

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Evaluación del desempeño del concreto lanzado ya colocado en taludes, mediante ensayos destructivos y no destructivos

Proyecto de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Laura Vargas Vargas

Director (a) de Proyecto de Graduación:

Ing. Marcia Cordero Sandí

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de aprobación



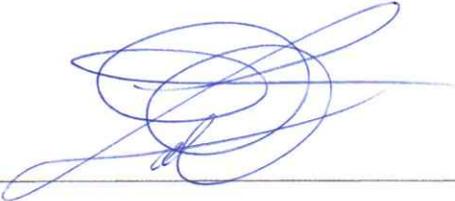
Ing. Marcia Cordero Sandí
Director



Ing. Oscar Calvo Carranza
Asesor



Ing. Allan Rojas Ramírez
Asesor



Laura Vargas Vargas
Autor

---página en blanco---

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2021, diciembre, 13

El suscrito, Laura Vargas Vargas, cédula 2-0753-0653, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B47448**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Evaluación del desempeño del concreto lanzado ya colocado en taludes, mediante ensayos destructivos y no destructivos**, bajo la Dirección del **Ing. Marcia Cordero Sandí**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

---página en blanco---

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a las personas más importantes en mi vida. A mi padre Ronald por nunca haber dudado de mí y de mis capacidades, a mi madre Mayela que me ha enseñado a ser la mujer fuerte e independiente que soy ahora, y a mis hermanos, Melissa y Dennis, que sé que se alegran por cada uno de mis triunfos como si fueran propios. Todo lo que he logrado hasta ahora ha sido gracias a ellos y espero poder devolvérselos un día.

---página en blanco---

Agradecimientos

Agradezco enormemente a mis padres por ser siempre el apoyo más grande en mi camino, por sus sacrificios, por su preocupación por mí y por el amor que, a su manera, ha sido incondicional.

A Steven, mi amor, que me tuvo tanta paciencia, que me acompañó por horas y hasta madrugadas mientras trabajaba; gracias por siempre darme palabras de aliento y por creer en mí.

A mis amigos, que siempre estuvieron pendientes de mi avance y de darme ánimos.

A mi directora, la profesora Marcia, por aventurarse conmigo en este proyecto y ayudarme a cumplirlo; a Don Óscar, porque cada reunión fue como una clase donde aprendí mil cosas nuevas; y al profesor Allan, que desde hace mucho tiempo ha sido el mentor que todo alumno desea tener.

Agradezco también al Laboratorio de Materiales, Bel Ingeniería S.A., y a su gerente Jonathan Barboza por haber colaborado con la gran parte de los ensayos ejecutados; por ello también agradezco a Jack, Breiner y Diego, técnicos que se mojaron y esforzaron conmigo para que los ensayos salieran lo mejor posible.

A Cinder, que más que mi gato es mi amigo, porque él tiene tantas horas trabajadas en esta tesis como yo, porque estuvo a mi lado en todo momento, porque trasnochaba y dormía siempre a un lado mío y porque con su silencio siempre me acompaña.

Por último, pero más importante, a Dios, porque cada vez que le pedí me escuchó.

---página en blanco---

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 Problema específico	1
1.1.2 Importancia	2
1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema	3
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Delimitación del problema.....	5
1.4.1 Alcance.....	5
1.4.2 Limitaciones.....	6
1.5 Descripción de la metodología a utilizar	7
1.5.1 Fase 1: Selección de taludes como objeto de estudio.....	9
1.5.2 Fase 2: Revisión bibliografía y definición de ensayos.....	9
1.5.3 Fase 3. Ejecución de ensayos	10
1.5.4 Fase 4. Análisis de resultados	11
1.5.5 Fase 5. Propuesta de Metodología.....	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Taludes.....	12
2.1.1 Métodos de estabilización de taludes.....	13
2.1.2 Normativa nacional de taludes.....	16
2.1.3 Factores de seguridad en taludes.....	18
2.2 Técnica del concreto lanzado	18
2.2.1 Marco histórico sobre el uso de concreto lanzado en taludes	18
2.2.2 Aplicaciones del concreto lanzado	21
2.2.3 Diseño del concreto lanzado	24
2.2.4 Espesores y resistencias mínimas del concreto lanzado en Costa Rica	26

