, permite la detección de defectos pequeños	Necesidad de acoplantes
Mayor exactitud que otros métodos no destructivos	

Fundamento y descripción del método

El método consiste en la medición del tiempo que emplea un impulso ultrasónico (frecuencias mayores a 20 Khz.) al recorrer la distancia entre un transductor emisor y un transductor receptor. Un palpador electroacústico mantenido en contacto con la superficie del hormigón, emite impulsos de vibraciones longitudinales. Después de atravesar en el hormigón una trayectoria de longitud L, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por el segundo palpador, y circuitos electrónicos miden el tiempo de propagación del impulso (EN 12504-4, 2004). Ver Figura 19.

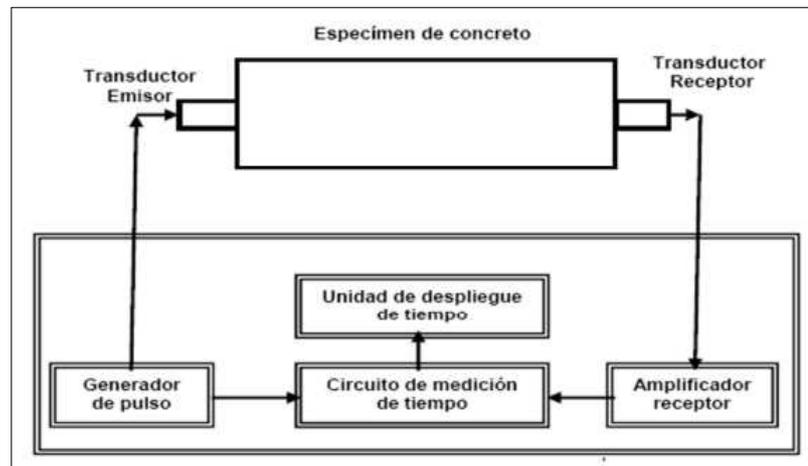


Figura 19. Principio de funcionamiento del aparato de ensayo

Fuente: (Vargas, 2012)

Definición de la onda emitida

Las ondas ultrasónicas necesitan un medio físico (cuerpo elástico) para propagarse, describiendo oscilaciones con diversas trayectorias según el tipo de energía mecánica aplicada, se clasifican en ondas longitudinales, ondas transversales y ondas de superficie (Fernández A. , 1994).

- **Ondas longitudinales:** producidas por la sucesiva compresión y expansión del medio elástico en el que se propagan. Se producen cuando la dirección de las partículas es paralela a la dirección de propagación de la onda.
- **Ondas transversales:** producidas por la vibración de las moléculas en sentido transversal a la propagación de la onda (perpendicular).
- **Ondas de superficie o de Raleigh:** son ondas transversales que se propagan solamente en la superficie del cuerpo elástico. Son paralelas a dicha superficie y disminuyen su amplitud con la profundidad del material.

Métodos de ensayos por ultrasonidos

Los ensayos no destructivos de ultrasonidos pueden realizarse con diferentes métodos, las principales según el libro “Ensayos no destructivos por ultrasonidos” de (Fernández A. , 1994):

- **Método de resonancia:** El ensayo consiste en variar la frecuencia de excitación de un cristal aplicado a una cara plana de una chapa hasta que se detecte la resonancia. Se utiliza para la medición muy precisa de espesores de chapas de superficies paralelas.
- **Método de transparencia o de sombra:** En este método el oscilador emisor genera un haz de ondas ultrasónicas que es recibido por otro oscilador receptor. Cuando disminuye la intensidad acústica, se puede deducir la magnitud del obstáculo interceptado.
- **Método de impulso eco:** Cuando un haz de ultrasonidos que se transmite por el interior de un objeto sólido encuentra una superficie exterior de fondo, se refleja casi en su totalidad que será captado por el oscilador receptor. Midiendo el tiempo de recorrido del haz y de su eco, podemos determinar la distancia a la que se encuentra un determinado reflector.

Procedimiento

1. Calibrar el equipo

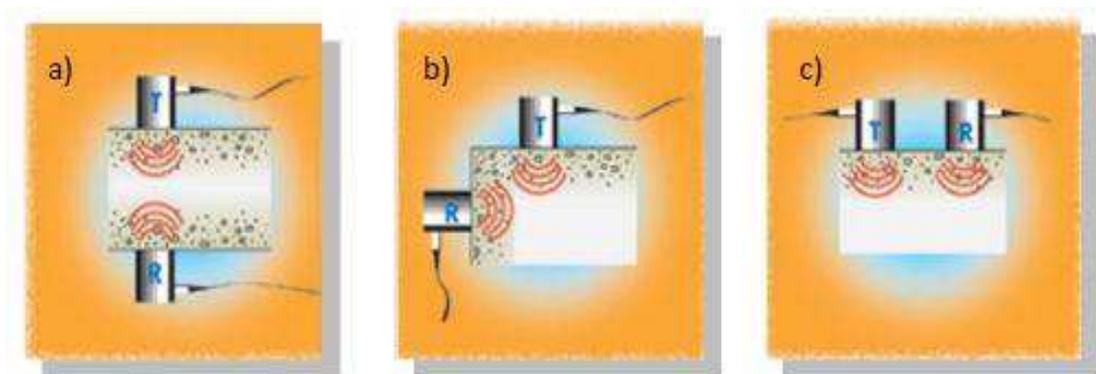
Es necesario calibrar el equipo antes de realizar el ensayo, esto se logra al colocar las caras de los transductores en el extremo de la barra de referencia y comprobar el tiempo de tránsito de las ondas longitudinales. Luego se comprueba al presionar directamente las caras de los transductores y verificar en la pantalla del equipo el ajuste a tiempo cero (ASTM C-597, 2016). Ver Figura 20.



Figura 20. Calibración del equipo de ultrasonido

2. Colocación del palpador

Es posible generar medidas de velocidad de impulso en la estructura de hormigón o en la probeta, situando los dos palpadores en caras opuestas (a. transmisión directa), en caras adyacentes (b. transmisión semidirecta), o en la misma cara (c. transmisión indirecta). Ver Figura 21.



a. Transmisión directa

b. Transmisión semidirecta

c. Transmisión indirecta

Figura 21. Arreglo de los palpadores

Fuente: (Pellicer, 2014)

Debe haber un adecuado acoplamiento acústico entre el hormigón y la cara de cada palpador, esto se logra colocando entre la superficie de hormigón y los transductores vaselina, grasa o glicerina. Cuando la superficie del hormigón es muy rugosa y desigual, la zona debería alisarse y nivelarse por pulido o mediante un tratamiento previo con mortero o una resina epoxi de endurecimiento rápido (EN 12504-4, 2004). En la Figura 22., se indica el procedimiento empleado para el acoplamiento de los transductores.



Figura 22. Procedimiento para acoplar los transductores

Determinación de la velocidad del impulso-transmisión indirecta

En la transmisión indirecta existe cierta incertidumbre respecto a la longitud exacta de la trayectoria, por lo tanto, se realizan series de medidas colocando los palpadores a diferentes distancias (Figura 23.). Para realizarlo, el palpador transmisor se coloca sobre la superficie de hormigón en un punto fijo y el palpador receptor a lo largo de la línea elegida en la superficie, separado a incrementos fijos (ASTM C-597, 2016). En la Figura

24., se muestran algunos puntos de ensayo sobre el talud, escogidos de forma aleatoria.



Figura 23. Medición de velocidad de impulso por transmisión indirecta



Figura 24. Puntos aleatorios para el ensayo sobre los taludes

Equipo de ultrasonido

El equipo para medir la velocidad de pulso consiste en un generador de pulso, un par de transductores, un amplificador, un indicador de tiempo, un circuito medidor de tiempo y cables de conexión. El circuito medidor de tiempo debe ser insensible a temperaturas de operación de 0 a 40°C. El tiempo de tránsito del pulso se debe indicar al más cercano 0.1 μ s (ASTM C-

597, 2016). Para medir la velocidad de pulso ultrasónico en el presente trabajo se emplea el equipo de ultrasonido Model E48 Tipo UPV marca Controls.

Cálculo

Los tiempos de transmisión registrados se deben representar en un gráfico que muestre su relación con la distancia de separación de los palpadores. La pendiente de la recta que mejor se ajuste a los puntos (tangente \emptyset) se debe medir y registrar como media de la velocidad de los impulsos (Figura 25.). Si los puntos medidos y registrados indican una discontinuidad, puede asumirse la presencia de una grieta superficial (EN 12504-4, 2004).

La velocidad de pulso se debe expresar con una aproximación de 0,01 km/s y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

- V es la velocidad del impulso
- L es la longitud de la trayectoria
- T es el tiempo que tarda el impulso en su trayectoria

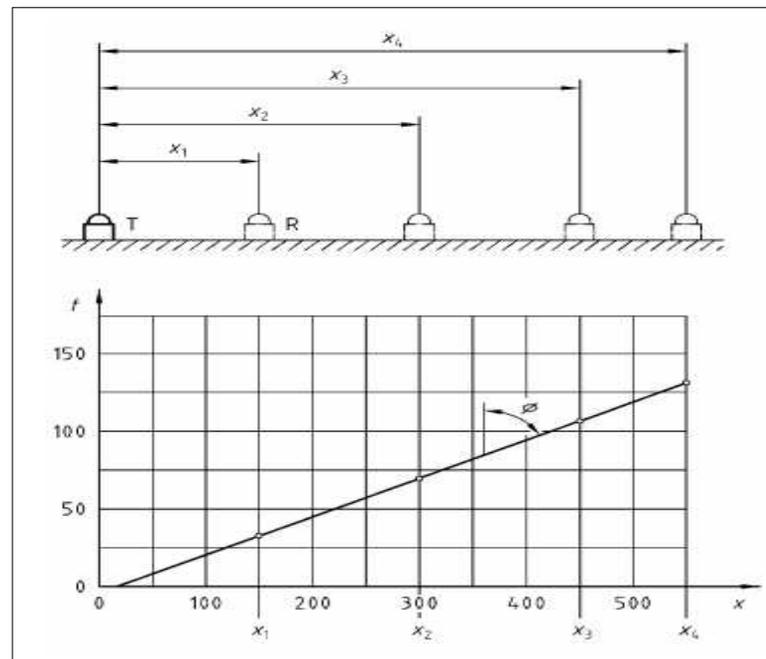


Figura 25. Determinación de la velocidad por transmisión indirecta

Fuente: (EN 12504-4, 2004)

Interpretación de los resultados

Con los valores obtenidos de velocidad de pulso se puede determinar la calidad del elemento ensayado, algunos de los criterios de clasificación de calidad se indica a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10.

Clasificación del hormigón según Malhotra

Clasificación del hormigón según su velocidad ultrasónica	
Velocidad de la onda longitudinal m/seg	Condición del hormigón
$V > 4570$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Buena
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre

V < 2135	Muy pobre
----------	-----------

Fuente: (Malhotra, 1985)

2.14.3. Control de fisuras

Las fisuras pueden afectar la apariencia de una estructura, pero también pueden indicar fallas estructurales o falta de durabilidad. Su importancia depende del tipo de estructura, como así también de la naturaleza de la fisuración. Las fisuras sólo se podrán reparar correctamente si se conocen sus causas y si los procedimientos de reparación son adecuados para dichas causas, caso contrario, las reparaciones pueden durar poco. Para que la reparación sea exitosa a largo plazo se debe atacar no sólo las propias fisuras sino también las causas de la fisuración (ACI 224.1R-93, 1993).

Fundamento y descripción del método

La fisuración del hormigón se atribuye a numerosas razones, a continuación se describen las principales causas que pueden producir fisuras en el concreto (ACI 224.1R-93, 1993).

1. Fisuración del hormigón en estado plástico

1.1. Fisuración por retracción plástica

La fisuración en el hormigón se crea en el proceso de rigidización, por tensiones de tracción que provocan fisuras poco profundas (Figura 26.). Ocurre por la pérdida de humedad rápida provocada por la temperatura del aire y el hormigón, la humedad relativa y la velocidad del viento. La longitud varía entre pocos milímetros y el ancho puede ser de milímetros hasta 3 m.

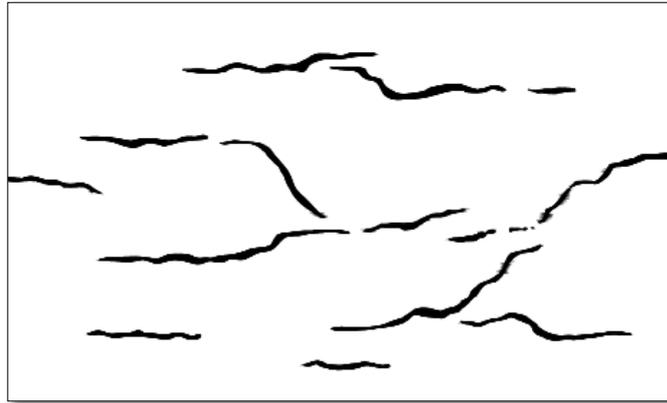


Figura 26. Fisuración por retracción plástica

Fuente: (ACI 224.1R-93, 1993)

1.2. Fisuración por precipitación de los agregados

Luego de su colocación, vibrado y acabado, el hormigón tiende a compactarse. El hormigón plástico, durante este período puede estar restringido por las armaduras, que pueden provocar vacíos y/o fisuras adyacentes al elemento.

2. Fisuración del hormigón endurecido

2.1. Retracción por secado

Provocada por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, la cual se puede contraer hasta un 1%. La fisuración por asentamiento de los agregados se puede reducir aumentando la cantidad de agregado y reduciendo el contenido de agua.

2.2. Tensiones de origen térmico

En una estructura de hormigón las variaciones de temperatura pueden ser provocadas por partes de la estructura que pierden calor de hidratación a diferentes velocidades, o por condiciones climáticas que enfrían o calientan las estructuras.

2.3. Reacciones químicas

Algunas reacciones químicas pueden provocar la fisuración del hormigón, producto de los materiales que están en contacto con el hormigón endurecido o de los materiales utilizados para preparar el hormigón.

2.4. Meteorización

La fisuración provocada por los procesos naturales de meteorización (humedecimiento, congelamiento, deshielo, secado, calentamiento y enfriamiento) genera fisuras notables y puede dar la impresión de que el hormigón está a punto de desintegrarse, aun cuando el deterioro no haya avanzado mucho debajo de la superficie. Ver figura 27.

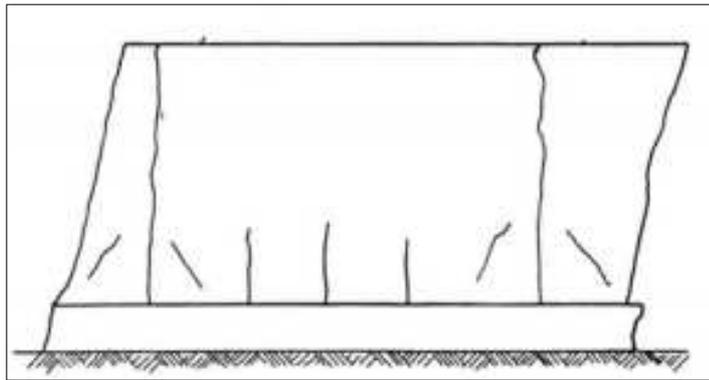


Figura 27. Fisuración de un muro por contracción térmica inicial

Fuente: (Ottazzi, 2004)

2.5. Corrosión de las armaduras

Se produce una serie de reacciones químicas en la superficie del metal y cerca de la misma. La corrosión de un metal es un proceso electroquímico

que requiere un agente oxidante, humedad y flujo de electrones dentro del metal.

2.6. Prácticas constructivas inadecuadas

Existe una gran variedad de prácticas constructivas inadecuadas cuyo resultado puede ser la fisuración del hormigón, la más habitual es la costumbre de añadir agua al hormigón para mejorar su trabajabilidad, reduciendo la resistencia y aumentando la retracción por secado.

2.7. Errores de diseño y detalle

Un diseño y detallado incorrecto, genera consecuencias en estructuras no satisfactorias que van desde el punto de vista estético hasta la falta de serviciabilidad o fallas catastróficas.

Limitación del ancho de fisuras

Conforme a las investigaciones realizadas, no existe un acuerdo al ancho máximo de grietas para un elemento estructural. Algunos investigadores y códigos presentan límites en los anchos de fisura en el orden de 0.1 a 0.2 mm y 0.2 a 0.4 mm para estructuras expuestas a ambientes agresivos y para ambientes normales respectivamente. ACI limita los anchos de fisura a 0.40 mm para exposición exterior y 0.33 mm para exposición interior.

Razones para controlar el ancho de fisuras

A continuación se señalan algunas de las razones que tiene mayor influencia en el control del agrietamiento de los elementos de hormigón (Ottazzi, 2004):

- **Apariencia.** El tamaño visible de las fisuras depende mucho de las características superficiales del elemento (color, textura, acabado) y pueden conducir a preocupación por parte del público usuario.
- **Impermeabilidad.** Esta razón es de suma importancia cuando se trata de estructuras destinadas a contener o retener líquidos. Es claro que si se requiere impermeabilidad, es indispensable controlar el ancho de las grietas.
- **Corrosión de las armaduras.** Se ha relacionado tradicionalmente la apariencia de grietas con el peligro de corrosión en las armaduras. Sin embargo, las nuevas investigaciones realizadas, no han podido establecer a partir de que ancho de agrietamiento provoca peligro de corrosión.

Equipo

La ubicación y magnitud de la fisuración, así como el estado general del hormigón de una estructura, se puede obtener mediante ensayos no destructivos y observaciones directas. Para determinar la longitud y el ancho de las fisuras visibles en la superficie de los taludes en estudio, se emplea un fisurómetro modelo FI103AN (Figura 28.) con las siguientes características.

FI103AN

- Fisurómetro una dirección
- Uso en interiores/exteriores
- Resistente a la intemperie
- Precisión de lectura 0.1 mm
- Para medición de fisuras de hasta 17 cm



Figura 28. Instrumento para medir anchos de fisura

2.14.4. Ensayo de carbonatación por medición de fenolftaleína

La carbonatación del recubrimiento en hormigones endurecidos y puestos en servicio puede ser visualizada mediante un indicador de fenolftaleína. A partir de los resultados del ensayo puede obtenerse información acerca de la profundidad de carbonatación actual del elemento estructural y en cualquier período de su vida.

Fundamento y descripción del método

La carbonatación del hormigón es un proceso químico de envejecimiento ambiental que transforma el hidróxido de calcio en carbonato cálcico, producido por la acción del dióxido de carbono de la atmósfera CO_2 y el agua.

El hormigón endurecido tiene un alto pH, provocado principalmente por la presencia de hidróxido de calcio. Debido a la alta alcalinidad, las armaduras se encuentran rodeadas de una capa pasivadora. El hormigón al ir perdiendo el hidróxido de calcio, produce la bajada del pH que genera la corrosión del acero (González, 2012).

La corrosión del acero de refuerzo radica en la oxidación destructiva del acero debido al medio que lo rodea. Las consecuencias se presentan como una disminución de la sección de la varilla, fisuras en el concreto, debido a la disminución o desaparición de la adherencia entre el refuerzo y el concreto y a las presiones que realiza el óxido expansivo (Rojas, 2008).

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los hormigones endurecidos que indica la carbonatación, puede ponerse de manifiesto mediante un indicador de pH, que la hace perceptible por cambios de coloración. Para su uso como un indicador, la fenolftaleína debe quedar disuelta en una solución al 1%, para obtener 100 cm³ de disolución, se disuelve 1g de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico (UNE 112011, 2011).

En la Figura 29., puede observarse que en la parte inferior del testigo no existen riesgos de carbonatación; sin embargo, en la parte superior al no cambiar de coloración el hormigón con la fenolftaleína, es evidente la presencia de la carbonatación.



Figura 29. Ensayo de carbonatación con indicador de fenolftaleína

Procedimiento

1. Toma y preparación de las muestras

Para medir la profundidad de carbonatación X_{CO_2} , es necesario presentar una superficie del hormigón. Para ello es necesaria la extracción de testigos de la estructura. Ver Figura 30.

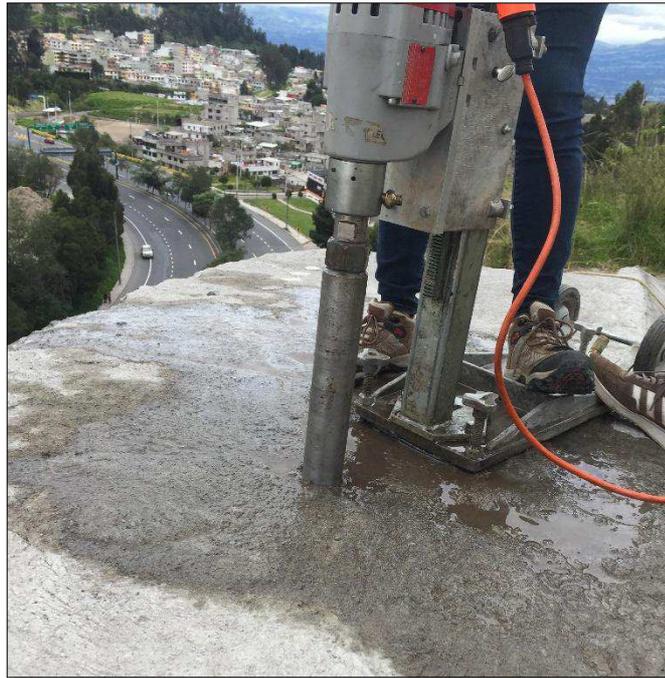


Figura 30. Extracción de testigos de hormigón

En todos los casos la medida se debe efectuar sobre una superficie limpia de partículas sueltas, por lo que debe limpiarse anticipadamente con brocha debiendo siempre proceder sin demora, con el propósito de evitar que la superficie se carbonata. Es necesario que la muestra posea unas dimensiones suficientes como para medir la profundidad de la capa carbonatada desde la cara exterior del elemento. Para las determinaciones “in situ”, las muestras deben tomarse en zonas donde el recubrimiento de hormigón no se encuentre suelto o existan fisuras (UNE 112011, 2011).

2. Aplicación del indicador

La disolución del indicador puede aplicarse con pulverizador o cualquier otro medio que permita extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie.

El avance de la carbonatación se determina al aplicar el indicador de fenolftaleína a la superficie de la muestra de hormigón y observando las variaciones de color en función del pH del mismo. La fenolftaleína se vuelve incolora en valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado) y toma un color rojo-púrpura para valores de pH superiores a 9,5 (hormigón no carbonatado).

3. Medida de la profundidad de carbonatación

Las medidas se realizarán con una regla u otro instrumento de medición capaz de garantizar una precisión de 0.5 mm. El procedimiento no debe tardar más de 20 min. Luego de la aplicación, pasado 1 o 2 minutos y antes de transcurrir 15 minutos, se realizará la medición de la profundidad de la zona incolora (no carbonatada) medida desde la superficie (UNE 112011, 2011).

Cálculo

La carbonatación es un proceso de difusión y por lo tanto su avance en el interior del hormigón progresa atenuándose en el tiempo. El modelizado de la carbonatación suele realizarse utilizando una solución de la Ley de Fick de la difusión. A partir de la profundidad del frente carbonatado X_{CO_2} , la velocidad de penetración puede obtenerse mediante la fórmula (Geocisa, 2002):

$$X_{CO_2} = V_{CO_2} \sqrt{T}$$

Donde:

X_{CO_2} = profundidad carbonatada (mm)

V_{CO_2} = velocidad de carbonatación (mm/año^{1/2})

T = tiempo de exposición o edad de la estructura (años)

Con el cálculo de la velocidad de carbonatación para un determinado tiempo, se puede utilizar la ecuación para predecir las profundidades de

carbonatación del revestimiento de hormigón lanzado en taludes a diferentes edades.

2.15. Causas y efectos de la contaminación atmosférica

Sin duda el más significativo de los casos de contaminación, se inició en la segunda mitad del siglo XVIII durante la Revolución Industrial, que incrementaron la concentración de gases perjudiciales para la salud y el medio ambiente, con el uso de los combustibles, los procesos de producción y el consumo de energía. En la actualidad, la degradación del medio ambiente se identifica como uno de los problemas más importantes que el hombre tiene planteados, debido a la explotación de los recursos naturales, el proceso de urbanización, la industrialización y el impetuoso progreso tecnológico.

La actividad del ser humano, incluso la más normal y cotidiana, origina directa o indirectamente sustancias contaminantes. Sin embargo, en años recientes los incidentes de contaminación han aumentado la frecuencia y gravedad, por lo tanto, se ha debido prestar mayor atención ya que cada día hay más pruebas de sus efectos adversos sobre el equilibrio ambiental.

En la Tabla 11., se indica los principales componentes que se encuentran de forma natural en la atmósfera. Son sustancias que se consideran contaminantes cuando se elevan los niveles de concentración en el ambiente y rebasan la capacidad de los ecosistemas para asimilarlas o degradarlas.

Tabla 11.

Niveles de concentración entre aire limpio y aire contaminado

Componentes	Aire limpio	Aire contaminado
SO₂	0.001-0.01 ppm	0.02-2 ppm
CO₂	310-330 ppm	350-700 ppm

CO	<1 ppm	5-200 ppm
NOx	0.001-0.01 ppm	0.01-0.5 ppm
Hidrocarburos	1 ppm	1-20 ppm
Partículas	10-20 m g/m ³	70-700 m g/m ³

Fuente: (Seinfeld, 1978)

2.15.1. Concepto de contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en el aire de materias o formas de energía que implican riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza (Martinez, 2004), así como que puedan atacar a los diferentes materiales, producir desequilibrio en los ecosistemas o reducir la visibilidad.

2.15.2. Fuentes de la contaminación del aire

Las fuentes de los contaminantes del aire se clasifican en naturales y antropogénicas (WGA, 1999):

Fuentes naturales

Una pequeña fracción de los contaminantes de la atmósfera es emitida por fuentes naturales, comprendidas por la actividad geológica de la Tierra (erupciones volcánicas) y procesos naturales, como incendios forestales de origen natural o por regiones pantanosas, en donde predominan los compuestos de azufre, entre otros.

Fuentes antropogénicas

Entre estas se encuentran principalmente las generadas por la actividad humana, la combustión de fósiles que comprenden los diferentes procesos industriales y de uso doméstico. Se destaca los procesos de manufactura y la combustión de la basura. Las fuentes antropogénicas pueden ser fijas (refinerías, centrales hidroeléctricas, nucleoeeléctricas, termoeléctricas) y móviles (vehículos con motor de combustión interna).

2.15.3. Tipos de contaminantes atmosféricos

1. Contaminantes primarios

Son los que se emiten directamente a la atmósfera (Manahan, 2007), dañan directamente la vegetación y son los causantes de la mayor parte de la contaminación. Entre los que se encuentran las partículas suspendidas son los óxidos de azufre (principalmente SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2), los compuestos inorgánicos de carbono, entre otros.

1.1. Partículas

Se debe a procesos naturales generados principalmente por el polvo de viento o volcanes y por actividades antropogénicas causados por la industria, especialmente fabricación de cemento y producción de energía. Los efectos que pueden producir dependen de las características físicas de las partículas, que incluyen el tamaño, forma y composición química. Las partículas comprendidas entre 10^{-1} y $10 \mu\text{m}$ permanecen mucho tiempo en la atmósfera y se conocen como “materia en suspensión”, pero las de tamaño mayor de $10 \mu\text{m}$ se llaman partículas sedimentables y precipitan pronto. La presencia de partículas en la atmósfera tiene como efecto principal la reducción de la visibilidad (Acosta, 2007).

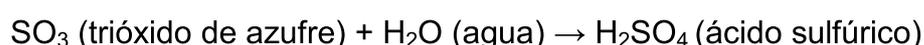
1.2. Compuestos azufrados

El contaminante azufrado más abundante es el dióxido de azufre con fórmula molecular SO_2 . La reacción química de este contaminante atmosférico se produce mediante:



En la actualidad, las fuentes energéticas se basan en combustibles fósiles que tiene en su composición mayoritariamente azufre, la fuente principal de emisión de dióxido de azufre a la atmósfera es la combustión del carbón y petróleo y en la naturaleza, es emitido en la actividad volcánica. El SO_2 tiene una vida media en la atmósfera de cinco días y se puede transformar en SO_3 por oxidación en la atmósfera, implica una activación fotoquímica que excita la molécula de SO_2 para que pueda combinarse con una molécula de oxígeno (Acosta, 2007).

El trióxido de azufre al reaccionar con el agua presente en las nubes, produce el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que es uno de los principales responsables en la formación de la lluvia ácida. A continuación se presenta unos ejemplos de reacciones que ocasionan la lluvia ácida (López, 2003):



1.3. Compuestos inorgánicos de carbono

Los compuestos inorgánicos de carbono fundamentalmente son el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2).

Monóxido de carbono (CO)

Es un gas incoloro, inodoro, tóxico y es peligroso para las personas y los animales. Se genera por la combustión incompleta de combustibles,

principalmente de la gasolina y el gasoil en los motores de los automóviles. La emisión de monóxido de carbono a la atmósfera en las áreas muy urbanizadas con gran movimiento vehicular, alcanza concentraciones excesivas de 50-100 ppm, (Manahan, 2007), tasas perjudiciales para la salud de las personas, afecta especialmente los aparatos respiratorio y circulatorio.

Dióxido de carbono (CO₂)

Es un gas inodoro, incoloro, no tóxico y es uno de los principales contaminantes responsables de producir un incremento de la temperatura de la tierra, conocido como efecto invernadero. La destrucción de bosques y la deforestación influyen sobre la fotosíntesis, como consecuencia produce mayor concentración de CO₂ en la atmósfera.

Se encuentra presente en la atmósfera de forma natural especialmente en las plantas, incendios y erupciones volcánicas, mientras las antropogénicas están constituidas por los procesos de combustión completa de combustibles fósiles. La concentración de CO₂ en la atmósfera está aumentando de forma constante debido a los procesos de producción de energía, basados en la combustión de fósiles (Acosta, 2007).

1.4. Compuestos nitrogenados

Su principal fuente de emisión antropogénica proviene de los combustibles fósiles a altas temperaturas utilizados para el transporte, generación de energía eléctrica y la industria. Entre los principales contaminantes nitrogenados se incluyen el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), se suelen denominar en conjunto como NO_x.

El NO se oxida a NO₂ por procesos termoquímicos o fotoquímicos. Los óxidos de nitrógeno son contaminantes atmosféricos que aportan en la formación de contaminantes secundarios. La vida media de los NO_x es corta,

aproximadamente un día y se transforman en la atmósfera en ácido nítrico, HNO_3 , que es un agente corrosivo y contribuye a la lluvia ácida (Acosta, 2007).

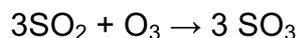


2. Contaminantes secundarios

Son los que se crean mediante procesos químicos atmosféricos que actúan sobre los contaminantes primarios o sobre especies no contaminantes en la atmósfera (Manahan, 2007). Entre éstos se encuentran el ácido sulfúrico y el ácido nítrico.

2.1. Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

El ácido sulfúrico, H_2SO_4 , que es un contaminante secundario, se genera por oxidación del dióxido de azufre (Manahan, 2007). La oxidación del SO_2 a trióxido de azufre (SO_3) puede producirse por la reacción con el ozono. El SO_3 al reaccionar con el agua presente en las nubes forma el ácido sulfúrico, que es un contaminante responsable de la lluvia ácida (López, 2003).



2.2. Ácido nítrico (HNO_3)

Los óxidos de nitrógeno se convierten en nitratos o en ácido nítrico. El NO se oxida con el oxígeno atmosférico y reacciona con el agua

generando ácido nítrico (HNO_3). Este contaminante es arrastrado por el agua de lluvia y es uno de los causantes de las lluvias ácidas.

2.15.4. Efectos sobre los materiales provocados por los contaminantes

La presencia de partículas en la atmósfera provoca variaciones estéticas a causa de su deposición sobre los materiales y en varias ocasiones la composición química de las partículas acelera los procesos de corrosión.

Los efectos de los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno son la corrosión metálica, debida a la formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico, especialmente en ambiente húmedo y a temperaturas cálidas, son los responsables principalmente del deterioro de fibras sintéticas y plásticos (Acosta, 2007).

En el concreto reforzado, el contenido de dióxido de carbono avanza lenta y paulatinamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y embiste al acero de refuerzo causando la corrosión. La carbonatación se manifiesta como una reducción del pH del hormigón que inicia a través de los poros y aparece paralelamente a la superficie expuesta (Moreno, 2010).

2.16. Análisis físico y químico de las muestras agua lluvia

2.16.1. Concepto de agua

El agua es el recurso más abundante en la superficie terrestre, indispensable para los seres vivos y se encuentra en la naturaleza distribuido en estado líquido, sólido y gaseoso. Es un compuesto formado por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O).

2.16.2. Ciclo del agua

El agua se presenta en la naturaleza en tres estados diferentes: sólido, líquido y gaseoso. El ciclo hidrológico es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos que forman la hidrosfera. Incluye una intervención mínima de reacciones químicas, porque el agua sólo se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico (Ordoñez, 2011).

El ciclo del agua consta de las siguientes fases:

- Evaporación
- Condensación
- Precipitación
- Infiltración
- Escorrentía superficial y subterránea
- Fusión
- Solidificación

En la Figura 31., se presenta el ciclo del agua, inicia cuando el sol calienta el agua de los océanos, la cual se evapora y por las corrientes de aire llegan a la atmósfera, al disminuir la temperatura se origina la condensación y se forman las nubes. Las partículas de nube colisionan, crecen y caen en forma de precipitación (nieve o lluvia). Por gravedad, el agua corre sobre la superficie como escorrentía superficial, sin embargo, una parte del agua es absorbida por el suelo como infiltración. A lo largo del tiempo, una parte volverá a los océanos, donde el ciclo se completa e inicia nuevamente (USGS, 2016).



Figura 31. Diagrama del ciclo del agua

Fuente: (USGS, 2016)

Como se indicó anteriormente, la interacción de los contaminantes atmosféricos con el vapor de agua, forman los ácidos que se depositan sobre la tierra acompañando a las precipitaciones (lluvia ácida). Finalmente, la lluvia se desliza cuesta abajo por la superficie de los taludes, siendo la escorrentía el principal agente de erosión y de transporte de sedimentos, acelerando el proceso de deterioro del revestimiento del hormigón.

2.16.3. Agua lluvia

La lluvia se produce a partir de la condensación del vapor de agua que se encuentra dentro de las nubes y cae por efecto de la gravedad al volverse más pesado. La lluvia casi siempre se presenta en estado líquido, pero también puede estar en estado sólido como el granizo. Conforme desciende, la lluvia absorbe oxígeno y gases del aire, así como bacterias que se

encuentran en el ambiente. El agua lluvia es saturada de oxígeno, insípida y un poco corrosiva, esto según el lugar donde se produzca la precipitación; por lo tanto es necesario realizar el análisis físico y químico de las muestras de agua lluvia captadas en colectores.

2.16.4. Lluvias ácidas

El término “lluvia ácida” es utilizado por primera vez en 1872, por el químico Robert Smith en Inglaterra. La contaminación del aire se convirtió en un grave problema ambiental a partir del siglo XVIII, cuando el carbón sustituye a la madera como fuente para generar energía y se inicia la denominada Revolución Industrial.

Los contaminantes generados por la quema de combustibles fósiles (carbón y petróleo) tras sufrir varios procesos de transporte y transformación química, se depositan sobre la tierra por dos vías (Acosta, 2007):

- Deposición seca: En las zonas próximas al foco emisor, los SO_2 y los NO_2 se depositan en forma de aerosoles o gaseosa.
- Deposición húmeda: Ocurre cuando los óxidos permanecen más tiempo en la atmósfera y llevan su oxidación a formas ácidas las cuales se disuelven en las gotas de agua que forman las nubes.

El ácido sulfúrico y el ácido nítrico se forman cuando las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno reaccionan con el agua en la atmósfera (Antón, 2008). Estos ácidos son solubles en agua y actúan como núcleos de condensación de las precipitaciones; cuando las gotas cargadas de ácidos caen sobre la tierra constituyen la lluvia ácida (Cabildo, 2013).

La lluvia no contaminada tiene un potencial de hidrógeno ligeramente ácido cercano a 5.6 debido a la concentración de CO_2 presente en la

atmósfera pero puede combinarse con iones hidrógeno que alteran su pH haciéndolo más ácido y pasa a denominarse lluvia ácida cuando el pH es inferior a 5.0.

2.16.5. Efectos de las lluvias ácidas

Los efectos más importantes de las lluvias ácidas son (Flores, 1997):

Efectos sobre la salud

Los efectos de la lluvia ácida se estiman mediante bioensayos, se ha creado un programa de investigación para evaluar los efectos sobre la salud asociados con las concentraciones elevadas de aerosoles con el objeto de determinar poblaciones potencialmente sensibles. Los efectos en la piel son equivalentes a los generados por el contacto con cualquier ácido débil, sin embargo, el conocimiento de los efectos adversos todavía es incipiente.

Aguas superficiales

Los primeros recursos afectados por las precipitaciones ácidas son las estancadas, los lagos y las lagunas. La acidificación de suelos y sedimentos facilita que los metales (mercurio, aluminio) se disuelvan y movilicen a fuentes de aprovisionamiento de agua, sus consecuencias podrían ser perjudiciales para la salud humana y la estabilidad ambiental.

Flora y fauna

Cuando existen cambios súbitos en el contenido de nutrientes y niveles de acidez, las plantas eventualmente podrían soportarlos, pero los efectos trascenderán en la caída prematura de las semillas, afectando a la

reproducción. Además, el suelo al convertirse ácido, acumula grandes cantidades de metales pesados, los cuales son ingeridos por los animales, presentando concentraciones altas de cadmio.

Suelos

Modifica el equilibrio iónico, es decir, provoca la pérdida de elementos minerales necesarios para los vegetales, lo que afecta la relación suelo-vegetación-cultivo. Interviene en la destrucción de la vegetación de forma indirecta a través de la contaminación del suelo o directamente porque las gotas ácidas vuelven amarillas las hojas y ocasionan la muerte de las plantas.

Efectos sobre los materiales

El deterioro de los materiales es un importante costo económico especialmente cuando se presenta en edificios, monumentos y zonas arqueológicas. Las áreas urbanas generalmente son las más vulnerables por los altos niveles de contaminación y los efectos adversos de la lluvia ácida varían de acuerdo con el tipo de material.

La corrosión de los metales, como el zinc tiene una correlación lineal con la concentración de azufre y pH, el acero es un material más resistente a la corrosión pero puede presentarse mediante una decoloración del metal o manchas oscuras.

Como resultado del ataque del ácido sulfúrico se genera el conocido “mal de piedra” que afecta a las rocas calizas de edificios, catedrales. La lluvia ácida corroe las construcciones y tiene influencia en la degradación de los materiales de construcción.

2.16.6. Características físicas del agua lluvia

El aspecto físico del agua se considera por su apariencia, la cual puede ser apreciada por los sentidos (SENA, 2012). Los parámetros físicos del agua tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas del agua y se determinan por medio del color, olor, sabor, temperatura y turbidez.

1. Color

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. No se puede atribuir a un constituyente en particular, sin embargo algunos colores dan una idea de la causa que los provoca; los humos de los bosques y la materia vegetal de los pantanos originan un color amarillento en aguas poco profundas.

2. Olor

Las impurezas orgánicas disueltas producen olores indeseables, que se deben a concentraciones pequeñas de compuestos volátiles. La intensidad de los olores varían; algunos son de tierra o moho, mientras que otros son putrefactos.

3. Sabor

El sabor es una medida subjetiva de aceptación del agua por el consumidor. Un sabor metálico o salino puede indicar polución en el abastecimiento de agua. Las sales metálicas como la del cobre, el zinc o el hierro causan sabores metálicos.

4. Temperatura

Se determina con un termómetro y se expresa en grados centígrados. Es importante por el efecto sobre las propiedades físicas, afecta las reacciones químicas y la solubilidad de los gases, amplía sabores, lores del agua y determina el desarrollo de los organismos presentes.

5. Turbidez

La turbiedad es el efecto óptico causado por la dispersión y absorción de los rayos luminosos que pasan a través del agua que contiene materiales insolubles en suspensión y son muy finos, están presentes especialmente en aguas superficiales, en general son muy difíciles de filtrar y pueden dar lugar a depósitos en las conducciones.

2.16.7. Características químicas del agua lluvia

Se relaciona con los compuestos químicos disueltos en el agua y que pueden modificar sus propiedades (SENA, 2012). Las características químicas más comunes que se realizan en el agua lluvia son: alcalinidad, acidez, pH, conductividad, potencial de oxidación y reducción.

1. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, que indica la concentración de iones de hidrógeno $[H^+]$ que se encuentran presentes en determinadas soluciones (Chang, 2013). El término pH, lo definió el bioquímico danés Soren Sorensen como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de iones de hidrógeno, el cambio de una unidad del pH, significa un cambio de 10 veces en la concentración de iones de hidrógeno.

$$pH = -\log_{10} [H^+]$$

Donde:

$$[H^+] = \text{Actividad de los iones de hidrógeno}$$

Las mediciones de pH se ejecutan en una escala de 0 a 14; el punto medio de la escala del pH es 7 considerado neutro. Las sustancias con un pH menor que 7 se consideran ácidas. Las soluciones con un pH por encima de 7, hasta 14 se consideran bases o alcalinas. El valor del pH depende de la temperatura.

Procedimiento

Existen varias formas de medir el valor del pH de las sustancias, de forma exacta mediante un potenciómetro (pH-metro electrónico), que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos, un electrodo de referencia y un electrodo de vidrio que es sensible al ion de hidrógeno.

Otro método que se puede aplicar para medir de forma aproximada el pH es utilizando soluciones indicadoras, ácidos o bases débiles que muestran diferente color según el pH. El indicador más sencillo y conocido es el papel tornasol impregnado de una mezcla de indicadores cualitativos para determinar el pH. Ver Figura 32.

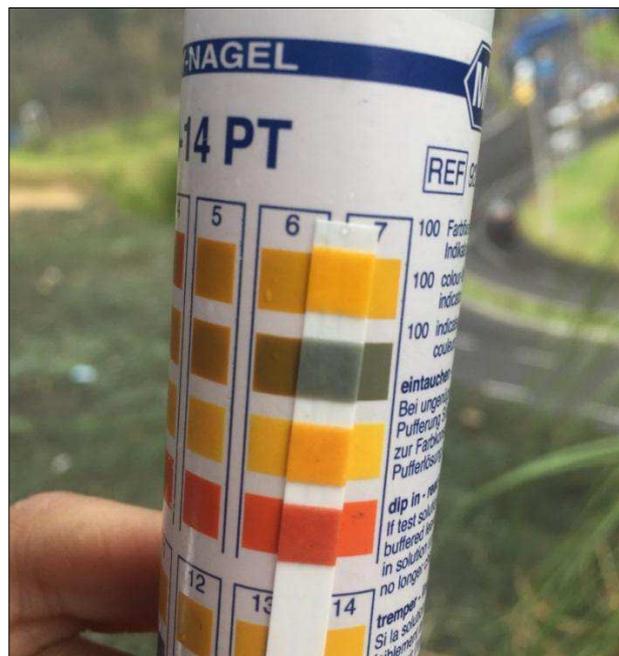


Figura 32. Papel indicador de pH

La medición del pH de las muestras de agua se basa en el método estándar para el análisis de aguas residuales (APHA, 1992):

- **Muestreo y preservación**

El análisis puede ser realizado en campo o en el laboratorio. En caso de que el análisis se realice en el laboratorio, se debe realizar la medida antes de 2 horas de recolectada la muestra.