2.2.5	Métodos de aplicación del concreto lanzado	27
2.2.6	Recomendaciones en la aplicación del concreto lanzado.....	32
2.2.7	Propiedades del concreto	33
2.2.8	Patologías en el concreto	36
2.3	Mantenimiento y Reparación de estructuras de concreto	45
2.4	Evaluación del desempeño y Control de calidad del concreto endurecido	52
2.5	Ensayos destructivos y no destructivos en el concreto lanzado.....	56
2.5.1	Ensayos destructivos.....	56
2.5.2	Ensayos no destructivos.....	60
2.6	Estadística descriptiva	67
2.6.1	Medidas de tendencia central	68
2.6.2	Medidas de dispersión.....	68
3.	SELECCIÓN DE TALUDES PARA ANÁLISIS	70
3.1	Talud 1: Tarbaca.....	71
3.1.1	Descripción del sitio de ensayo	71
3.1.2	Información del diseño.....	73
3.1.3	Información de la zona	73
3.2	Talud 2: Guayabal.....	76
3.2.1	Descripción del sitio de ensayo	76
3.2.2	Información del diseño.....	79
3.2.3	Información de la zona	79
3.3	Talud 3: LANAMME	82
3.3.1	Descripción del sitio de ensayo	82
3.3.2	Información del diseño.....	84
3.3.3	Información de la zona	86
4.	DEFINICIÓN DE LOS ENSAYOS A REALIZAR	88
4.1	Ensayos destructivos	88

4.1.1	Método de prueba estándar para la obtención y prueba de núcleos extraídos de concreto lanzado.....	88
4.1.2	Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto. 89	
4.1.3	Método de prueba estándar para la densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido	91
4.1.4	Análisis Petrográfico	93
4.2	Ensayos no destructivos	95
4.2.1	Método de prueba estándar para el número de rebote de concreto endurecido 95	
4.2.2	Determinación de la profundidad de carbonatación en concretos endurecidos y puestos en servicio	97
4.2.3	Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de concreto.....	99
5.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	109
5.1	Talud 1: Tarbaca.....	109
5.1.1	Ejecución de ensayos destructivos	110
5.1.2	Ejecución de ensayos no destructivos.....	115
5.2	Talud 2: Guayabal.....	120
5.2.1	Ejecución de ensayos destructivos	121
5.2.2	Ejecución de ensayos no destructivos.....	126
5.3	Talud 3: LANAMME	130
5.3.1	Ejecución de ensayos destructivos	131
5.3.2	Ejecución de ensayos no destructivos.....	136
5.4	Resultados generales.....	140
6.	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS TALUDES ESTUDIADOS	141
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
7.1	Conclusiones	150
7.2	Recomendaciones	152
8.	REFERENCIAS.....	157

9. APÉNDICE	169
--------------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología a seguir.....	8
Figura 2. Nomenclatura de taludes y laderas.....	12
Figura 3. Avance de la excavación y colocación de concreto en las paredes de una galería	23
Figura 4. Brazo de proyección con cabina	23
Figura 5. Recubrimiento de taludes	23
Figura 6. Composición del Concreto Lanzado	25
Figura 7. Tolerancias para la Construcción de Superficies Permanentes	27
Figura 8. Resumen de procesos de concreto proyectado	28
Figura 9. Criterios principales al seleccionar la técnica de lanzado.....	28
Figura 10. Concreto proyectado vía seca, flujo diluido	29
Figura 11. Principios de operación de las máquinas de tipo dos cámaras, tipo tornillo y el tipo rotor para concreto proyectado, vía seca	29
Figura 12. Concreto proyectado, vía húmeda, flujo denso	30
Figura 13. Putzmeister Bomba estacionaria de concreto Sika®-PM702 E.....	30
Figura 14. Causantes de las fallas en la durabilidad.....	34
Figura 15. Ley de evolución de costos (Ley de Sitter)	46
Figura 16. Procedimiento general de reparación.....	48
Figura 17. Propiedades de los selladores de grietas.....	49
Figura 18. Características de sistemas de protección superficial.....	49
Figura 19. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos de cemento por Kg/m ³	63
Figura 20. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c	64
Figura 21. Efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación.....	65
Figura 22. Variables climáticas de Aserrí.....	74
Figura 23. Movimiento de tierra del talud de Guayabal	78
Figura 24. Proceso del lanzado de concreto sobre la malla electrosoldada	78
Figura 25. Perfil de diseño utilizado en el talud	79
Figura 26. Croquis de Ubicación de los trabajos de campo	83
Figura 27. Detalles finales del talud de la LANAMME.....	84