- **Equipos y materiales**

1. Medidor de pH.



Figura 33. Medidor de pH

2. Electrodo de referencia de potencial constante y electrodo de vidrio.
3. Termómetro.
4. Agitador magnético y barras agitadoras.
5. Vasos de precipitación.

- **Reactivos**

1. Agua destilada
2. Soluciones buffer estándar de pH conocido, necesarias para calibrar el instrumento:

Solución buffer de pH = 4,004 a 25°C

Solución buffer de pH = 6,863 a 25°C

Solución buffer de pH = 10,014 a 25°C

- **Calibración del instrumento**

Para ello se debe seguir las instrucciones del medidor de pH. En la calibración se usan como mínimo dos de las soluciones buffer, cuyos valores de pH deben cubrir el rango de pH esperado, como se indica en la Figura 34.



Figura 34. Calibración del equipo para pH

- **Medida**

Medir el pH de la muestra indicando la temperatura de la misma. Realizar la medida con una agitación moderada para minimizar la entrada de dióxido de carbono y suficiente como para homogeneizar la muestra.

Una vez finalizada la medida enjuagar y secar suavemente los electrodos y proceder a ubicarlos en la solución de reserva de los mismos.

2. Alcalinidad

Es la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos y se debe a la presencia de carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Se determina por la titulación con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.01N., indicados por medio del cambio de color de dos indicadores ácido-base.

Principio

Se agrega a la muestra de agua la solución indicadora de fenolftaleína y si aparece un color rosa, se tiene un $\text{pH} \geq 8.3$ y el agua tiene iones CO_3^{2-} . Se procede a titular con HCl, hasta que el color rosa desaparezca. Inmediatamente se añade el indicador de azul bromofenol, se observa una coloración azul y se titula con HCl hasta la aparición de un color verde. Si las muestras de agua tienen un $\text{pH} < 8.3$, la titulación se realiza en una sola etapa.

Procedimiento

- Colocar 5 ml de muestra de agua en un erlenmeyer de 125 ml.
- Adicionar 3 gotas de solución indicadora de fenolftaleína, si aparece un color rosa, se titula con HCl hasta que la muestra sea incolora.

- Calcular CO_3^{2-} , si no se colorea de rosado, se reporta el valor de carbonatos igual a cero.
- Adicionar 3 gotas de la solución indicadora de azul de bromofenol a la misma muestra surgiendo un color azul, se titula con HCl hasta la aparición de un color verde.
- Calcular HCO_3 .

Cálculos

- Carbonatos

$$\text{mEq/L de CO}_3 = \frac{2 V \times N \times 1000}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

N = Normalidad del HCl

V = Volumen de HCl gastado (mL)

- Bicarbonatos

$$\text{mEq/L de HCO}_3 = \frac{(T - 2V) \times N \times 1000}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

N = Normalidad del HCl

V = Volumen de HCl gastado en la primera titulación (mL)

T = Volumen de HCl gastado en las 2 titulaciones (mL)

3. Acidez

La acidez del agua es una medida de la cantidad total de sustancias ácidas (H^+) presentes. Se expresa como miligramos por litro de carbonato de calcio. La acidez fuerte se da cuando el $\text{pH} < 4.3$, la acidez débil se encuentra cuando el pH del agua está entre 4.3 y 8.3. Este tipo de acidez trae problemas de corrosión. Si el $\text{pH} > 8.3$, la acidez desaparece (SENA, 2012).

Procedimiento

- Colocar 10 ml de muestra de agua en un erlenmeyer de 25 ml.
- Adicionar 2-3 gotas de solución indicadora de anaranjado de metilo a la muestra de agua. Ver Figura 35.

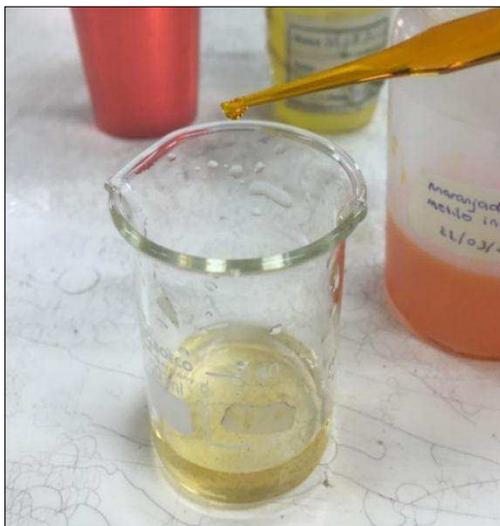


Figura 35. Solución indicadora de anaranjado de metilo

- Titular con HCl 0.01N hasta que la muestra cambie de color a rojo salmón, como se observa en la Figura 36., y anotar los mL de solución consumidos.

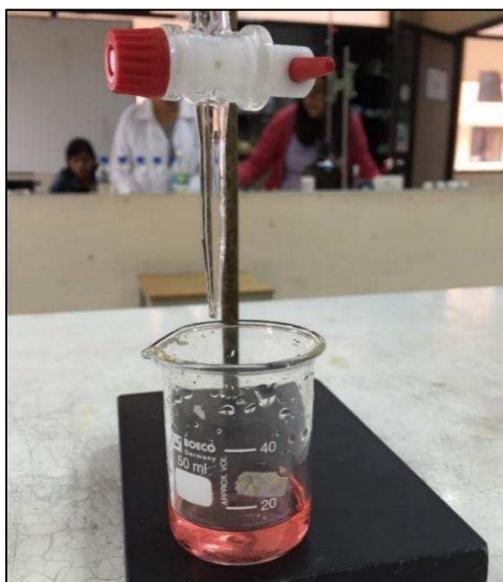


Figura 36. Titulación con ácido clorhídrico

Cálculos

$$\text{mg CaCO}_3/\text{L} = \frac{A \times N \times 50 \times 1000}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

N = Normalidad del HCl

A = Volumen de HCl gastado en la titulación (mL)

4. Conductividad

La conductividad es la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica y es igual al recíproco de la resistividad de la solución. Depende de la presencia de iones disueltos, concentraciones totales, movilidad, valencia y la temperatura. En el Sistema Internacional de Unidades la conductividad se expresa en (S/m) siemens por metro (APHA, 1992).

Es posible diferenciar los distintos conductímetros (Figura 37.), según el método de medición que utilicen, se reporta los valores en la tradicional unidad de $\mu\text{S}/\text{cm}$ o bien en mg/L (campo de medición TDS).

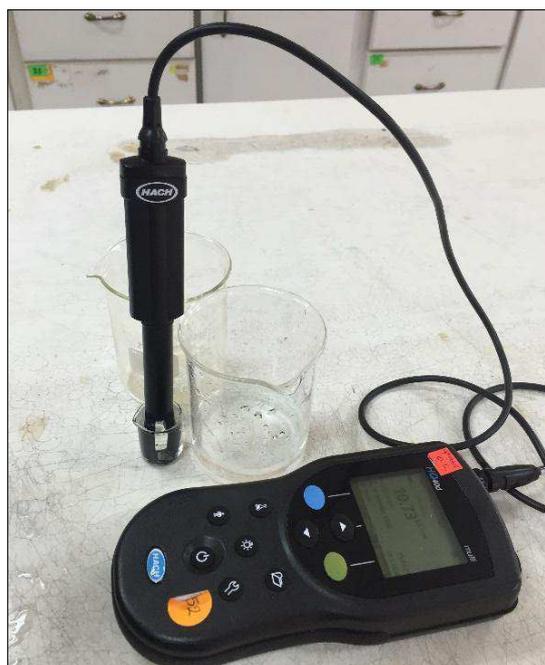


Figura 37. Medidor de conductividad

Método de análisis

La conductividad de una solución de un electrolito se mide determinando la resistencia de la solución entre dos electrodos planos o cilíndricos separados a una distancia fija (Bockris, 2001). El flujo de electrones varía con la temperatura de la solución.

Para corregir los efectos de la temperatura, se utiliza un factor de compensación, el coeficiente se fija en 2% por cada aumento en temperatura de un 1°C (Fuentes, 2002).

5. Sólidos Disueltos Totales (TDS)

Los sólidos disueltos totales (TDS) es una medida combinada de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en una muestra de agua.

La determinación de TDS consiste en filtrar un volumen de agua por medio de una membrana con poros de dos micrómetros para luego evaporarlo a 105°C, hasta que alcance un peso constante. Seguidamente,

se procede a pesar el residuo filtrable luego de la evaporación. Dicho valor representa la concentración de sólidos disueltos totales (Fuentes, 2002).

Cálculos:

$$mg \text{ sólidos disueltos totales/L} = \frac{(B - A) * 1000}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde:

A = Peso de la cápsula de evaporación vacía (mg)

B = Peso de la cápsula de evaporación vacía + residuo seco (mg)

Relación entre conductividad y sólidos disueltos

Este tipo de medición se puede utilizar para determinar la cantidad de sólidos totales disueltos (TDS). El valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, con una buena aproximación la relación está definida por la siguiente regla:

$$1.4 \mu\text{S/cm} = 1\text{ppm} \text{ o } 2 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ ppm (partes por millón de CaCO}_3\text{)}$$

$$1\text{ppm} \text{ o } 2 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ ppm}$$

$$1\text{ppm} = 1 \text{ mg/L (unidad de medida para sólidos disueltos)}$$

6. Potencial Redox (Eh)

El Potencial Redox es una medida de la actividad de los electrones que está relacionado con los procesos de oxidación y reducción en el agua. Se mide con un electrodo de metal inerte (platino) en un circuito con un electrodo de referencia y la unidad de medida es el milivoltio (mV).

El potencial de oxidación - reducción es la capacidad de una molécula para dar o recibir electrones cuando un elemento cede electrones aumentada su estado de oxidación (Brown, 2004), mientras que cuando capta un electrón se dice que se reduce. En la naturaleza se puede encontrar valores de Eh entre +600 mV (oxidación) y -300 mV (reducción). Un valor positivo de alta magnitud indica un ambiente que favorece la reacción de oxidación y un valor negativo de baja magnitud muestra un ambiente altamente reductor (Fuentes, 2002).

Número de oxidación

La cuantificación de un elemento químico puede efectuarse mediante su número de oxidación. El número puede aumentar si el átomo pierde electrones (oxidación) o disminuir cuando el átomo gana electrones (reducción).

2.17. Colectores de agua lluvia

2.17.1. Tipos de colectores

Los colectores de agua lluvia (Figura 38.) se diseñan según el tipo de muestra que se requiera, pudiendo ser:

- Tipo I: Recolección directa de agua lluvia
- Tipo II: Recolección de agua lluvia que recorre el talud

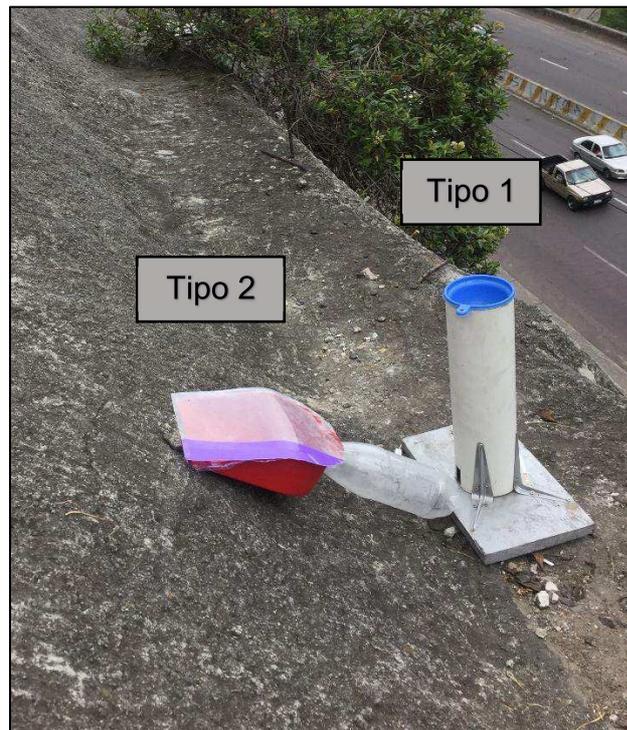


Figura 38. Tipo de colectores de agua lluvia

2.17.2. Diseño de colectores

El material de los envases empleados para la captación son de polietileno (plástico), al ser un elemento transparente se utiliza una protección con un tubo rígido de PVC (policloruro de vinilo), para evitar modificaciones por los rayos solares. Ver Figura 39.

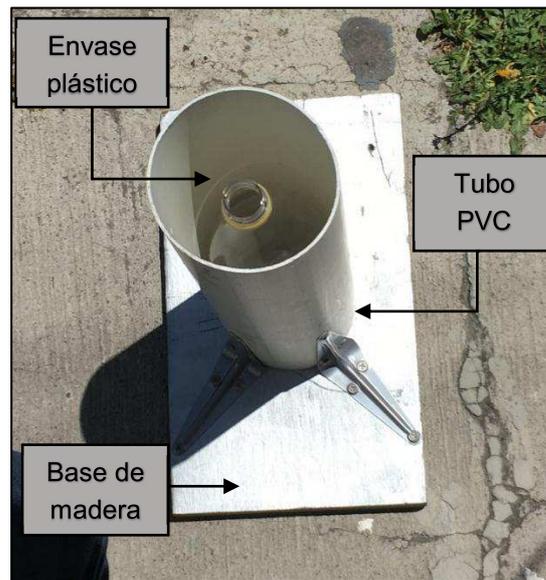


Figura 39. Colector de agua lluvia, Tipo 1

La recolección de agua está expuesta a variaciones térmicas, que ocurren entre el momento más caluroso del día y el momento más frío, entre uno de los procedimientos que soluciona este problema es la aireación. Además se requiere un parafinado en las caras del envase plástico y un embudo con filtro para obtener muestras representativas e inalteradas. Ver Figura 40.



Figura 40. Componentes del colector de agua lluvia

CAPÍTULO III

ELABORACIÓN DEL CASO EN ESTUDIO

3.1. Descripción del sitio

Quito, capital del Ecuador y de la Provincia de Pichincha, está ubicado en la Región Sierra Centro – Norte, a una altitud aproximada de 2800 msnm, es la segunda ciudad más poblada del país, con 2'239.191 habitantes, según los resultados de población y vivienda realizados en el 2010 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC).

El estudio fue desarrollado en los taludes adyacentes a la Av. Velasco Ibarra y Av. Pichincha, en el sector de El Trébol, lugar dónde la infraestructura vial desempeña un papel estratégico para la movilidad cotidiana de los capitalinos, permitiendo enlazar el norte y el sur, además de conectar el Valle de los Chillos con el centro de la ciudad. Esta área es considerada vulnerable por estar ubicada en una zona de alto riesgo sísmico y al haberse suscitado diferentes fenómenos como deslizamientos y

hundimientos de tierra, debido a las fuertes lluvias y drenajes inadecuados ubicados a lo largo del corredor vial.

De igual manera, otro talud en estudio se encuentra ubicado en la Av. Simón Bolívar, a la altura del intercambiador del Valle de los Chillos que conecta el Norte, Sur y Valles de Quito, avenida que es considerada una de las principales vías de transporte, presentando gran afluencia de vehículos dedicados al transporte de carga y pasajeros.

Los sectores poseen accidentes geográficos que han sido aprovechados para la intervención urbana, lo cual hace posible observar la construcción de viviendas y obras de infraestructura muy cerca de las quebradas y taludes.

3.2. Localización geográfica

En el sector del intercambiador de El Trébol, se encuentran los taludes revestidos con hormigón lanzado del barrio La Tola Baja, popular barrio perteneciente al Circuito Itchimbía, del Distrito Metropolitano de Quito.

El Talud N°1 (Figura 41.) se encuentra junto al mural de Manuela Sáenz, en el inicio de la Av. Pichicha, mientras que el Talud N°2 (Figura 42.), se encuentra ubicado en la Av. Velasco Ibarra, sentido Norte-Sur.

Talud N°1: Coordenadas UTM

Este: 777934 m

Norte: 9974400 m

Altura: 2780 m



Figura 41. Talud N°1 ubicado junto al mural de Manuela Sáenz

Talud N°2: Coordenadas UTM

Este: 777996 m

Norte: 9974431 m

Altura: 2780 m

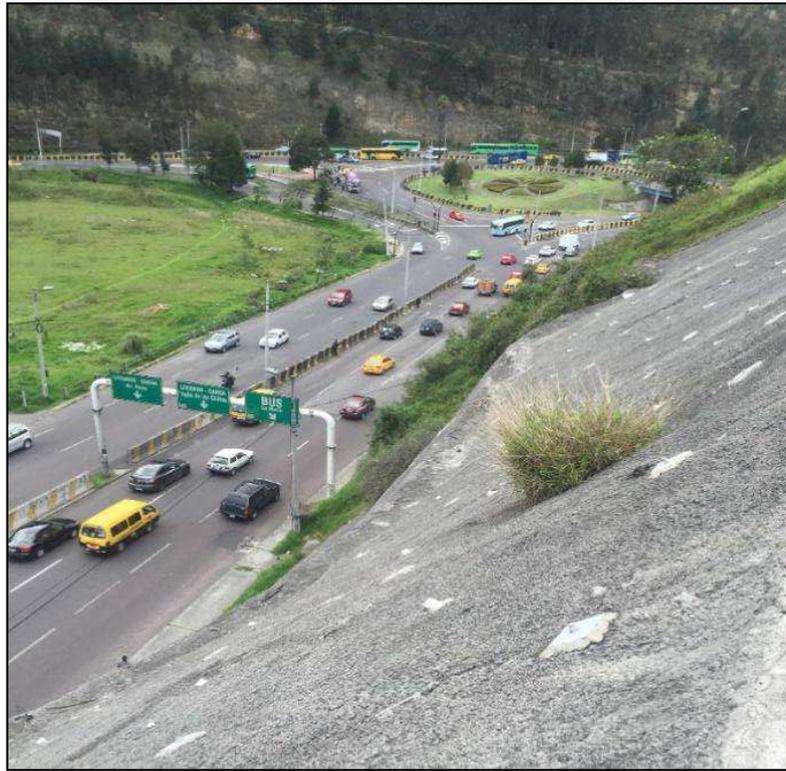


Figura 42. Talud N°2 Av. Velasco Ibarra

En la Figura 43., se muestra el talud revestido con hormigón lanzado ubicado en sector San José de Monjas perteneciente al barrio Patrimonio Familiar, ubicado en la Av. Libertador Simón Bolívar.

Talud N°3: Coordenadas UTM

Este: 779569 m

Norte: 9973921 m

Altura: 2946 m



Figura 43. Talud N°3 Av. Simón Bolívar

3.3. Condiciones climáticas

Quito tiene un clima templado con temperaturas que varían entre 10 °C y 27 °C al estar situado en un valle cerca de la línea ecuatorial, mantiene condiciones primaverales la mayor parte del año. El clima se divide en dos estaciones; el invierno con un período de lluvias prolongado que inicia en octubre hasta finales de mayo, donde la temperatura suele bajar drásticamente, y la estación seca que se da entre los meses de junio y septiembre, alcanzando temperaturas muy altas que oscilan cerca de los 30°C.

3.4. Condiciones geológicas

El Distrito Metropolitano de Quito está ubicado sobre la hoya de Guayllabamba. Está delimitada al norte por el volcán Casitagua, al este por la falla geológica de Quito, al oeste las faldas orientales del Pichincha y por el sur por el Volcán Atacazo (Fonsal, 2007).

La vertiente del Pichincha y el reverso de la cuesta de la grada tectónica están formados principalmente por lavas, tobas y cenizas volcánicas, el conjunto del sitio está cubierto de cenizas volcánicas conocidas como cangahua. Es importante destacar que la cangahua tiene la particularidad de ser susceptible a la erosión hídrica y eólica; ya que se disgrega con facilidad, es necesario proteger los taludes de corte con hormigón lanzado.

3.5. Factores influyentes en la contaminación del aire

3.5.1. Densidad Poblacional

En el Distrito Metropolitano de Quito habitan 2'239.191 personas aproximadamente, distribuidas en 620.045 en la zona rural y 1'619.146 en la zona urbana, según los datos obtenidos por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), en el censo 2010. Dando como resultado una densidad poblacional de 529,3 hab/km² para todo el DMQ.

3.5.2. Tráfico vehicular

Según los datos de la Agencia Metropolitana de Tránsito (AMT), en la ciudad de Quito circulan alrededor de 455.000 vehículos. El tráfico vehicular produce grandes descargas de contaminantes hacia la atmósfera, en Quito el 66% de los contaminantes primarios son producidos por emisiones y está vinculado especialmente a la calidad de los combustibles (PMDOT, 2015).

El diagnóstico de la movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), realizado por la Secretaria de Movilidad, determinó que el crecimiento anual del sector automotor en los últimos oscila entre 5% y 10%, lo que significa la incorporación de 15.000 y 35.000 vehículos por año.

El Hipercentro, es la zona que mayor atracción de viajes genera en el DMQ. El 46.5% de viajes atraídos en transporte público se realizan en esta zona; así como también el 60% de los viajes en transporte privado (PMOT, 2014).

3.5.3. Emisión de gases

La calidad del aire en el DMQ está influenciada por los contaminantes atmosféricos, principalmente por emisiones vehiculares y en zonas específicas, por emisiones industriales.

El control y monitoreo de la calidad del aire se realiza comparando con la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire y las guías de la Organización Mundial de la Salud.

Monóxido de Carbono (CO)

La mayoría de las emisiones de CO provienen del tráfico vehicular. Sin embargo, no se han registrado valores superiores a la NECA, en los meses de marzo - mayo, se reportan las mayores concentraciones, formado en las primeras horas de la mañana. La menor concentración, se registró en la época de vacaciones, donde disminuye el tráfico vehicular. (MDMQ, 2015).

Dióxido de Azufre (SO₂)

Según el informe de calidad del aire de Quito 2015, el dióxido de azufre proveniente de las emisiones de termoeléctricas y de fuentes móviles, ha

superado la guía de la OMS que establece $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Los Chillos, el Camal y Centro (MDMQ, 2015). Ver Figura 44.

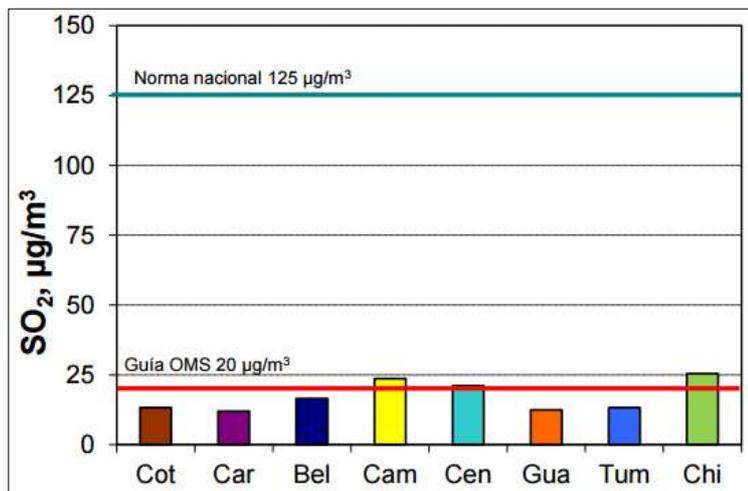


Figura 44. Concentraciones diarias máximas SO_2 , año 2014

Fuente: (MDMQ, 2015)

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Las emisiones de NO_x en Quito provienen principalmente del tráfico vehicular. Las mayores concentraciones se registraron durante los períodos de lluvias y temperaturas bajas, sin embargo las concentraciones máximas en una hora para el NO_2 no fueron superadas en las estaciones según la recomendación en la NECA (MDMQ, 2015). Ver Figura 45.

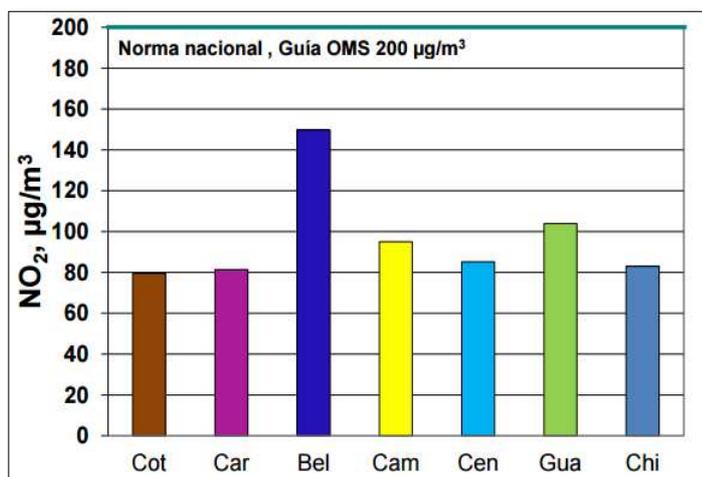


Figura 45. Concentraciones máximas en una hora de NO₂, año 2014

Fuente: (MDMQ, 2015)

Ozono (O₃)

El ozono troposférico se forma por reacciones químicas en el aire entre los hidrocarburos y los NO_x bajo la influencia de la luz solar. Los contaminantes se desplazan hacia las afueras de la ciudad, según la dirección del viento y reaccionan gradualmente con la radiación solar.

Las mayores concentraciones las encontramos en las estaciones del sur del DMQ. Los meses con concentraciones menores son los correspondientes al período con mayor intensidad de lluvias, mientras que las concentraciones altas se dan durante el mes de septiembre (MDMQ, 2015). Ver Figura 46.

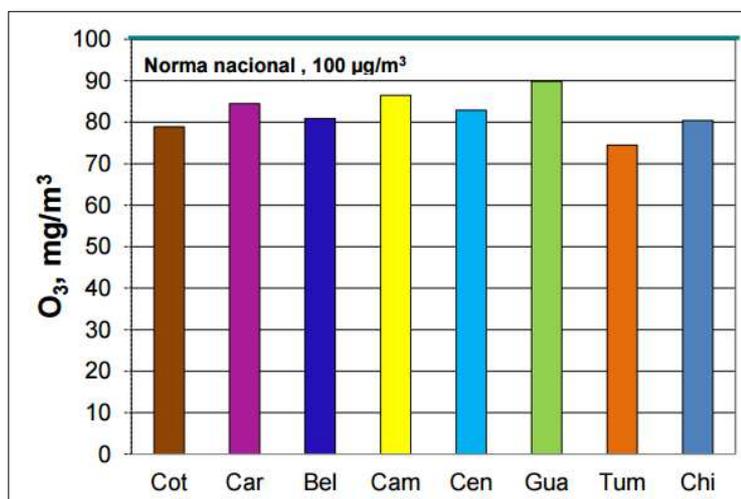


Figura 46. Concentraciones octohorarias máximas para O₃, año 2014

Fuente: (MDMQ, 2015)

3.6. Ensayos destructivos y no destructivos en los taludes en estudio

La realización de los ensayos de campo sobre los taludes revestidos de hormigón lanzado, se basa en las normativas y procedimientos descritos en el Capítulo II.

3.6.1. Ensayo esclerométrico Talud N°1

Tabla 12.

Dirección del impacto

N°	Dirección	Simbología
1	0°	→
2	+45°	↗
3	+90°	↑
4	-45°	↘
5	-90°	↓

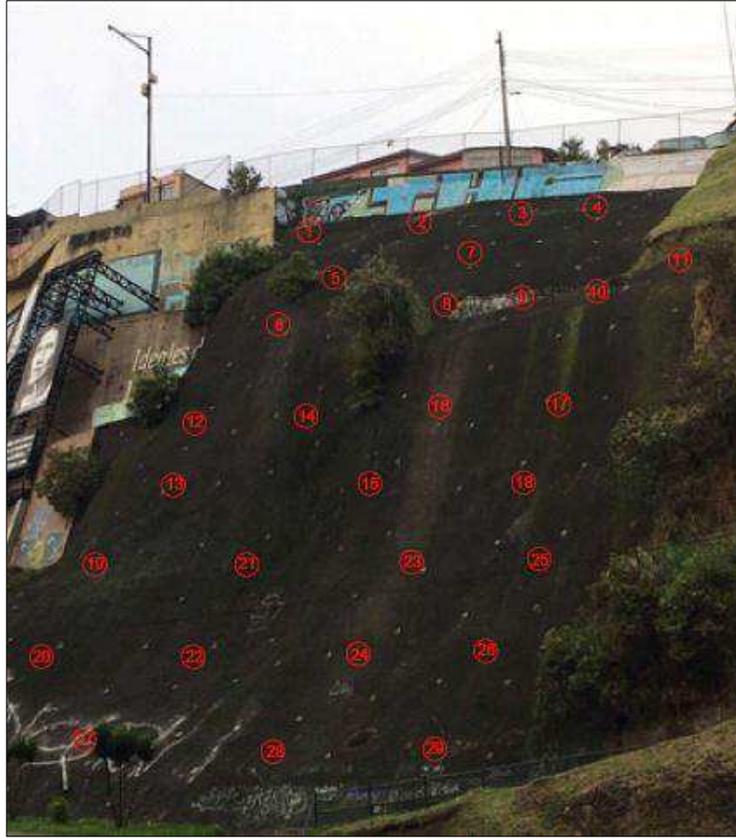


Figura 47. Puntos ensayados con esclerómetro Talud N°1

Tabla 13.

Resultados ensayo esclerométrico Talud N°1

N° Muestra	Índice de rebote (m)	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)	Resistencia f'c (kg/cm ²)	Dirección impacto
1	22.1	25	20	138	4
2	22.9	29	19	149	1
3	19.2	24	15	96	1
4	21.3	27	16	126	1
5	20.9	26	17	120	1
6	19.2	25	17	96	4
7	22.3	27	19	140	4
8	20.0	23	17	107	4
9	21.5	26	16	129	1
10	21.8	25	18	133	4
11	22.2	22	16	95	1
12	20.0	26	17	107	1
13	20.7	24	15	117	1
14	25.6	26	18	152	5
15	23.2	27	18	154	5
16	20.3	24	18	124	4
17	20.1	25	17	109	1
18	22.9	26	19	149	4
19	24.2	30	18	169	1
20	21.9	27	17	135	4
21	21.7	26	19	132	1
22	24.2	31	20	165	5
23	23.0	26	18	152	5
24	21.8	26	16	133	1
25	23.4	29	19	157	4
26	21.1	24	19	123	4
27	22.2	27	18	139	4
28	21.5	26	19	131	1
29	21.3	26	17	140	4

3.6
.2.
En
sa
yo
es
cle
ro
mé
tric
o
Tal
ud
N°
2



Figura 48. Puntos ensayados con esclerómetro Talud N°2

Tabla 14.

Resultados ensayo esclerométrico Talud N°2

N° Muestra	Índice de rebote (m)	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)	Resistencia f_c (kg/cm ²)	Dirección impacto
1	24.3	30	20	170	4
2	25.7	31	21	178	4
3	24.2	30	21	168	1
4	25.9	29	22	195	4
5	24.5	30	22	172	1
6	25.9	29	22	195	4
7	24.5	30	22	176	4
8	24.5	30	22	172	1
9	25.9	29	22	195	4
10	24.3	28	21	170	1
11	22.8	28	17	148	4
12	23.9	29	20	164	4
13	24.6	29	21	175	4
14	24.4	29	20	172	4
15	24.3	28	21	170	1
16	23.4	29	18	173	4
17	24.5	29	22	172	1
18	24.2	31	20	169	4
19	26.4	32	21	203	1

3.6.3. Ensayo esclerométrico Talud N°3



Figura 49. Puntos ensayados con esclerómetro Talud N°3

Tabla 15.

Resultados ensayo esclerométrico Talud N°3

N° Muestra	Índice de rebote (m)	Valor Máximo (m)	Valor Mínimo (m)	Resistencia f_c (kg/cm ²)	Dirección impacto
1	27.8	33	21	225	5
2	27.2	33	22	216	5
3	27.2	31	24	216	1
4	23.8	27	18	168	1
5	26.8	31	23	209	5
6	28.8	33	24	230	5
7	28.2	31	23	232	5
8	26.4	32	21	203	5
9	26.1	28	24	198	4
10	23.3	31	18	169	4
11	26.1	28	24	198	4
12	23.2	25	18	165	5
13	23.3	28	17	168	4
14	23.1	31	18	168	4
15	27.3	34	21	217	5
16	27.5	31	23	221	4
17	26.1	28	24	198	4
18	23.6	28	19	169	5
19	23.2	25	18	168	5
20	24.1	29	20	167	4
21	23.2	25	18	170	5

3.6.4. Ensayo de ultrasonido Talud N°1



Figura 50. Puntos ensayados con ultrasonido Talud N°1

Con los datos obtenidos se determina la ecuación de la recta que mejor se ajuste a los puntos a lo largo de la línea elegida sobre la superficie del hormigón (Figura 51.) y posterior a esto se calcula la pendiente de la recta, lo que significa la velocidad de ultrasonido. Las ecuaciones utilizadas para la compensación de la velocidad de ultrasonido se indican en las gráficas de acuerdo a cada número de muestra. Ver Anexo 1.

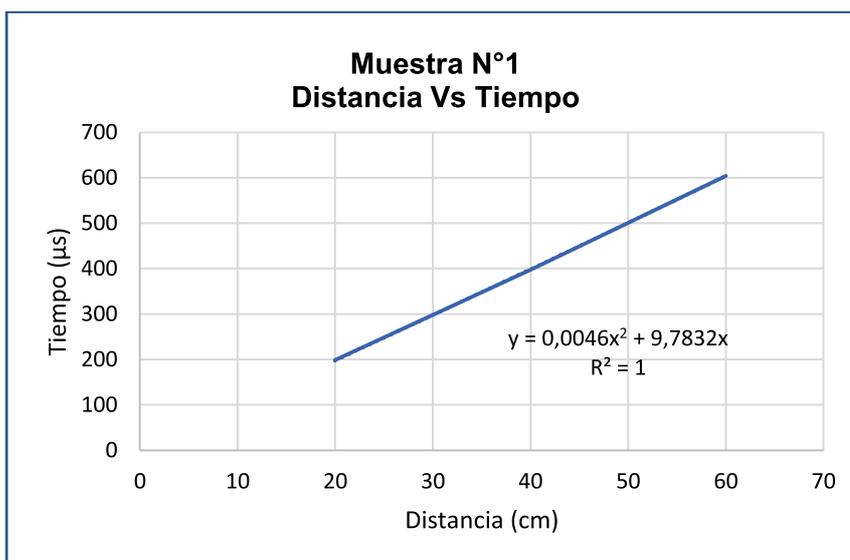


Figura 51. Ecuación de la recta para calcular la pendiente

Tabla 16.

Resultados ensayo de ultrasonido Talud N°1

N° Muestra	Datos obtenidos en campo		Cálculo de velocidad de impulso (transmisión indirecta)			Calidad del hormigón
	Distancia (cm)	Tiempo (µs)	Distancia (cm)	Tiempo (µs)	Velocidad (m/seg)	
M1	20	198.5	20	197.504	1012.64	Muy Pobre
	40	397.7	40	398.688	1003.29	Muy Pobre
	60	603.9	60	603.552	994.11	Muy Pobre
M2	20	195.4	20	199.794	1001.03	Muy Pobre
	40	404.6	40	400.148	999.63	Muy Pobre
	60	599.7	60	601.062	998.23	Muy Pobre
M3	20	210.5	20	207.94	961.82	Muy Pobre
	40	408.7	40	411.32	972.48	Muy Pobre
	60	610.9	60	610.14	983.38	Muy Pobre
M4	20	197.4	20	199.578	1002.11	Muy Pobre
	40	401.5	40	399.396	1001.51	Muy Pobre
	60	598.6	60	599.454	1000.91	Muy Pobre
M5	20	218.2	20	219.14	912.66	Muy Pobre
	40	437.4	40	436.44	916.51	Muy Pobre
	60	651.6	60	651.9	920.39	Muy Pobre
M6	20	213.1	20	211.54	945.45	Muy Pobre
	40	412.3	40	413.88	966.46	Muy Pobre
	60	607.5	60	607.02	988.44	Muy Pobre
M7	20	211.1	20	213.348	937.44	Muy Pobre

	40	410.3	40	426.696	937.44	Muy Pobre
	60	606.5	60	640.044	937.44	Muy Pobre
M8	20	185.5	20	184.812	1082.18	Muy Pobre
	40	373.7	40	374.344	1068.54	Muy Pobre
	60	568.9	60	568.596	1055.23	Muy Pobre
M9	20	215.4	20	210.46	950.30	Muy Pobre
	40	410.6	40	415.48	962.74	Muy Pobre
	60	616.8	60	615.06	975.51	Muy Pobre
M10	20	205.2	20	203.3	983.77	Muy Pobre
	40	404.4	40	406.28	984.54	Muy Pobre
	60	609.6	60	608.94	985.32	Muy Pobre
M11	20	192.8	20	191.648	1043.58	Muy Pobre
	40	388.7	40	389.776	1026.23	Muy Pobre
	60	594.9	60	594.384	1009.45	Muy Pobre
M12	20	212.5	20	211.06	947.60	Muy Pobre
	40	412.3	40	413.72	966.84	Muy Pobre
	60	608.5	60	607.98	986.87	Muy Pobre
M13	20	213.5	20	211.1	947.42	Muy Pobre
	40	412.7	40	415.16	963.48	Muy Pobre
	60	612.9	60	612.18	980.10	Muy Pobre
M14	20	213.5	20	212.68	940.38	Muy Pobre
	40	420.7	40	421.6	948.77	Muy Pobre
	60	626.9	60	626.76	957.30	Muy Pobre
M15	20	212.5	20	211.12	947.33	Muy Pobre
	40	412	40	413.36	967.68	Muy Pobre
	60	607.2	60	606.72	988.92	Muy Pobre
M16	20	201.8	20	196.39	1018.38	Muy Pobre
	40	388.7	40	394.06	1015.07	Muy Pobre
	60	594.9	60	593.01	1011.79	Muy Pobre
M17	20	211.1	20	208.6	958.77	Muy Pobre
	40	409.3	40	411.84	971.25	Muy Pobre
	60	610.5	60	609.72	984.06	Muy Pobre
M18	20	212.7	20	209.62	954.11	Muy Pobre
	40	408.9	40	411.96	970.97	Muy Pobre
	60	608.1	60	607.02	988.44	Muy Pobre
M19	20	213.8	20	211.04	947.69	Muy Pobre
	40	411	40	413.84	966.56	Muy Pobre
	60	609.2	60	608.4	986.19	Muy Pobre
M20	20	215.4	20	216.16	925.24	Muy Pobre
	40	428.6	40	427.84	934.93	Muy Pobre
	60	634.8	60	635.04	944.82	Muy Pobre

3.6.5. Ensayo de ultrasonido Talud N°2



Figura 52. Puntos ensayados con ultrasonido Talud N°2

Tabla 17.

Resultados ensayo de ultrasonido Talud N°2

N° Muestra	Datos obtenidos en campo		Cálculo de velocidad de impulso (transmisión indirecta)			Calidad del hormigón
	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/seg)	
M1	20	170.2	20	172.038	1162.53	Muy Pobre
	40	349.4	40	347.516	1151.03	Muy Pobre
	60	525.9	60	526.434	1139.74	Muy Pobre
M2	20	161.2	20	162.904	1227.72	Muy Pobre
	40	330.4	40	328.768	1216.66	Muy Pobre
	60	496.9	60	497.592	1205.81	Muy Pobre
M3	20	168.2	20	166.372	1202.13	Muy Pobre
	40	331.7	40	333.624	1198.95	Muy Pobre
	60	502.2	60	501.756	1195.80	Muy Pobre
M4	20	173.2	20	174.554	1145.78	Muy Pobre
	40	352.4	40	350.948	1139.77	Muy Pobre
	60	528.9	60	529.182	1133.83	Muy Pobre
M5	20	164.2	20	165.42	1209.04	Muy Pobre
	40	333.4	40	332.2	1204.09	Muy Pobre

	60	499.9	60	500.34	1199.18	Muy Pobre
M6	20	165.2	20	165.296	1209.95	Muy Pobre
	40	333.4	40	333.232	1200.36	Muy Pobre
	60	503.9	60	503.808	1190.93	Muy Pobre
M7	20	176.2	20	177.42	1127.27	Muy Pobre
	40	355.4	40	354.2	1129.31	Muy Pobre
	60	529.9	60	530.34	1131.35	Muy Pobre
M8	20	169.2	20	169.162	1182.30	Muy Pobre
	40	340.4	40	340.484	1174.80	Muy Pobre
	60	513.9	60	513.966	1167.39	Muy Pobre
M9	20	158.2	20	159.382	1254.85	Muy Pobre
	40	317.4	40	316.284	1264.69	Muy Pobre
	60	470.2	60	470.706	1274.68	Muy Pobre
M10	20	179.2	20	180.168	1110.08	Muy Pobre
	40	357.6	40	356.656	1121.53	Muy Pobre
	60	529.1	60	529.464	1133.22	Muy Pobre
M11	20	160.2	20	160.452	1246.48	Muy Pobre
	40	319.4	40	319.064	1253.67	Muy Pobre
	60	475.9	60	475.836	1260.94	Muy Pobre
M12	20	161.2	20	162.904	1227.72	Muy Pobre
	40	330.4	40	328.768	1216.66	Muy Pobre
	60	496.9	60	497.592	1205.81	Muy Pobre
M13	20	152.2	20	153.42	1303.61	Muy Pobre
	40	311.4	40	310.2	1289.49	Muy Pobre
	60	469.9	60	470.34	1275.67	Muy Pobre
M14	20	173.2	20	174.554	1145.78	Muy Pobre
	40	352.4	40	350.948	1139.77	Muy Pobre
	60	528.9	60	529.182	1133.83	Muy Pobre
M15	20	154.2	20	155.42	1286.84	Muy Pobre
	40	313.4	40	312.2	1281.23	Muy Pobre
	60	469.9	60	470.34	1275.67	Muy Pobre
M16	20	175.2	20	176.244	1134.79	Muy Pobre
	40	354.4	40	353.288	1132.22	Muy Pobre
	60	530.9	60	531.132	1129.66	Muy Pobre
M17	20	174.1	20	173.762	1151.00	Muy Pobre
	40	343.3	40	343.684	1163.86	Muy Pobre
	60	509.8	60	509.766	1177.01	Muy Pobre
M18	20	167.2	20	167.974	1190.66	Muy Pobre
	40	336.4	40	335.548	1192.08	Muy Pobre
	60	502.6	60	502.722	1193.50	Muy Pobre

3.6.6. Ensayo de ultrasonido Talud N°3

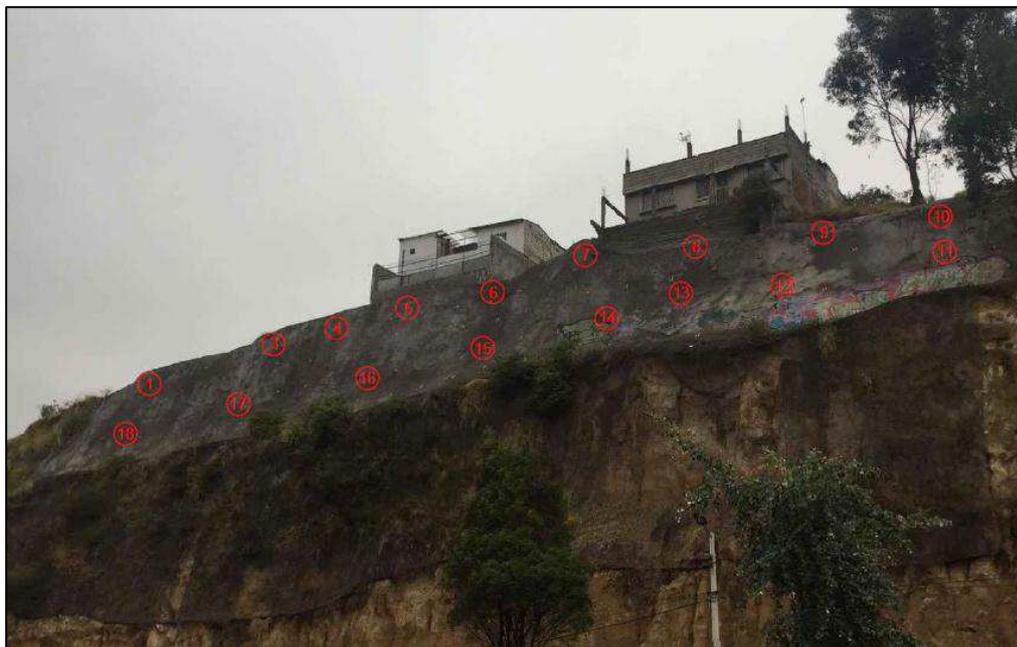


Figura 53. Puntos ensayados con ultrasonido Talud N°3

Tabla 18.