Figura 28. Perfil de diseño utilizado en el talud, perfil No.4	85
Figura 29. Vista frontal del talud con la solución	85
Figura 30. Patrones esquemáticos de fracturas típicas	90
Figura 31. Algunos minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento.....	94
Figura 32. Relación del número de rebote y la resistencia del concreto, según el ángulo de impacto del martillo	96
Figura 33. Frente homogéneo de la profundidad de carbonatación	98
Figura 34. Frente irregular de la profundidad de carbonatación	98
Figura 35. Frente singular de la profundidad de carbonatación.....	98
Figura 36. Defectos estructurales comunes.....	99
Figura 37. Típica fisuración por retracción plástica	101
Figura 38. Fisura formada debido a una precipitación.....	101
Figura 39. Reparación de una fisura mediante perfilado y sellado	105
Figura 40. Costura de una fisura.....	105
Figura 41. Zona ensayada del Talud de Tarbaca	109
Figura 42. Colocación de la máquina extractora de forma perpendicular a la superficie	110
Figura 43. Primer núcleo extraído a 0,98 metros de la base, Segundo núcleo extraído a 1,35 metros de la base y Tercer núcleo extraído a 1,51 metros de la base, respectivamente	110
Figura 44. Sellado del segundo, primer y tercer núcleo, respectivamente	111
Figura 45. Núcleo colocado en la máquina de compresión, junto con su modo de falla.....	112
Figura 46. Muestras de concreto a ser ensayadas	113
Figura 47. Clasto hipocristalino con calcedonia en textura amigdaloida bajo polarización paralela.....	114
Figura 48. Cristales de calcita y olivino alterado bajo polarización cruzada.....	114
Figura 49. Secciones donde se utilizó el esclerómetro.....	116
Figura 50. Reacción de la fenolftaleína en el primer, segundo y tercer núcleo extraído, respectivamente.	117
Figura 51. Fisuras de diferentes aberturas, con material orgánico.....	118
Figura 52. Desprendimiento y quebradura de material.....	119
Figura 53. Lavado de material en el extremo superior del talud.....	119
Figura 54. Sección del talud ubicado en Guayabal de Heredia	120

Figura 55. Colocación de la máquina extractora de forma perpendicular a la superficie	121
Figura 56. Primer núcleo extraído a 1,60 metros de la base a 8,70 metros desde el punto 0+000 m, Segundo núcleo extraído a 1,20 metros de la base a 79,34 metros desde el punto 0+000 m y Tercer núcleo extraído a 1,20 metros de la base a 145,00 metros desde el punto 0+000 m.....	121
Figura 57. Sellado de los tres núcleos extraídos	122
Figura 58. Medición del núcleo a fallar, ya cortado, por medio de un vernier	122
Figura 59. Núcleo colocado en la máquina de compresión, junto con su modo de falla	123
Figura 60. Clasto de cuarzo microcristalino bajo polarización cruzada	125
Figura 61. Óxidos/hidróxidos de hierro en el agregado bajo polarización cruzada.....	125
Figura 62. Reacción de la fenolftaleína en el primer, segundo y tercer núcleo extraído, respectivamente	127
Figura 63. Suelo lavado en un extremo del talud.....	129
Figura 64. Problemas en el interior del concreto.....	129
Figura 65. Talud a ensayar localizado en el LANAMME.....	130
Figura 66. Proceso de extracción de los núcleos.....	131
Figura 67. Primer núcleo extraído a 1,00 metros de la base a 5,00 metros desde el punto 0+000 m, Segundo núcleo extraído a 1,50 metros de la base a 11,46 metros desde el punto 0+000 m y Tercer núcleo extraído a 1,35 metros de la base a 17,70 metros desde el punto 0+000 m.....	131
Figura 68. Sellado de los núcleos extraídos.....	132
Figura 69. Núcleo colocado en la máquina de compresión, junto con su modo de falla	133
Figura 70. Detalle de agregado y pasta bajo polarización cruzada	135
Figura 71. Clasto hipocristalino bajo polarización cruzada	135
Figura 72. Reacción de la fenolftaleína en el primer, segundo y tercer núcleo extraído, respectivamente	137
Figura 73. Desprendimiento de concreto y presencia de materia orgánica	139
Figura 74. Desprendimiento de material en la base del talud.....	139
Figura 75. Composición mineralógica de las láminas delgadas para los taludes de estudio	140
Figura 76. Porcentaje de componentes mineralógicos en las láminas delgadas para los taludes de estudio.....	140
Figura 77. Comparación de los pesos según variables, Talud de Tarbaca	142
Figura 78. Comparación de los pesos según variables, Talud de Guayabal.....	142

Figura 79. Comparación de los pesos según variables, Talud de LANAMME	143
Figura 80. Valoración de cada Talud en análisis según las variables consideradas	145
Figura 81. Propuesta de metodología de evaluación del desempeño para aplicar en taludes de concreto lanzado	149