Resultados de ensayo de ultrasonido, Talud N°3

N° Muestra	Datos obtenidos en campo		Cálculo de velocidad de impulso (transmisión indirecta)			Calidad del hormigón
	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Distancia (cm)	Tiempo (μ s)	Velocidad (m/seg)	
M1	20	120.5	20	121.622	1644.44	Muy Pobre
	40	250.2	40	249.084	1605.88	Muy Pobre
	60	382	60	382.386	1569.10	Muy Pobre
M2	20	111.5	20	114.074	1753.25	Muy Pobre
	40	231.2	40	228.708	1748.95	Muy Pobre
	60	342.9	60	343.902	1744.68	Muy Pobre
M3	20	132.5	20	133.312	1500.24	Muy Pobre
	40	272.2	40	271.344	1474.14	Muy Pobre
	60	413.9	60	414.096	1448.94	Muy Pobre
M4	20	117.5	20	117.518	1701.87	Muy Pobre
	40	237.2	40	237.116	1686.94	Muy Pobre
	60	358.9	60	358.794	1672.27	Muy Pobre
M5	20	124.5	20	125.004	1599.95	Muy Pobre
	40	254.2	40	253.688	1576.74	Muy Pobre

	60	385.9	60	386.052	1554.19	Muy Pobre
M6	20	110.5	20	110.074	1816.96	Muy Pobre
	40	220.2	40	220.708	1812.35	Muy Pobre
	60	331.9	60	331.902	1807.76	Muy Pobre
M7	20	116.5	20	116.364	1718.74	Muy Pobre
	40	231.2	40	231.288	1729.45	Muy Pobre
	60	344.9	60	344.772	1740.28	Muy Pobre
M8	20	127.5	20	129.106	1549.11	Muy Pobre
	40	257.2	40	255.572	1565.12	Muy Pobre
	60	378.9	60	379.398	1581.45	Muy Pobre
M9	20	118.5	20	119.972	1667.06	Muy Pobre
	40	238.2	40	236.824	1689.02	Muy Pobre
	60	349.9	60	350.556	1711.57	Muy Pobre
M10	20	139.5	20	137.972	1449.57	Muy Pobre
	40	275.2	40	276.824	1444.96	Muy Pobre
	60	416.9	60	416.556	1440.38	Muy Pobre
M11	20	120.5	20	121.622	1644.44	Muy Pobre
	40	240.2	40	239.004	1673.61	Muy Pobre
	60	351.9	60	352.146	1703.84	Muy Pobre
M12	20	121.5	20	121.518	1645.85	Muy Pobre
	40	241.2	40	241.116	1658.95	Muy Pobre
	60	358.9	60	358.794	1672.27	Muy Pobre
M13	20	132.5	20	132.384	1510.76	Muy Pobre
	40	262.2	40	262.368	1524.58	Muy Pobre
	60	389.9	60	389.952	1538.65	Muy Pobre
M14	20	113.5	20	114.952	1739.86	Muy Pobre
	40	233.2	40	231.744	1726.04	Muy Pobre
	60	349.9	60	350.376	1712.45	Muy Pobre
M15	20	124.5	20	125.004	1599.95	Muy Pobre
	40	254.2	40	253.688	1576.74	Muy Pobre
	60	385.9	60	386.052	1554.19	Muy Pobre
M16	20	135.5	20	136.488	1465.33	Muy Pobre
	40	275.2	40	274.256	1458.49	Muy Pobre
	60	412.9	60	413.304	1451.72	Muy Pobre
M17	20	116.5	20	118.282	1690.87	Muy Pobre
	40	236.2	40	234.484	1705.87	Muy Pobre
	60	347.9	60	348.606	1721.14	Muy Pobre
M18	20	127.5	20	127.518	1568.41	Muy Pobre
	40	257.2	40	257.116	1555.72	Muy Pobre
	60	388.9	60	388.794	1543.23	Muy Pobre

3.6.7. Control de fisuras Talud N°1

Medición de fisuras Talud N°1



Figura 54. Medición de fisuras Talud N°1

Tabla 19.

Medición de fisuras Talud N°1

Medición de fisuras Talud N°1		
Fisura N°1		
Coordenadas UTM		
X	Y	Altitud
777.910 km	9974.404 km	2765.78 m
Clase de fisura		Largo (m) Ancho (mm)
Longitudinal		5.35 5
Fisura N°2		
Coordenadas UTM		
X	Y	Altitud
777.916 km	9974.402 km	2765.31 m
Clase de fisura		Largo (m) Ancho (mm)
Longitudinal		4.20 4

3.6.8. Control de fisuras Talud N°2

Tabla 20.

Medición de fisuras talud N°2

Medición de fisuras Talud N° 2		
Fisura N°1		
Coordenadas UTM		
X	Y	Altitud
777.976 km	9974.411 km	2764.98 m
Clase de fisura	Largo (m)	Ancho (mm)
Transversal	0.82	5
Fisura N°2		
Coordenadas UTM		
X	Y	Altitud
777.974 km	9974.398 km	2762.01 m
Clase de fisura	Largo (m)	Ancho (mm)
Transversal	0.45	3
Fisura N°3		
Coordenadas UTM		
X	Y	Altitud
777.990 km	9974.396 km	2757.97 m
Clase de fisura	Largo (m)	Ancho (mm)
Transversal	0.60	4
Fisura N°4		
Coordenadas UTM		
X	Y	Altitud
777.991 km	9974.393 km	2756.76 m
Clase de fisura	Largo (m)	Ancho (mm)
Transversal	0.60	5

3.6.9. Ensayo de carbonatación por fenolftaleína Talud N°1

El ensayo de fenolftaleína para determinar la presencia de carbonatación se aplicó a tres muestras (testigos) de hormigón, extraídas de los taludes en estudio. La solución empleada en el ensayo es fenolftaleína al 1%.

Muestras extraídas Talud N°1

Se pulverizó la solución sobre los testigos de hormigón, obteniendo en las tres muestras 19.5 mm de hormigón carbonatado. Ver Figura 55.



Figura 55. Ensayo de carbonatación Talud N°1

Cálculo velocidad de carbonatación

- Talud N°1

Datos:

$$X_{\text{co2}} = 19.5 \text{ mm}$$

$$T = 9 \text{ años}$$

$$X_{CO_2} = V_{CO_2} \sqrt{T}$$

$$19.5 \text{ mm} = V_{CO_2} \sqrt{9 \text{ años}}$$

$$V_{CO_2} = 6.50 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Si se conoce el espesor del recubrimiento (X_{Rec}) y la velocidad de carbonatación (dato obtenido), se puede predecir en cuantos años se produciría la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón.

$$X_{Rec} = V_{CO_2} \sqrt{T}$$

$$25 \text{ mm} = 6.5 \sqrt{T}$$

$$T \cong 15 \text{ años}$$

3.6.10. Ensayo de carbonatación por fenolftaleína Talud N°2

Se pulverizó la solución sobre los testigos de hormigón, obteniendo en las tres muestras 20 mm de hormigón carbonatado. Ver Figura 56.



Figura 56. Ensayo de carbonatación Talud N°2

Cálculo velocidad de carbonatación

- Talud N°2

Datos:

$$X_{co2} = 20 \text{ mm}$$

$$T = 7 \text{ años}$$

$$X_{co2} = V_{co2} \sqrt{T}$$

$$20 \text{ mm} = V_{co2} \sqrt{7 \text{ años}}$$

$$V_{co2} = 7.56 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Si se conoce el espesor del recubrimiento (X_{Rec}) y la velocidad de carbonatación (dato obtenido), se puede predecir en cuantos años se produciría la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón.

$$X_{Rec} = V_{co2} \sqrt{T}$$

$$28 \text{ mm} = 7.56 \sqrt{T}$$

$$T \cong 14 \text{ años}$$

3.6.11. Ensayo de carbonatación por fenolftaleína Talud N°3

Se pulverizó la solución sobre los testigos de hormigón, obteniendo en las tres muestras 7 mm de hormigón carbonatado. Ver Figura 57.



Figura 57. Ensayo de carbonatación Talud N°3

Cálculo velocidad de carbonatación

- Talud N°3

Datos:

$$X_{co2} = 7 \text{ mm}$$

$$T = 2 \text{ años}$$

$$X_{co2} = V_{co2} \sqrt{T}$$

$$7 \text{ mm} = V_{co2} \sqrt{2 \text{ años}}$$

$$V_{co2} = 5 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Si se conoce el espesor del recubrimiento (X_{Rec}) y la velocidad de carbonatación (dato obtenido), se puede predecir en cuantos años se produciría la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón.

$$X_{Rec} = V_{co2} \sqrt{T}$$

$$60 \text{ mm} = 5 \sqrt{T}$$

$$T \cong 145 \text{ años}$$

3.7. Control y monitoreo de las muestras de agua lluvia

3.7.1. Colocación de los colectores

La colocación de los colectores se realiza en sitios libres de vandalismo, además de ser ubicados directamente sobre cada uno de los taludes, siendo dos colectores de Tipo 1 y uno de Tipo 2. Los colectores Tipo 1 son para la recolección diaria y para la recolección acumulada, cabe recalcar que en la recolección de lluvia diaria, después de tomar la muestra el envase será vaciado y en la recolección acumulada se mantendrá el contenido. El colector Tipo 2, se ubica de tal manera que recoja el agua lluvia que ha recorrido por la superficie del talud.

3.7.2. Recolección y almacenamiento de las muestras

El monitoreo se realizó durante tres meses en el periodo Febrero-Abril de 2016. Las muestras se recolectaron a pocas horas de haberse producido la precipitación. Previo a cada toma de muestra se midió la acidez del agua lluvia con papel indicador de pH como se muestra en la Figura 46.



Figura 58. Medición de pH en campo

Una vez medido el pH, se procede a tomar la temperatura de las muestras recolectadas. Ver Figura 47.



Figura 59. Medición de temperatura en campo

Según las indicaciones de la Agencia de Protección Ambiental las muestras fueron colocadas en recipientes esterilizados (Figura 48) y almacenadas a 4°C (EPA, 1993). Además se utilizan etiquetas adhesivas, en ellas consta el lugar, tipo de muestra y fecha de recolección.



Figura 60. Almacenamiento de las muestras de agua lluvia

3.8. Ensayos en las muestras de agua lluvia

3.8.1. Muestra de agua lluvia Talud N°1

Tabla 21.

Resultados en muestra de agua sobre el talud Talud N°1

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	23/02/2015	12:45:00	Transparente	6.60	26.20				
2	24/02/2015	11:15:00	Transparente	6.71	23.20	76.60	44.8	243.00	10
3	06/03/2016	16:50:00	Amarillenta	6.72	21.80	93.50	48.8	251.90	10
4	07/03/2016	16:35:00	Transparente	6.71	21.80	91.70	48.1	258.10	10
5	11/03/2016	11:30:00	Transparente	7.10	24.60	127.10	65.7	246.00	10
6	14/03/2016	13:45:00	Transparente	6.81	22.10	125.40	70.2	242.00	10
7	21/03/2016	13:15:00	Amarillenta	7.00	21.70	75.60	42.1	244.40	10
8	29/03/2016	17:15:00	Transparente	7.06	21.50	73.60	45.3	225.70	10
9	30/03/2016	16:30:00	Transparente	6.50	25.00	80.50	51.2	227.50	10
10	02/04/2016	11:15:00	Amarillenta	7.02	25.00	85.10	43.5	239.80	10
11	04/04/2016	14:45:00	Transparente	7.07	25.00	80.20	42.1	231.20	10
12	06/04/2016	14:00:00	Amarillenta	6.73	25.00	95.50	48.2	227.00	10
13	07/04/2016	16:30:00	Amarillenta	6.70	25.00	92.50	50.2	226.30	10

Tabla 22.

Resultados en muestra de agua diaria Talud N°1

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	01/02/2015	13:30:00	Transparente	6.12	30.80				
2	05/02/2015	13:20:00	Transparente	6.61	25.60				
3	22/02/2015	12:15:00	Transparente	6.41	24.80				
4	23/02/2015	12:45:00	Transparente	6.02	26.50				
5	24/02/2015	11:15:00	Transparente	6.71	22.50				
6	03/03/2016	13:45:00	Transparente	6.52	21.80	34.60	17.89	231.20	5
7	06/03/2016	16:50:00	Transparente	6.27	20.50	36.50	20.1	244.20	5
8	07/03/2016	16:35:00	Transparente	5.92	22.70	25.90	12.76	231.20	5
9	09/03/2016	14:35:00	Transparente	6.05	21.80	35.20	17.5	239.30	5
10	11/03/2016	11:30:00	Transparente	6.24	23.90	38.60	20.22	242.20	5
11	14/03/2016	13:45:00	Transparente	6.42	21.60	25.80	12.67	255.90	5
12	21/03/2016	13:15:00	Transparente	7.23	21.60	34.60	17.89	231.20	5
13	29/03/2016	17:15:00	Transparente	6.14	25.00	25.69	15.3	247.80	5
14	30/03/2016	16:30:00	Transparente	6.62	25.00	25.70	15.9	276.80	5
15	02/04/2016	11:15:00	Transparente	6.53	21.80	32.40	17.41	276.40	5
16	04/04/2016	14:45:00	Transparente	6.75	25.00	35.60	17.52	231.10	5
17	06/04/2016	14:00:00	Transparente	7.27	25.00	34.90	17.95	263.20	5
18	07/04/2016	16:30:00	Transparente	7.25	21.58	32.20	18.8	246.30	5

Tabla 23.

Resultados en muestra de agua acumulada Talud N°1

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	02/02/2015	11:00:00	Transparente	6.60	26.60				
2	03/02/2015	13:35:00	Transparente	5.61	23.90				
3	05/02/2015	13:20:00	Transparente	7.20	24.50				
4	10/02/2015	13:25:00	Transparente	6.57	24.70				
5	11/02/2015	13:20:00	Transparente	6.42	24.40				
6	22/02/2015	12:15:00	Transparente	6.59	24.90				
7	23/02/2015	12:45:00	Transparente	6.40	27.10				
8	24/02/2015	11:15:00	Transparente	6.83	22.20				
9	26/02/2015	12:30:00	Transparente	6.54	24.60				
10	03/03/2016	13:45:00	Amarillenta	6.96	21.30	13.84	7.9	247.50	5
11	06/03/2016	16:50:00	Amarillenta	6.31	22.30	14.62	8.67	276.60	5
12	07/03/2016	16:35:00	Amarillenta	6.04	22.20	17.14	9.46	277.50	5
13	09/03/2016	14:35:00	Amarillenta	6.32	21.60	17.36	9.11	250.30	5
14	11/03/2016	11:30:00	Amarillenta	6.64	24.80	13.78	7.25	247.50	5
15	14/03/2016	13:45:00	Amarillenta	6.69	22.70	11.82	6.68	259.10	5
16	21/03/2016	13:15:00	Amarillenta	7.57	21.90	12.90	7.11	258.20	5
17	29/03/2016	17:15:00	Amarillenta	6.63	25.00	15.28	8.78	245.90	5
18	30/03/2016	16:30:00	Amarillenta	6.87	25.00	12.61	7.19	247.00	5
19	02/04/2016	11:15:00	Amarillenta	6.77	25.00	11.68	6.62	245.40	5
20	04/04/2016	14:45:00	Amarillenta	6.73	25.00	12.18	6.93	249.30	5
21	06/04/2016	14:00:00	Amarillenta	7.45	25.00	12.5	6.5	247.30	5
22	07/04/2016	16:30:00	Amarillenta	7.51	25.00	13.5	7.5	245.10	5

3.8.2. Muestra de agua lluvia Talud N°2

Tabla 24.

Resultados en muestra de agua sobre el talud Talud N°2

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	22/02/2015	13:00:00	Amarillenta	5.51	24.5				
2	23/02/2015	12:10:00	Transparente	6.88	24.5				
3	24/02/2015	10:45:00	Transparente	6.51	23.4	155.4	78.5	227.90	10
4	06/03/2016	16:00:00	Amarillenta	7.52	21.4	153.9	81.5	236.20	10
5	07/03/2016	16:10:00	Amarillenta	6.87	19.8	109.7	56.8	248.20	10
6	11/03/2016	11:10:00	Transparente	7.29	24.2	143.6	75.6	233.70	10
7	14/03/2016	13:20:00	Amarillenta	6.71	22.0	100.3	55.9	237.90	10
8	21/03/2016	12:45:00	Amarillenta	7.1	21.5	115.8	62.7	239.10	10
9	29/03/2016	16:45:00	Amarillenta	6.59	25.00	152.50	82.6	225.80	10
10	30/03/2016	16:00:00	Transparente	7.26	25.00	151.60	85.2	223.90	10
11	02/04/2016	10:40:00	Transparente	7.05	25.00	122.10	63.3	225.80	10
12	04/04/2016	14:20:00	Amarillenta	6.72	25.00	99.60	55.9	244.70	10
13	06/04/2016	13:30:00	Amarillenta	7.11	25.00	126.30	65.9	202.00	10
14	07/04/2016	16:10:00	Amarillenta	6.87	25.00	120.30	62.9	234.30	10

Tabla 25.

Resultados en muestra de agua diaria Talud N°2

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	01/02/2015	13:00:00	Transparente	5.92	27.10				
2	05/02/2015	13:00:00	Transparente	6.39	25.20				
3	22/02/2015	13:00:00	Transparente	6.51	25.30				
4	23/02/2015	12:10:00	Transparente	6.06	26.40				
5	24/02/2015	10:45:00	Transparente	6.76	23.60				
6	03/03/2016	13:10:00	Transparente	6.37	21.60	17.50	8.75	170.50	5
7	06/03/2016	16:00:00	Transparente	6.06	21.70	16.97	8.49	165.20	5
8	07/03/2016	16:10:00	Transparente	5.97	22.30	14.02	7.01	162.10	5
9	09/03/2016	14:15:00	Transparente	6.13	22.00	13.39	6.70	202.70	5
10	11/03/2016	11:10:00	Transparente	6.11	24.00	13.35	6.68	181.10	5
11	14/03/2016	13:20:00	Transparente	6.86	22.50	13.36	6.68	173.70	5
12	21/03/2016	12:45:00	Transparente	7.30	20.90	12.99	6.50	175.50	5
13	29/03/2016	16:45:00	Transparente	6.15	25.00	10.78	5.39	194.00	5
14	30/03/2016	16:00:00	Transparente	5.78	25.00	13.89	6.95	220.50	5
15	02/04/2016	10:40:00	Transparente	5.79	25.00	15.86	7.93	230.20	5
16	04/04/2016	14:20:00	Transparente	6.39	25.00	13.89	6.95	214.70	5
17	06/04/2016	13:30:00	Transparente	7.30	25.00	13.82	6.91	246.10	5
18	07/04/2016	16:10:00	Transparente	6.87	25.00	10.73	5.37	242.50	5

Tabla 26.

Resultados en muestra de agua acumulada Talud N°2

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (μS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	02/02/2015	10:30:00	Transparente	6.59	25.20				
2	03/02/2015	13:10:00	Transparente	6.11	24.20				
3	05/02/2015	13:00:00	Transparente	6.92	25.00				
4	10/02/2015	13:40:00	Transparente	6.55	24.40				
5	11/02/2015	12:45:00	Transparente	6.42	24.50				
6	22/02/2015	13:00:00	Transparente	6.58	25.00				
7	23/02/2015	12:10:00	Transparente	6.32	27.60				
8	24/02/2015	10:45:00	Transparente	6.85	22.80				
9	26/02/2015	12:00:00	Transparente	6.49	24.30				
10	03/03/2016	13:10:00	Amarillenta	6.70	21.90	15.90	7.95	230.40	5
11	06/03/2016	16:00:00	Amarillenta	6.64	17.30	10.40	5.20	232.40	5
12	07/03/2016	16:10:00	Amarillenta	6.11	21.40	9.95	4.98	231.20	5
13	09/03/2016	14:15:00	Amarillenta	6.19	21.70	8.52	4.26	237.30	5
14	11/03/2016	11:10:00	Amarillenta	6.78	24.90	12.21	6.11	239.60	5
15	14/03/2016	13:20:00	Amarillenta	6.98	21.50	10.98	5.49	243.20	5
16	21/03/2016	12:45:00	Amarillenta	7.59	21.00	10.52	5.26	271.20	5
17	29/03/2016	16:45:00	Amarillenta	6.03	25.00	10.90	5.45	255.60	5
18	30/03/2016	16:00:00	Amarillenta	6.25	25.00	11.30	5.65	263.80	5
19	02/04/2016	10:40:00	Amarillenta	6.41	25.00	10.10	5.05	269.10	5
20	04/04/2016	14:20:00	Amarillenta	6.97	25.00	9.55	4.78	263.90	5
21	06/04/2016	13:30:00	Amarillenta	7.31	25.00	9.90	4.95	254.60	5
22	07/04/2016	16:10:00	Amarillenta	6.99	25.00	11.15	5.58	266.30	5

3.8.3. Muestra de agua lluvia Talud N°3

Tabla 27.

Resultados en muestra de agua sobre el talud Talud N°3

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (μS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	23/02/2015	13:15:00	Transparente	6.96	25.5	97.2	48.6	158.20	10
2	24/02/2015	12:00:00	Amarillenta	6.4	23.1	83.2	41.6	158.50	10
3	06/03/2016	17:15:00	Transparente	6.89	22.2	62.9	31.45	163.70	10
4	11/03/2016	12:00:00	Transparente	6.13	25	96.9	48.45	179.60	10
5	14/03/2016	14:15:00	Amarillenta	7.29	22.9	103.5	51.75	156.80	10
6	21/03/2016	13:40:00	Transparente	7.4	21.3	90.4	45.2	159.00	10
7	29/03/2016	17:45:00	Transparente	7.46	25	68.9	34.45	146.90	10
8	30/03/2016	16:55:00	Amarillenta	7.17	25	62.6	31.3	143.50	10
9	02/04/2016	11:40:00	Transparente	7.14	25	92.2	46.1	145.70	10
10	04/04/2016	15:10:00	Transparente	6.68	25	76.1	38.05	159.80	10
11	06/04/2016	14:30:00	Transparente	7.31	25	75.9	37.95	146.00	10
12	07/04/2016	16:45:00	Transparente	7.03	25	74.8	37.4	131.30	10

Tabla 28.

Resultados en muestra de agua diaria Talud N°3

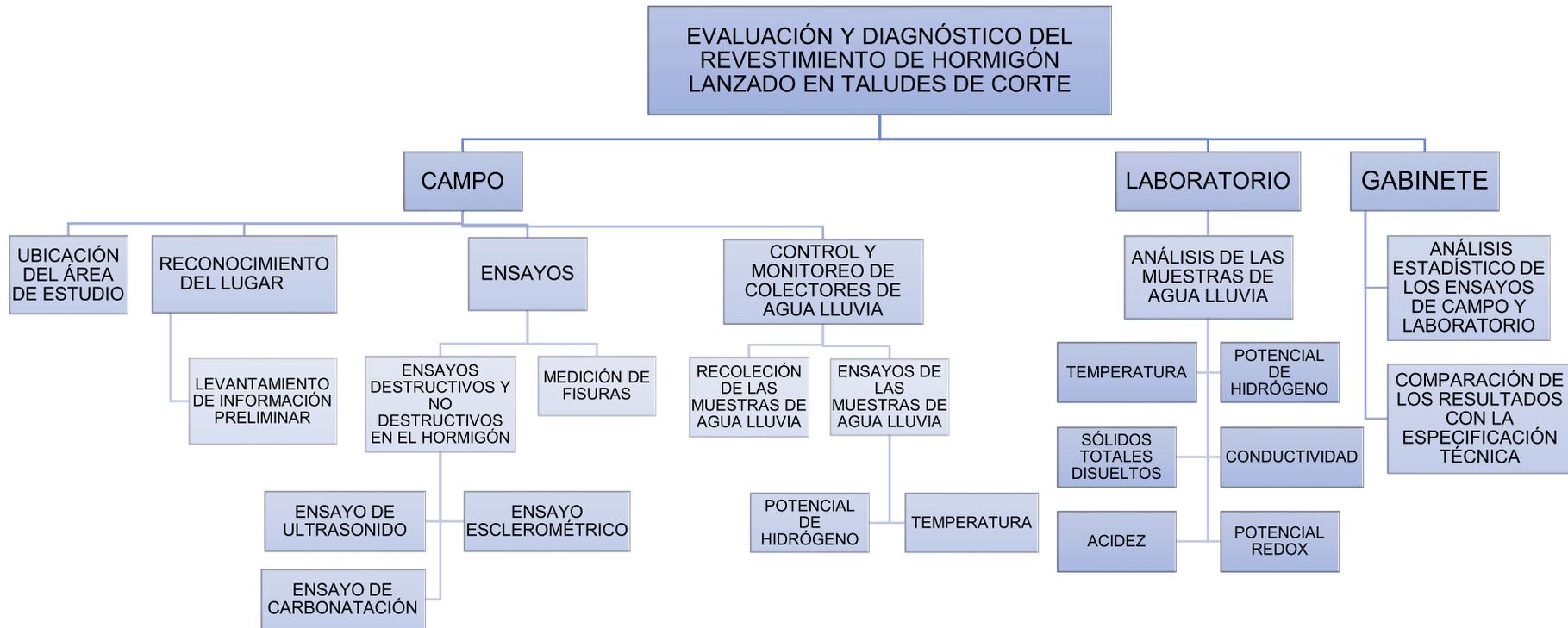
N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	01/02/2015	14:15:00	Amarillenta	5.31	31.60				
2	05/02/2015	14:00:00	Transparente	6.16	25.30				
3	22/02/2015	13:20:00	Transparente	6.36	25.30				
4	23/02/2015	13:15:00	Transparente	5.86	26.30				
5	24/02/2015	12:00:00	Transparente	6.91	22.80				
6	03/03/2016	14:15:00	Transparente	6.38	21.90	16.80	8.40	134.80	5
7	06/03/2016	17:15:00	Transparente	6.87	19.80	16.17	8.09	130.60	5
8	07/03/2016	17:05:00	Transparente	5.89	17.80	12.60	6.30	136.40	5
9	09/03/2016	15:10:00	Transparente	6.11	21.40	14.49	7.25	175.70	5
10	11/03/2016	12:00:00	Transparente	6.26	24.00	16.80	8.40	151.10	5
11	14/03/2016	14:15:00	Transparente	6.69	22.30	16.40	8.20	157.50	5
12	21/03/2016	13:40:00	Transparente	7.18	20.20	10.20	5.10	151.30	5
13	29/03/2016	17:45:00	Transparente	5.98	25.00	12.60	6.30	163.50	5
14	30/03/2016	16:55:00	Transparente	5.86	25.00	14.50	7.25	196.80	5
15	02/04/2016	11:40:00	Transparente	6.02	25.00	11.60	5.80	186.70	5
16	04/04/2016	15:10:00	Transparente	6.10	25.00	10.65	5.33	198.70	5
17	06/04/2016	14:30:00	Transparente	6.87	25.00	11.93	5.97	198.60	5
18	07/04/2016	16:45:00	Transparente	5.67	25.00	11.60	5.80	203.70	5

Tabla 29.

Resultados en muestra de agua acumulada Talud N°3

N° Muestra	Fecha	Hora	Apariencia	pH	Temperatura °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
1	02/02/2015	11:25:00	Amarillenta	5.62	25.40				
2	03/02/2015	13:45:00	Transparente	6.70	23.90				
3	05/02/2015	14:00:00	Transparente	6.84	25.00				
4	10/02/2015	14:10:00	Transparente	6.37	24.60				
5	11/02/2015	14:05:00	Transparente	6.18	24.70				
6	22/02/2015	13:20:00	Transparente	6.41	25.20				
7	23/02/2015	13:15:00	Transparente	6.33	26.80				
8	24/02/2015	12:00:00	Transparente	6.93	22.70				
9	26/02/2015	13:10:00	Transparente	6.47	24.50				
10	03/03/2016	14:15:00	Amarillenta	6.47	21.80	11.84	5.92	185.40	5
11	06/03/2016	17:15:00	Amarillenta	7.21	21.90	8.64	4.32	187.00	5
12	07/03/2016	17:05:00	Amarillenta	6.18	22.20	7.8	3.9	182.50	5
13	09/03/2016	15:10:00	Amarillenta	6.16	19.30	7.98	3.99	196.70	5
14	11/03/2016	12:00:00	Amarillenta	7.42	24.30	7.93	3.965	197.00	5
15	14/03/2016	14:15:00	Amarillenta	6.76	22.50	12.1	6.05	198.20	5
16	21/03/2016	13:40:00	Amarillenta	7.40	21.30	7.8	3.9	202.10	5
17	29/03/2016	17:45:00	Amarillenta	6.46	25.00	8.1	4.05	189.00	5
18	30/03/2016	16:55:00	Amarillenta	5.89	25.00	7.8	3.9	206.10	5
19	02/04/2016	11:40:00	Amarillenta	5.63	25.00	7.61	3.805	211.80	5
20	04/04/2016	15:10:00	Amarillenta	5.64	25.00	7.59	3.795	216.10	5
21	06/04/2016	14:30:00	Amarillenta	6.63	25.00	10.04	5.02	234.00	5
22	07/04/2016	16:45:00	Amarillenta	6.05	25.00	7.9	3.95	224.40	5

3.9. Guía metodológica para la evaluación y diagnóstico del revestimiento de hormigón lanzado en taludes de corte



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PRESUPUESTO

4.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva desarrolla un conjunto de técnicas cuya finalidad es presentar y reducir los diferentes datos obtenidos. Los registros efectuados proporcionan una serie de datos que deben ser ordenados y presentados de una manera clara. La representación de los valores se realiza mediante la tabulación y su posterior representación gráfica (Fernández S. , 2002).

En la estadística descriptiva se emplean diferentes parámetros que se obtienen gracias a una distribución de datos estadísticos y permiten organizar la información por medio de una gráfica o una tabla. Dentro de los más empleados tenemos:

4.1.1. Medidas de tendencia central:

Son indicadores estadísticos que muestran hacia qué valor se agrupan los datos:

- **Media aritmética o promedio:** Se interpreta como el punto de equilibrio del conjunto de datos. La media aritmética es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos.

Fórmula:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N}$$

Donde:

\bar{X} = Es la media aritmética

N = Números de valores obtenidos

4.1.2. Medidas de dispersión

- **Varianza:** Mide la dispersión de las muestras respecto a un valor central. Al presentar mayor valor de la medida de dispersión, la heterogeneidad aumenta. Por el contrario, si el valor es menor, existe más homogeneidad. La varianza es la media del cuadrado de las desviaciones de una variable respecto al valor promedio de ésta.

Fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Donde:

σ^2 = Es la varianza

N = Números de muestras

- **Desviación estándar:** La desviación estándar es la medida de la dispersión de los valores respecto a la media aritmética. Es la raíz cuadrada de la varianza.

Fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{N}}$$

Donde:

σ = Es la desviación estándar

- **Coefficiente de variación:** Es una medida de dispersión relativa de los datos y permite comparar la dispersión o variabilidad de dos o más grupos. Se calcula dividiendo la desviación estándar por la media y multiplicando el cociente por 100 para obtener su porcentaje.

Fórmula:

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

Donde:

Cv = Es el coeficiente de variación

4.2. Análisis de los ensayos destructivos y no destructivos

4.2.1. Análisis ensayo esclerométrico

Tabla 30.

Parámetros estadísticos en ensayo esclerométrico

Parámetros estadísticos	Talud N°1	Talud N°2	Talud N°3
Media Aritmética (f'c en kg/cm ²)	131.62	175.63	194.05
Varianza	409.46	168.69	619.05
Desviación estándar	20.24	12.99	24.88
Coefficiente de variación	15%	7%	13%
Valor máximo	169	203	232
Valor mínimo	95	148	165

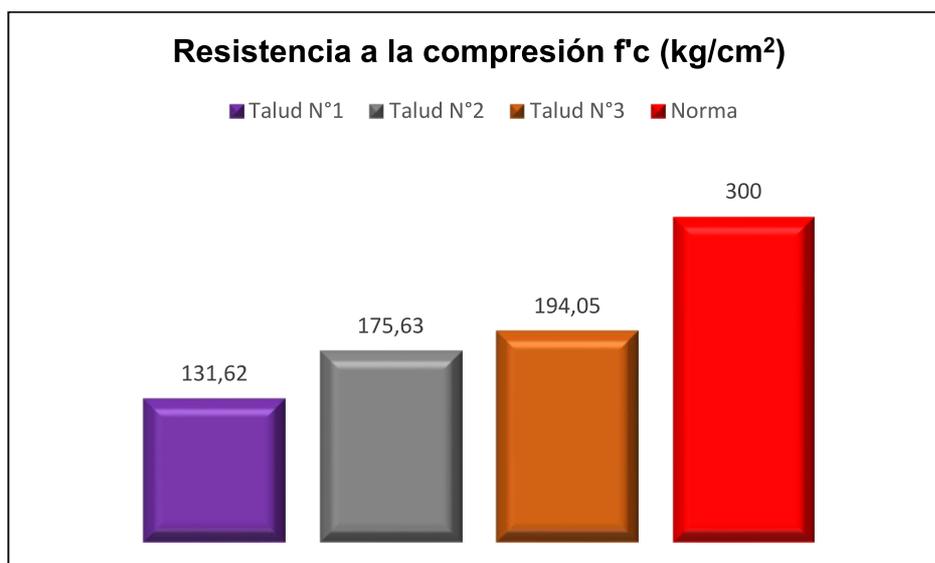


Figura 61. Gráfico comparativo de resistencias a la compresión

Las resistencias a la compresión en el hormigón de revestimiento determinadas en los taludes se encuentran por debajo del patrón de medida, la misma que establece medidas de resistencias mayores a 300 kg/cm².

4.2.2. Análisis en ensayo de ultrasonido

Tabla 31.

Parámetros estadísticos en ensayo de ultrasonido

Parámetros estadísticos	Talud N°1	Talud N°2	Talud N°3
Media Aritmética (Velocidad en m/seg)	977.36	1192.83	1623.12
Varianza	1273.99	2807.70	11315.90
Desviación estándar	35.69	52.99	106.38
Coefficiente de variación	4%	4%	7%
Valor máximo	1082.18	1303.61	1816.96
Valor mínimo	912.66	1110.08	1440.38

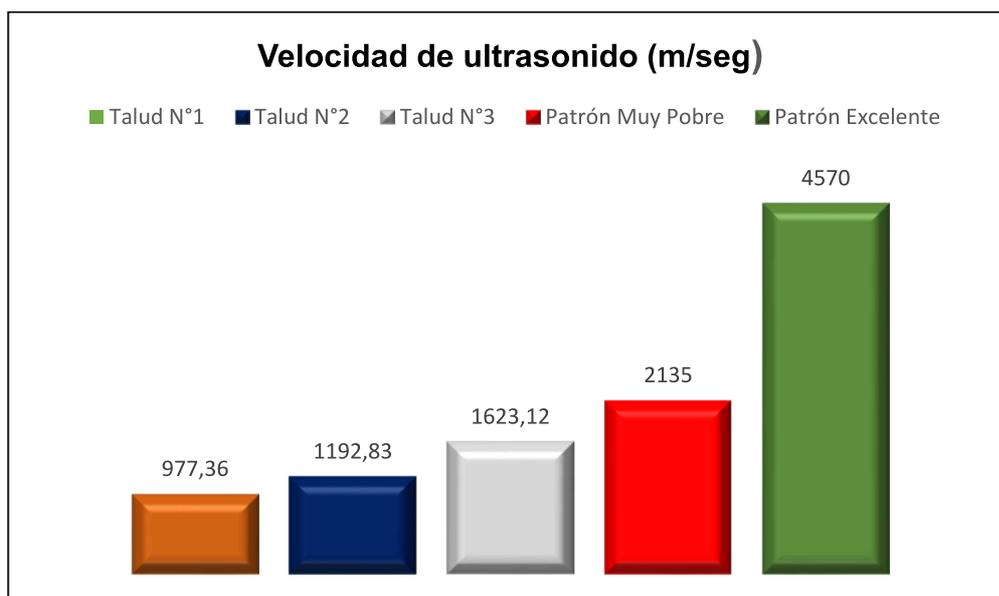


Figura 62. Gráfico comparativo de velocidades de ultrasonido

En la Figura 62., se realiza una comparación de las velocidades de ultrasonido obtenidas en los taludes en estudio con los patrones de especificación técnica; se observa que la calidad del hormigón se encuentra por debajo de la especificación de un hormigón de calidad muy pobre.

4.2.3. Análisis de ensayo de carbonatación por fenolftaleína

Tabla 32.

Parámetros estadísticos en ensayo de carbonatación

	Talud N°1	Talud N°2	Talud N°3
Media aritmética (Velocidad CO ₂ en mm/año ^{1/2})	6.50	7.56	5.00
Media aritmética (Proyección de vida útil en años)	15	14	145

Los taludes N°1 y N°2 presentan velocidades aceleradas de carbonación y los espesores de las muestras de hormigón extraídas en estos taludes no cumplen con las especificaciones técnicas (Figura 63). Sin embargo en el Talud N°3 se observa que la velocidad de carbonatación a pesar de ser alta, no afecta a los años de operación por presentar un espesor de la capa de recubrimiento mayor a la especificación recomendada.

Tabla 33.

Espesores de los taludes en estudio

	Talud N°1	Talud N°2	Talud N°3
Media Aritmética (Espesor en mm)	30.00	35.00	70.00

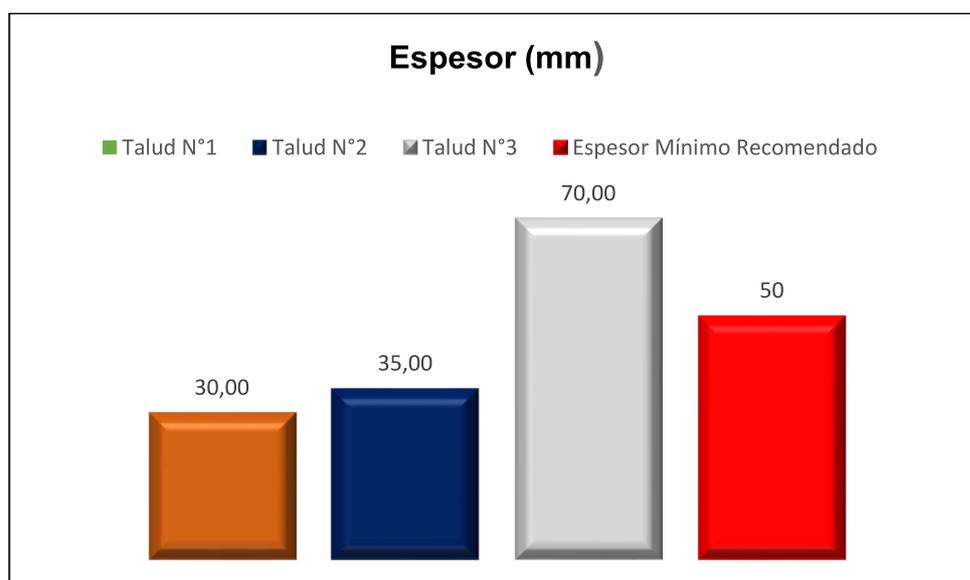


Figura 63. Gráfico comparativo de los espesores

4.2.4. Análisis en ensayo de control de fisuras

La mayoría de las fisuras en los Taludes N°1 y N°2 tienen medidas mayores a las recomendaciones que establece el código ACI para estructuras exteriores y expuestas a ambientes agresivos. En el Talud N°3 al no presentar fisuras significativas se descartan sus valores.

4.3. Análisis de los ensayos en las muestras de agua lluvia

4.3.1. Análisis de los ensayos en muestras de agua Talud N°1

Tabla 34.

Parámetros estadísticos agua diaria Talud N°1

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.50	23.75	32.13	17.07	247.45	5.00
Varianza	0.18	6.27	22.01	5.60	265.37	0.00
Desviación estándar	0.42	2.50	4.69	2.37	16.29	0.00
Coefficiente de variación	6%	11%	15%	14%	7%	0%
Valor máximo	7.27	30.80	38.60	20.22	276.80	5.00
Valor mínimo	5.92	20.50	25.69	12.67	231.10	5.00

Tabla 35.

Parámetros estadísticos en agua acumulada Talud N°1

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (μS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.69	24.08	13.79	7.67	253.59	5.00
Varianza	0.21	2.55	3.48	1.03	128.12	0.00
Desviación estándar	0.46	1.60	1.86	1.01	11.32	0.00
Coefficiente de variación	7%	7%	14%	13%	4%	0%
Valor máximo	7.57	27.10	17.36	9.46	277.50	5.00
Valor mínimo	5.61	21.30	11.68	6.50	245.10	5.00

Tabla 36.