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Alternativas de estabilización de taludes	14
Cuadro 2. Factores de seguridad para el diseño de taludes permanentes y análisis de laderas	18
Cuadro 3. Conceptos a tomar en cuenta al abordar la durabilidad del concreto	34
Cuadro 4. Ejemplos de agentes externos e internos	35
Cuadro 5. Relación A/C y $f'c$ para concretos expuestos a cambios de humedad	44
Cuadro 6. Condiciones que pueden favorecer el desarrollo de microorganismos	44
Cuadro 7. Información general de la ubicación de los taludes a ensayar	70
Cuadro 8. Dimensiones de los aspectos utilizados en la construcción del Talud	73
Cuadro 9. Dimensiones de los aspectos utilizados en la construcción del talud	79
Cuadro 10. Variables climáticas de Heredia	81
Cuadro 11. Dimensiones de los aspectos utilizados en la construcción del Talud	85
Cuadro 12. Variables climáticas de Montes de Oca	86
Cuadro 13. Resumen de ensayos destructivos y no destructivos aplicados	88
Cuadro 14. Factores de corrección de la carga a compresión según la relación L/D	91
Cuadro 15. Resumen de resultados obtenidos junto con sus respectivos valores a cumplir	109
Cuadro 16. Dimensiones de los tres núcleos extraídos	111
Cuadro 17. Información del núcleo utilizado para el ensayo de compresión uniaxial ...	112
Cuadro 18. Carga de falla corregida con su información requerida	112
Cuadro 19. Resultados del ensayo en la primera y segunda porción de concreto	113
Cuadro 20. Resultados obtenidos al utilizar el esclerómetro, en tres secciones del talud	115
Cuadro 21. Relación entre el esfuerzo a compresión obtenido por el esclerómetro y el obtenido por la falla a compresión	116
Cuadro 22. Información requerida, por espécimen, para determinar el tiempo aproximado en el que la carbonatación llegará al acero	117

Cuadro 23. Resumen de resultados obtenidos junto con sus respectivos valores a cumplir	120
Cuadro 24. Dimensiones de los tres núcleos extraídos	122
Cuadro 25. Información del núcleo utilizado para el ensayo de compresión uniaxial ...	123
Cuadro 26. Carga de falla corregida y su información requerida	123
Cuadro 27. Resultados del ensayo en la primera y segunda porción de concreto	124
Cuadro 28. Resultados obtenidos al utilizar el esclerómetro en tres secciones diferentes del talud.....	126
Cuadro 29. Relación entre el esfuerzo a compresión obtenido por el esclerómetro y el obtenido por la falla a compresión	126
Cuadro 30. Información requerida, por espécimen, para determinar el tiempo aproximado en el que la carbonatación llegará al acero	128
Cuadro 31. Resumen de resultados obtenidos junto con sus respectivos valores a cumplir	130
Cuadro 32. Dimensiones de los tres núcleos extraídos	132
Cuadro 33. Información del núcleo utilizado para el ensayo de compresión uniaxial ...	133
Cuadro 34. Información requerida para la obtención de la carga de falla corregida	133
Cuadro 35. Resultados del ensayo de la porción de concreto	134
Cuadro 36. Resultados obtenidos al utilizar el esclerómetro en tres secciones diferentes del talud.....	136
Cuadro 37. Relación entre el esfuerzo a compresión obtenido por el esclerómetro y el obtenido por la falla a compresión	137
Cuadro 38. Información requerida, por espécimen, para determinar el tiempo aproximado en el que la carbonatación llegará al acero	138
Cuadro 39. Puntaje a otorgar a cada criterio según su porcentaje de error.....	141
Cuadro 40. Pesos asignados a cada criterio según los porcentajes de error de los resultados de ensayo obtenidos en cada talud	142
Cuadro 41. Normalización de los pesos asignados por criterio a cada talud	143
Cuadro 42. Distribución de la valoración de cada criterio según el peso asignado	144
Cuadro 43. Valoración asignada a cada criterio	144
Cuadro 44. Nota obtenida por cada talud al sumar sus valoraciones asignadas según la condición de cada criterio evaluado	145

Vargas Vargas, Laura

Evaluación del desempeño del concreto lanzado ya colocado en taludes, mediante ensayos destructivos y no destructivos

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

L. Vargas V., 2021

Xvi, 169, [17]h; ils. col. – 132 refs.

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue el evaluar, mediante ensayos destructivos y no destructivos, el desempeño del concreto lanzado en varios taludes ya construidos en Costa Rica. Este permite conocer la condición actual, junto con posibles patologías, de la pantalla de concreto lanzado; y con ello determinar que tanto han cambiado sus características con respecto a las condiciones de diseño originales o a las pautas que rigen la normativa nacional e internacional en cuento a concreto lanzado.