Parámetros estadísticos en agua sobre el Talud N°1

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (μS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.83	23.68	91.44	50.02	238.58	10.00
Varianza	0.04	2.86	320.22	80.05	118.92	0.00
Desviación estándar	0.20	1.69	17.89	8.95	10.91	0.00
Coefficiente de variación	3%	7%	20%	18%	5%	0%
Valor máximo	7.10	26.20	127.10	70.20	258.10	10.00
Valor mínimo	6.50	21.50	73.60	42.10	225.70	10.00

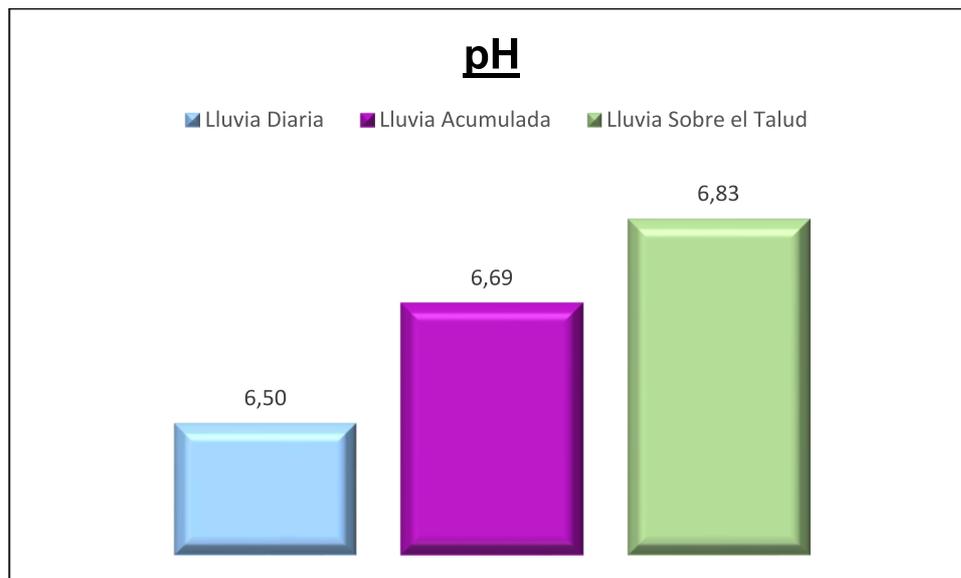


Figura 64. Gráfico comparativo de pH Talud N°1

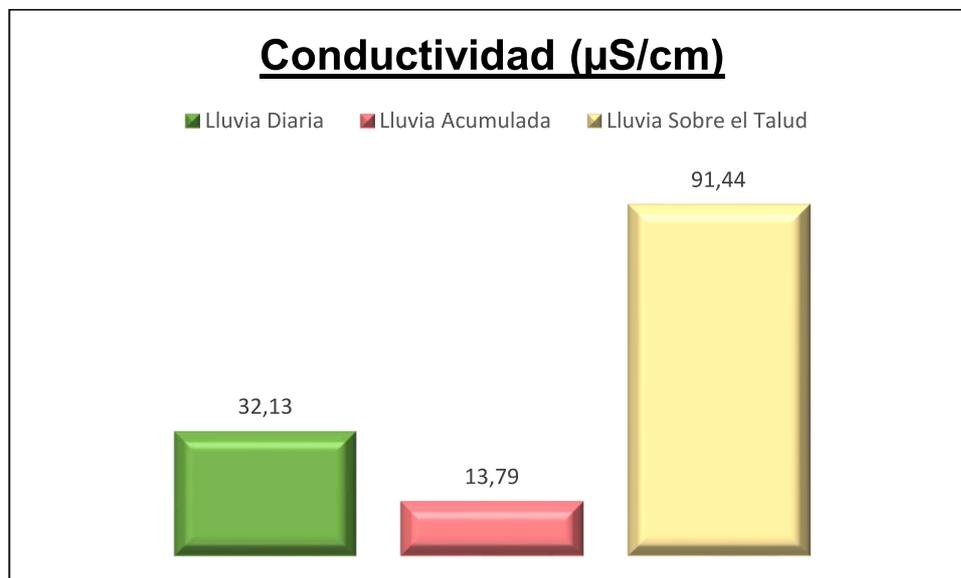


Figura 65. Gráfico comparativo de Conductividad Talud N°1

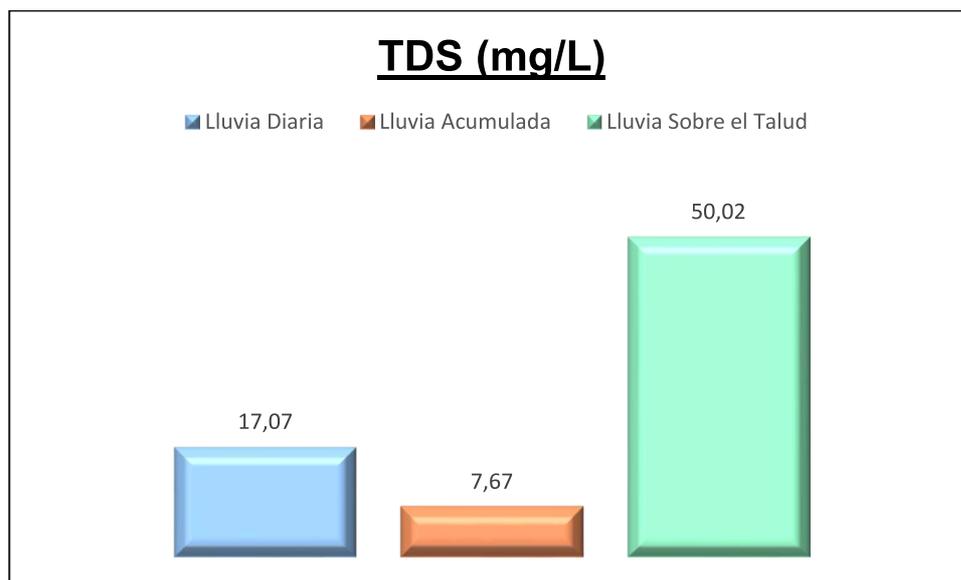


Figura 66. Gráfico comparativo de TDS Talud N°1

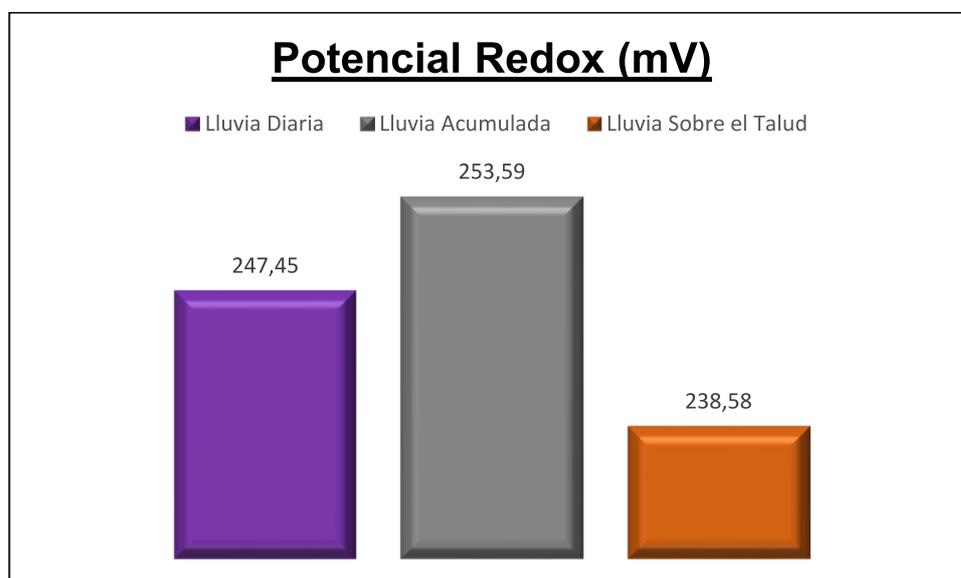


Figura 67. Gráfico comparativo de Potencial Redox Talud N°1

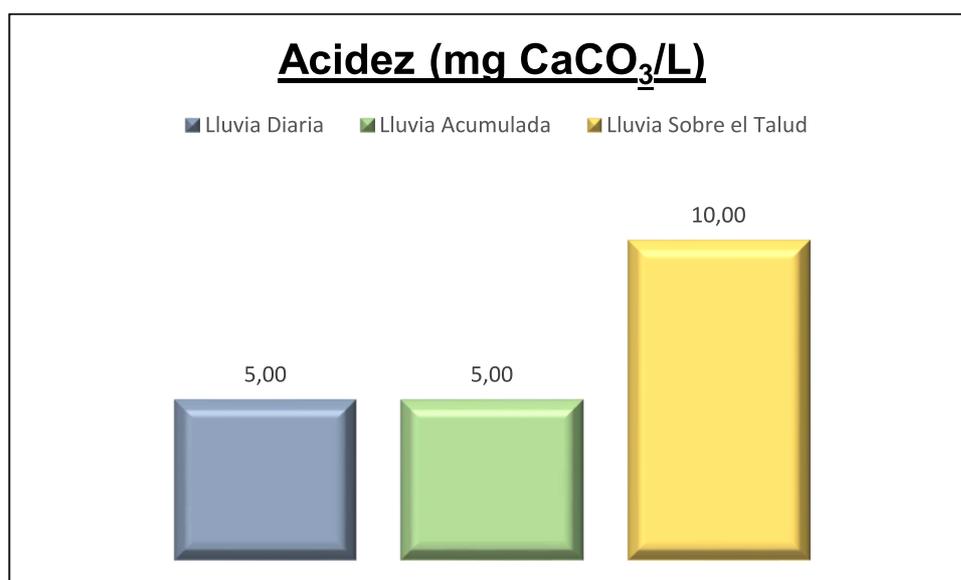


Figura 68. Gráfico comparativo de Acidez Talud N°1

4.3.1. Análisis de los ensayos en muestras de agua Talud N°2

Tabla 37.

Parámetros estadísticos en agua diaria Talud N°2

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (μS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.37	24.03	13.89	6.94	198.37	5.00
Varianza	0.22	3.20	3.98	0.99	887.95	0.00
Desviación estándar	0.47	1.79	1.99	1.00	29.80	0.00
Coefficiente de variación	7%	7%	14%	14%	15%	0%
Valor máximo	7.30	27.10	17.50	8.75	246.10	5.00
Valor mínimo	5.78	20.90	10.73	5.37	162.10	5.00

Tabla 38.

Parámetros estadísticos en agua acumulada Talud N°2

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.56	23.48	10.88	5.44	250.66	5.00
Varianza	0.15	5.47	3.11	0.78	239.46	0.00
Desviación estándar	0.39	2.34	1.76	0.88	15.47	0.00
Coefficiente de variación	6%	10%	16%	16%	6%	0%
Valor máximo	7.59	27.60	15.90	7.95	271.20	5.00
Valor mínimo	6.03	17.30	8.52	4.26	230.40	5.00

Tabla 39.

Parámetros estadísticos en agua sobre el Talud N°2

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.86	23.66	129.26	68.90	231.63	10.00
Varianza	0.23	3.07	450.70	122.58	144.76	0.00
Desviación estándar	0.48	1.75	21.23	11.07	12.03	0.00
Coefficiente de variación	7%	7%	16%	16%	5%	0%
Valor máximo	7.52	25.00	155.40	85.20	248.20	10.00
Valor mínimo	5.51	19.80	99.60	55.90	202.00	10.00

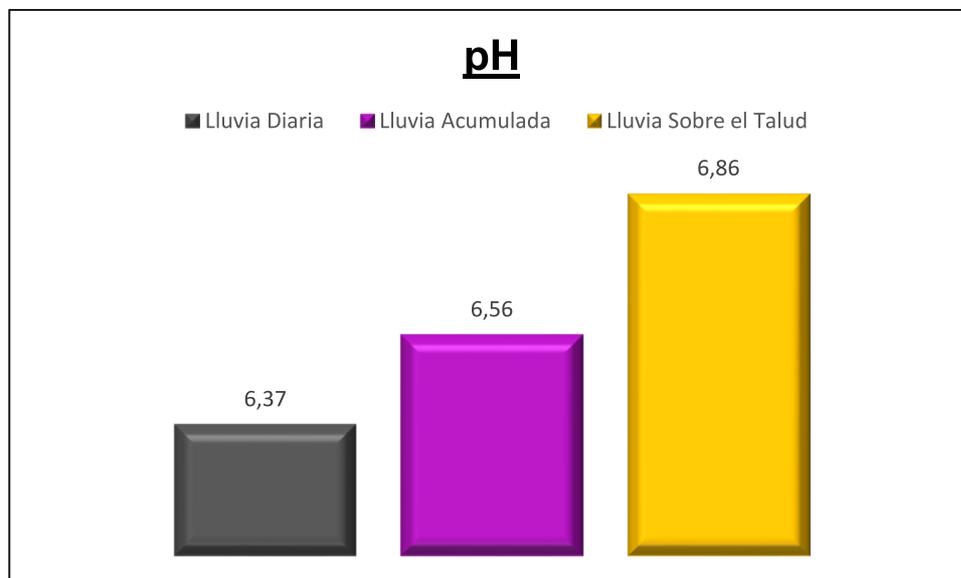


Figura 69. Gráfico comparativo de pH Talud N°2

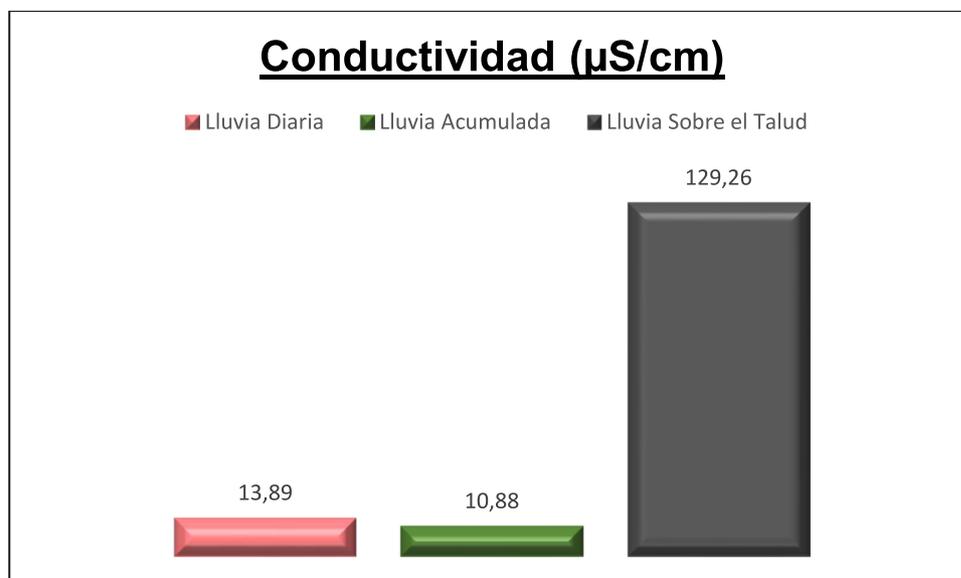


Figura 70. Gráfico comparativo de Conductividad Talud N°2

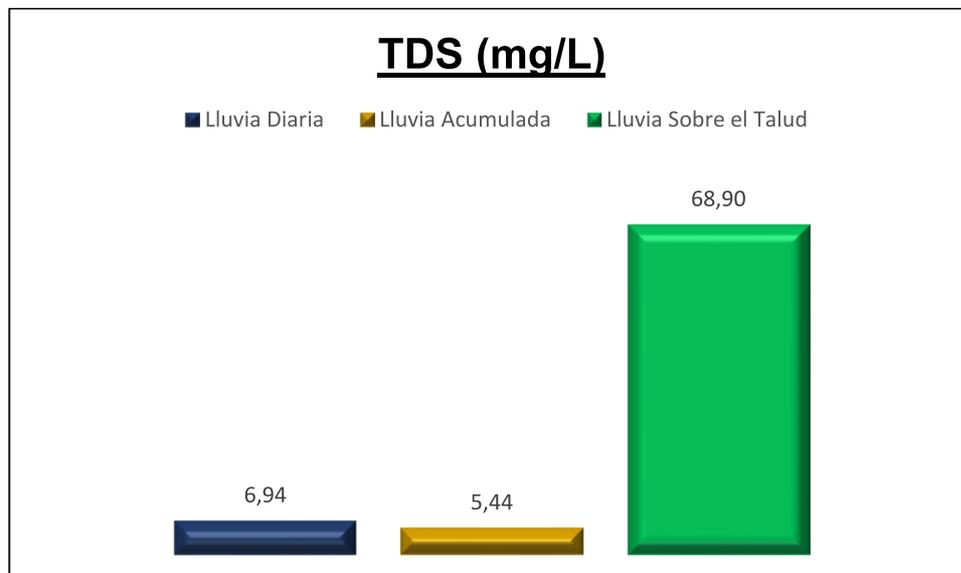


Figura 71. Gráfico comparativo de TDS Talud N°2

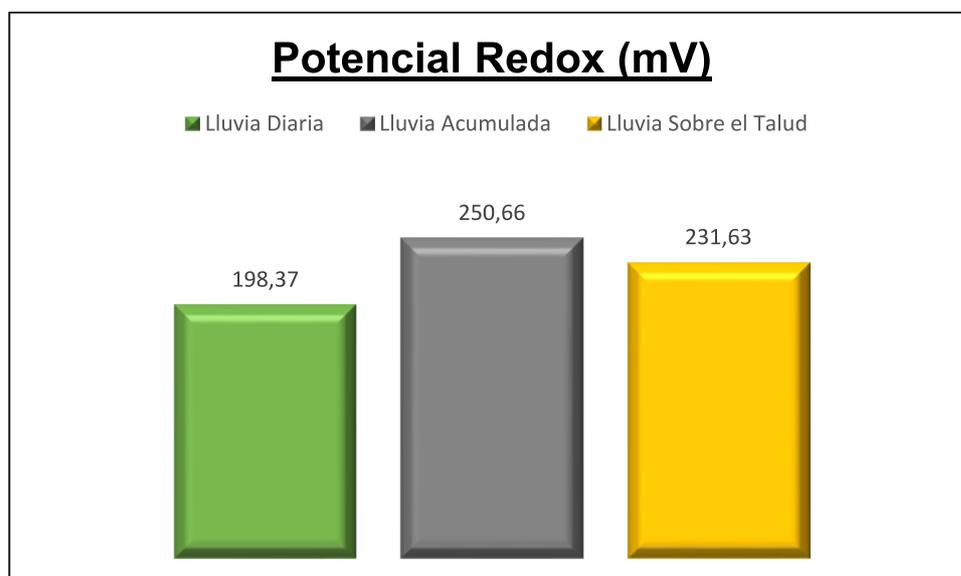


Figura 72. Gráfico comparativo de Potencial Redox Talud N°2

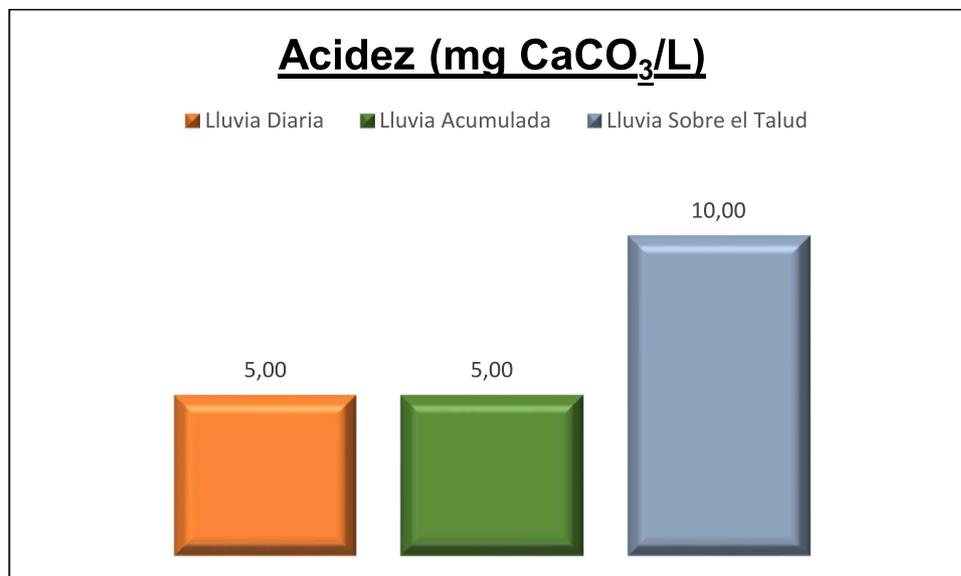


Figura 73. Gráfico comparativo de Acidez Talud N°2

Tabla 40.

Parámetros estadísticos en agua diaria Talud N°3

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (μS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.25	23.82	13.56	6.78	168.11	5.00
Varianza	0.24	9.28	5.80	1.45	715.51	0.00
Desviación estándar	0.49	3.05	2.41	1.20	26.75	0.00
Coficiente de variación	8%	13%	18%	18%	16%	0%
Valor máximo	7.18	31.60	16.80	8.40	203.70	5.00
Valor mínimo	5.31	17.80	10.20	5.10	130.60	5.00

Tabla 41.

Parámetros estadísticos en agua acumulada Talud N°3

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.44	23.91	8.70	4.35	202.33	5.00
Varianza	0.27	3.10	2.52	0.63	246.11	0.00
Desviación estándar	0.52	1.76	1.59	0.79	15.69	0.00
Coefficiente de variación	8%	7%	18%	18%	8%	0%
Valor máximo	7.42	26.80	12.10	6.05	234.00	5.00
Valor mínimo	5.62	19.30	7.59	3.80	182.50	5.00

Tabla 42.

Parámetros estadísticos en agua sobre el Talud N°3

Parámetros estadísticos	pH	T °C	Conductividad (µS/cm)	TDS (mg/L)	Potencial Redox (mV)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)
Media Aritmética	6.99	24.17	82.05	41.03	154.08	10.00
Varianza	0.17	1.95	193.45	48.36	151.14	0.00
Desviación estándar	0.41	1.40	13.91	6.95	12.29	0.00
Coefficiente de variación	6%	6%	17%	17%	8%	0%
Valor máximo	7.46	25.50	103.50	51.75	179.60	10.00
Valor mínimo	6.13	21.30	62.60	31.30	131.30	10.00

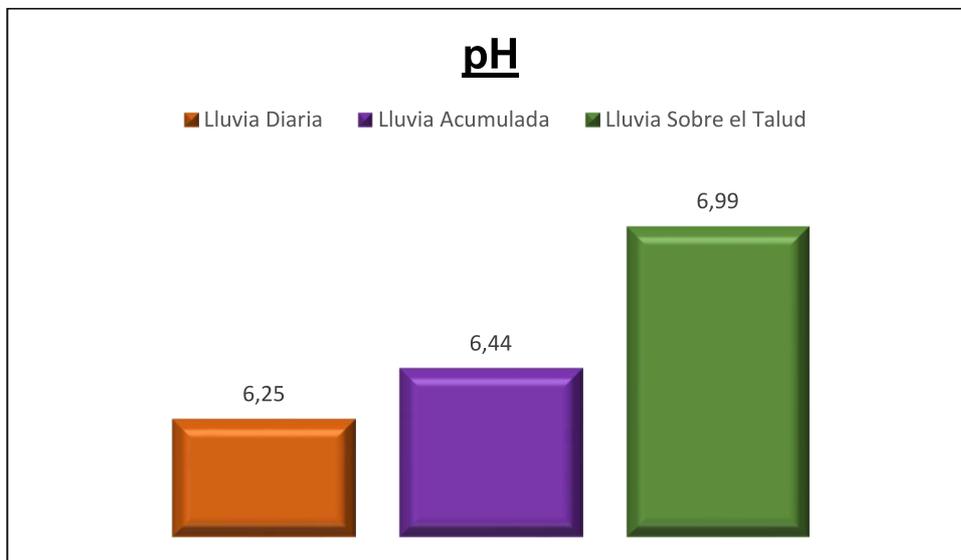


Figura 74. Gráfico comparativo de pH Talud N°3

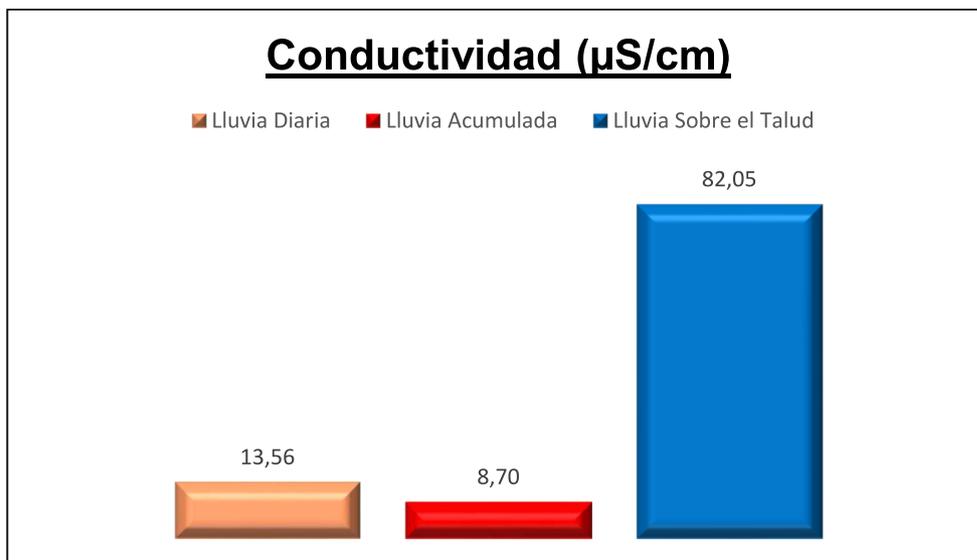


Figura 75. Gráfico comparativo de Conductividad Talud N°3

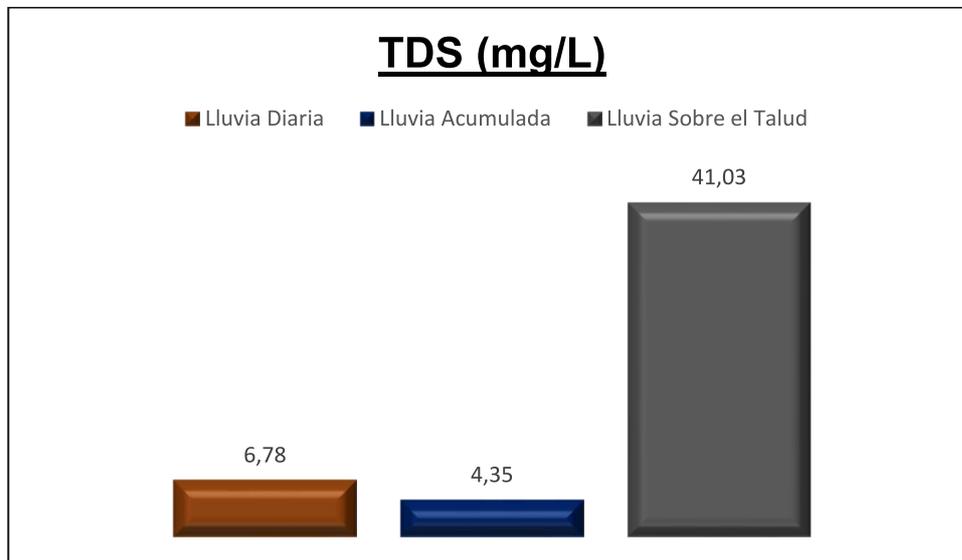


Figura 76. Gráfico comparativo de TDS Talud N°3

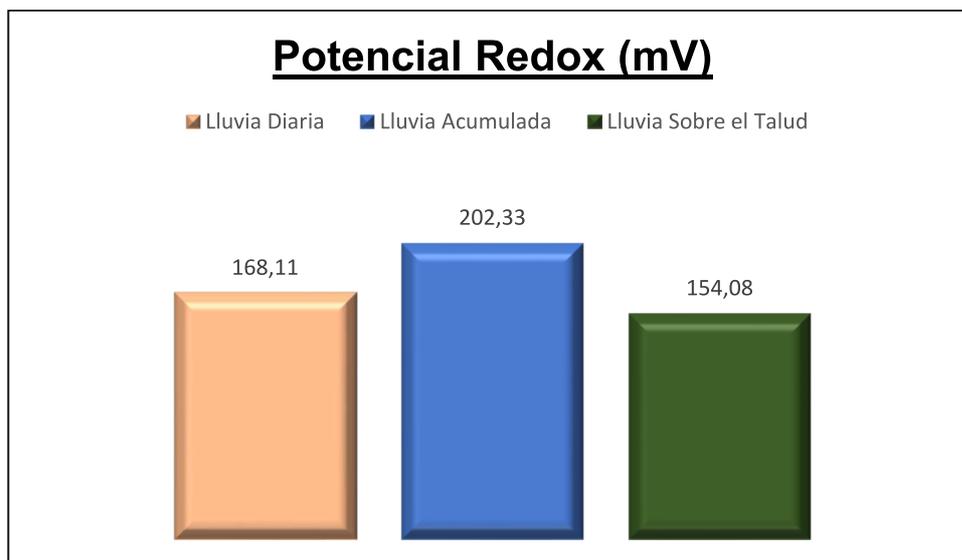


Figura 77. Gráfico comparativo de Potencial Redox Talud N°3

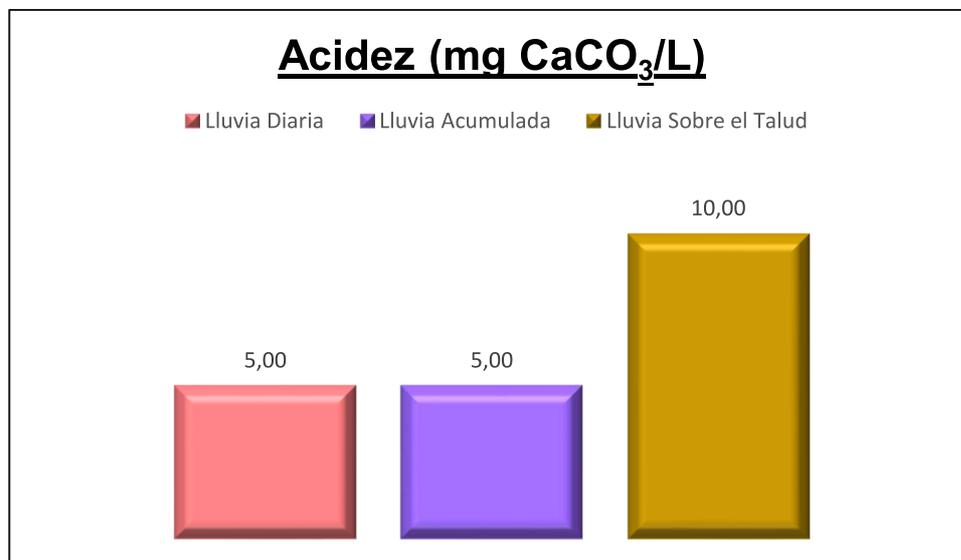


Figura 78. Gráfico comparativo de Acidez Talud N°3

4.4. Costos

Tabla 43.

Costo hormigón lanzado

RUBRO	UNIDAD	COSTO
Suministro y colocación de hormigón lanzado (incluye anclajes 2m, desalojo de materiales, malla electrosoldada y limpieza final)	m2	46.57 USD

Tabla 44.

Costo hormigón lanzado, taludes en estudio

	ÁREA (m ²)	COSTO	COSTO TOTAL	
Talud N°1	767.69	46.57	35751.323	USD
Talud N°2	643.25	46.57	29956.153	USD
Talud N°3	477.52	46.57	22238.106	USD

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los taludes N°1 y N°2 presentan velocidades aceleradas de carbonación y los espesores de las muestras de hormigón extraídas en estos taludes no cumplen con las especificaciones técnicas, por lo tanto no alcanzan la vida útil mínima que establece el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) para taludes revestidos con hormigón lanzado. Sin embargo en el Talud N°3 se observa que la velocidad de carbonatación a pesar de ser alta, no afecta a los años de operación por presentar un espesor de la capa de recubrimiento mayor a la especificación recomendada.
- El tiempo de vida útil del proyecto está en función de la velocidad de carbonatación del hormigón.
- Las resistencias a la compresión en el hormigón determinadas en los taludes en estudio, se encuentran por debajo de la norma, la misma que establece medidas de resistencias mayores a 300 kg/cm^2 para un hormigón proyectado con y sin función estructural, empleado como revestimiento definitivo.
- La calidad del hormigón en los taludes estudiados se encuentra por debajo de la especificación para un hormigón de calidad muy pobre.
- La mayoría de las fisuras en los Taludes N°1 y N°2, tienen medidas mayores a las recomendaciones que establece el código ACI para estructuras exteriores y expuestas a ambientes agresivos. En el Talud N°3 al no presentar fisuras significativas se descartaron sus valores.
- En base a los datos experimentales podemos ver variaciones en la gráfica de pH cuando se trata de agua lluvia diaria, acumulada, y sobre el talud, cada uno de ellos tiene una explicación. Las muestras de agua lluvia diaria presentan un comportamiento tendiente a ligeramente ácida,

mientras que las muestras de agua acumulada al interactuar con algunos componentes del aire y debido a la presencia del CO_2 , se convierten en aguas lentamente básicas. Por otra parte, cuando el agua recorre por la superficie del talud, el pH tiene un valor neutral (pH 7), influyendo en otros tipos de reacciones y comportamientos como la conductividad.

- El talud expuesto a condiciones atmosféricas, recibe una cantidad de lluvia y por efectos de oxidación o deterioro del hormigón, empieza a verse afectado progresivamente. Los valores de conductividad de las muestras de agua lluvia diaria corresponden a una agua pura, pero cuando tenemos una muestra de agua lluvia sobre el talud, aumenta significativamente, porque sobre esta superficie se genera la formación de sales minerales por efecto de la erosión, y cuando nuevamente interactúan con el agua son arrastradas, incrementando el contenido de la misma en la muestra, y al medir la conductividad, se obtienen valores altos.
- Los sólidos totales disueltos (TDS) en el agua están en función de la conductividad, por consiguiente, el contenido de TDS en la muestra de agua lluvia que recorre el talud aumenta significativamente.
- El contenido de carbonatos en la determinación de la acidez, se expresa en $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$ y al presentar valores significativos, prueban que existe el proceso de deterioro por efectos ambientales, especialmente por las lluvias ácidas en la cual están involucrados los ácidos sulfúricos, nítricos y carbónicos.
- Por efecto de las emisiones de contaminantes hacia la atmósfera y los ácidos que se forman al interactuar con el agua a lo largo del tiempo, se genera un deterioro en los hormigones, especialmente en los taludes de corte revestidos con hormigón lanzado.
- Las muestras de agua lluvia recolectadas se encuentran en el área de influencia, por lo tanto, presentan similitud en sus resultados.

5.2. Recomendaciones

- En los Taludes N°1 y N°2 se recomienda reemplazar el hormigón lanzado por un sistema de protección sustentable y ecológico. En el Talud N°3 se debe realizar un mantenimiento preventivo para evitar y disminuir el desgaste ocasionado por los contaminantes atmosféricos.
- Es necesario investigar nuevos tipos de recubrimientos protectores para taludes de corte en corredores viales.
- El control y monitoreo de las emisiones de gases hacia la atmósfera deben ser realizados periódicamente y con mayor frecuencia en las zonas vulnerables con altas concentraciones de contaminantes.
- Se recomienda para investigaciones futuras que la colocación de los dispositivos para el control de aguas lluvias sea por periodos prolongados y en estaciones invernales para tener una mayor cantidad de muestras y resultados.
- Se debe controlar el proceso de construcción de taludes revestidos con hormigón lanzado, debido a que en el presente estudio se evidencia la falta de cumplimiento de normas y especificaciones técnicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 201.2R-01, A. C. (2001). Guía para la Durabilidad del Hormigón. USA.
- ACI 224.1R-93, A. C. (1993). Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón. USA.
- ACI 228.1R, A. C. (1995). In Place Methods to Estimate Concrete Strength. USA.
- ACI 506.1R-08, A. C. (2008). Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete. USA.
- ACI 506.2-95, A. C. (1995). Specification for Shotcrete. USA.
- ACI 506.5R-09, A. C. (2009). Guide for Specifying Underground Shotcret. USA.
- ACI 506R-05, A. C. (2005). Guide to Shotcrete. USA.
- Acosta, J. (2007). Módulo de contaminación atmosférica. Contaminantes: Características, origen y efectos. España.
- AETESS, A. d. (2001). Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera. . Madrid.
- Aetos, A. E. (2014). Guía técnica. Diseño, fabricación y puesta en obra del hormigón proyectado en obras subterráneas. España.
- Antón, J. (2008). *Física y Química*. Madrid: Editex S.A.
- APHA, A. P. (1992). Standard Methods for the Examination of Water Wastewater. 18th Edition. Washington.
- Artur, N. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto, 11ª. Edición* . Colombia: McGraw-Hill.
- ASTM C-1116, S. T. (2015). Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. USA.
- ASTM C-494, A. S. (2005). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. USA.
- ASTM C-597, S. T. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. USA.
- ASTM C-805, S. T. (2002). Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. USA.

- BASF, T. C. (2009). Concreto lanzado, soluciones para construcción subterránea. *Master Builders Solutions*, 3.
- Bockris, J. (2001). *Modern Electrochemistry 2A: Fundamentals of Electrode Processes*. New York: Springer Science & Business .
- Brown, T. (2004). *Química: La Ciencia Central. Novena Edición*. México: Pearson Educación.
- Byrne, R. (2004). Manual for design and construction monitoring of soil nail walls. *FHWA-SA-96-069R, A420-C3*,.
- Cabildo, M. (2013). *Ecología II: Comunidades y Ecosistemas*. Madrid : Universidad Nacional de Educación a Distancia .
- Carino, N. (1997). Nondestructive Test Methods. 4-5.
- Chang, R. (2013). *Química (11a. ed. edición)*. México: MacGraw-Hill.
- Claussen, H. (2015). Fortificación Activa de Túneles, mediante Hormigón Proyectado. . *EMB Construcción*.
- EFNARC. (1999). European Specification for Sprayed Concrete, Execution of Spraying .
- EN 12504-4, N. E. (2004). Determinación de la velocidad de los impulsos.
- EPA, E. P. (1993). Determination of Inorganic Disinfection By-Products by Ion Chromatography . USA.
- Ercolani, G. (2007). Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. 4-5.
- Fernández, A. (1994). *Ensayos no destructivos por ultrasonidos*. Instituto de Fomento Regional.
- Fernández, S. (2002). *Estadística Descriptiva. Segunda Edición*. Madrid: ESIC.
- Flores, J. (1997). Efectos Globales de la contaminación. México: Gobierno del Estado de México.
- Fonsal. (2007). Arte quiteño más allá de Quito. Quito, Ecuador.
- Fuentes, F. (2002). Manual de laboratorios. Ecología de microorganismos. Puerto Rico.
- Galloich, A. (2007). Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón. *Officine Maccaferri S.p.A*, 9-15.
- Geocisa, G. y. (2002). Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura. Madrid, España.

- Gomez, G. (2013). Determinación del índice esclerométrico en hormigones: factores que lo afectan. *Ingeniería e Investigación*, 32.
- González, E. (2012). Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. En *Materiales de Construcción. Sesiones de Prácticas* (pág. 93).
- Hernández, O. (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería, investigación y tecnología, Vol. 7 No.1*.
- Hofler, J. (2004). Concreto Proyectado en la Construcción de Túneles. Introducción a la tecnología básica de Concreto Proyectado. *Sika Schweiz AG*, 38.
- I.N.V.E-413, I. N. (2007). Método para determinar el índice esclerométrico en el concreto endurecido. 1-4.
- Ibáñez, S. (2011). El sistema de coordenadas UTM . España: Universidad Politécnica de Valencia.
- ICH, I. d. (2015). Guía Chilena del Hormigón Proyectado - Shotcrete. *Hormigón al día* , 41-42.
- INEN 2617:2012, I. E. (2012). Hormigón de cemento Hidráulico. Agua para mezcla. Quito, Ecuador.
- INEN 694:2010, I. E. (2010). Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Quito, Ecuador.
- López, J. (2003). Contaminación atmosférica. Principios básicos de contaminación ambiental. Universidad Autónoma de México.
- Lozano, M. (2003). Las características específicas de la vía húmeda y la razón de ser su implantación. *Hormigón proyectado: análisis de la evolución de la vía seca a la vía húmeda*.
- Malhotra, M. (1985). "Nondestructive methods for testing concrete", Department of Energy, Mines and Resources. Ottawa, Canadá.
- Manahan, S. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. México, D.F: Reverté S.A.
- Martinez, E. (2004). Contaminación atmosférica. Universidad de Castilla-La Mancha.
- MDMQ, S. d. (Abril de 2015). Informe de calidad del aire de Quito. Quito, Ecuador.
- Monter, J. (2012). Gestión y Análisis de Funcionamiento de una Planta de Hormigón en el Municipio de Tresp.

- Morales, R. (2015). Muros, Taludes y Terraplenes de Suelo Reforzado: Control de erosión . México.
- Moreno, S. (2010). "Determinación de la profundidad de carbonatación y penetración de cloruros mediante experimentación empleando procesos de difusión térmica en varios diseños de hormigón". Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- MTOP, M. d. (2012). Procedimientos de operación y seguridad vial, Volumen 5. En *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 MOP* (pág. 126). Quito.
- Ochoa, R. (2014). Concreto lanzado para túneles y taludes. *Construcción y tecnología en concreto*, 47-48.
- Ordoñez, J. (2011). Ciclo hidrológico . Lima , Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ottazzi, G. (2004). Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado . Perú.
- Pacheco, L. (2012). Análisis Comparativo de los códigos internacionales . Chile .
- Pellicer, V. (2014). Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos. 26-31.
- PMDOT, P. M. (2015). Quito, Ecuador.
- PMOT, P. m. (2014). Diagnóstico de la movilidad en el Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador.
- Ramos, V. T. (2006). Estabilidad de Taludes en obras de Ingeniería Civil. *El Ingeniero Geólogo* , 86.
- Rey, A. (2006). Hormigón proyectado. Dosificación, fabricación y puesta en obra. *I Jornada sobre Hormigón Proyectado*, 2-4.
- Rey, A. (2007). Dosificación y fabricación de hormigón proyectado. *Arte y Cemento*, 98-100.
- Rojas, G. (2008). Evaluación de estructuras de concreto por corrosión. *Tecnología en Marcha*, Vol. 21, N.º 4, 71.
- Seinfeld, J. (1978). *Contaminación atmosférica. Fundamentos físicos y químicos*. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local.
- SENA, S. N. (2012). Programa de capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico. Bogotá, Colombia: Ministerio de Desarrollo Económico.
- Sika. (2009). Manual de hormigón proyectado. Sistemas de aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado. *Construcción*, 20-22.

- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. .
- Suarez, J. (2015). *Deslizamientos: Técnicas de remediación. Tomo II*. Colombia: Geotecnología S.A.S.
- Terrasat. (2015). Servicio fotogramétrico y modelado 3d con drones.
- Tolentino, V. (2015). Sostenimiento y revestimiento de taludes . *Curso métodos de excavación de túneles*.
- Ubaldo, R. (2016). Selección del tipo de revestimiento en túneles carreteros. 40.
- UNE 112011, N. E. (2011). Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. España.
- UNE-EN 14487-2, U. N. (2008). Hormigón Proyectado, Parte 2: Ejecución.
- USGS, U. S. (2016). The water cycle. USA.
- Vargas, I. (2012). Evaluación del módulo de elasticidad en concreto sin refuerzo a partir de mitad de velocidad de pulso ultrasónico. Bucaramanga.
- Véliz, C. (2009). Estabilización de taludes con pantallas de concreto lanzado con malla electro soldada y anclajes de concreto reforzado. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- WGA, W. G. (1999). Inventario de emisiones de los estados de la frontera de México. México: Instituto Nacional de Ecología.