Como parte del trabajo se realizó un estudio de artículos, tesis y normativas nacionales e internaciones que se enfocan en el concreto lanzado; posteriormente, se ejecutaron ensayos destructivos y no destructivos en cada talud tales como: extracción de núcleos, número de rebote de concreto endurecido, profundidad de carbonatación, evaluación visual de fisuras, falla a compresión uniaxial, ensayo petrográfico y el ensayo de determinación de densidad, absorción y vacíos en el concreto.

Al obtener los resultados, se eligieron las variables más significativas y con ellas se realizó un análisis multicriterio haciendo uso de los porcentajes de error provenientes de comparar los datos obtenidos con las normativas. Este análisis arrojó que tanto el talud de Tarbaca como el de Heredia presentan porcentajes de error relativamente bajos, menores a 40 %, excepto en el caso de la carbonatación, siendo esta una patología ya avanzada en ambas cubiertas de concreto; para el caso del talud de LANAMME, de igual forma presenta bajos porcentajes de error, menores a 40 %, pero en este caso es el espesor de capa la variable que afecta su evaluación final.

Con la información recopilada se presenta una propuesta de metodología para aplicar en otros taludes de Costa Ricca, junto con conclusiones y recomendaciones aplicables a los tres taludes en estudio. L.V.V.

Palabras claves: DESEMPEÑO, ENSAYOS DESTRUCTIVOS, ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, PATOLOGÍAS, EVALUACIÓN MULTICRITERIO.

Ing. Marcia Cordero Sandí, Mse.
Escuela de Ingeniería Civil

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

Dada la topografía de un país como Costa Rica y su implicación en la construcción de carreteras, represas, ferrocarriles y otros, coloca a la estabilización de taludes como una de las obras más significativas en el quehacer de la Ingeniería Geotécnica. Su importancia radica en que garantizan la estabilidad de cortes o laderas e impedir sus colapsos, para lograr evitar que se conviertan en un peligro para la población o para cualquier estructura ubicada ya sea al pie o en la corona del mismo.

Es esencial considerar que un gran número de taludes en los corredores viales del país, han sido intervenidos por sistemas de protección mediante recubrimiento de concreto lanzado que trabajan en conjunto con otros elementos, tales como anclajes, ya sean activos o pasivos, y drenajes. Por otra parte, en Costa Rica no existe la práctica de monitorear el comportamiento del concreto lanzado una vez concluido el proyecto, ningún talud ha sido monitoreado ni evaluado en cuanto a su respectivo desempeño desde su colocación, por lo que podría darse deterioros importantes y necesarios de prever.

Existen ejemplos de taludes importantes en nuestro medio con daños considerables, algunos de ellos ubicados en la Ruta No. 27, donde se evidencian problemas de desprendimientos desde prácticamente su inauguración, causando el cierre de las vías (ACG, 2010).

Según Porras et al. (2012), estos deterioros en los taludes están asociados a sus elevadas pendientes, a la alteración hidrotermal de las rocas y a los sistemas de manejo de aguas subterráneas y superficiales ineficientes, por ello, los problemas se intensifican en la época lluviosa debido a las tormentas tropicales. Otro fenómeno que también afecta significativamente la estabilidad, son los sismos, comprometiendo la seguridad de personas y bienes inmuebles.

Además, es sabido que cualquier obra ingenieril se deteriora con el paso del tiempo y su funcionamiento se reduce de forma gradual, sobre todo si no se le da un mantenimiento y monitoreo adecuado para garantizar su calidad desde el proceso constructivo mismo. Adicionalmente, aquellas solicitaciones que por cualquier circunstancia no fueron tomadas en consideración en su diseño y construcción, pueden aparecer y ser

causantes del deterioro de la capa de concreto lanzado durante su etapa de operación; por consiguiente, podría dejar de ejercer su función de soporte y protección, generando daños a futuro.

Según Cordero (2011) en Costa Rica los problemas geotécnicos que se observan en la infraestructura vial están asociados principalmente a inadecuadas, deficientes o escasas investigaciones geológicas y geotécnicas, a restricciones económicas, a mala gestión de proyectos, a diseños geotécnicos e hidráulicos inadecuados, al poco uso de nuevas tecnologías y a la duplicación de soluciones en proyectos para evitar investigaciones, análisis y diseños nuevos.

Importante destacar que muchos proyectos de recubrimiento de laderas se ubican en zonas de gran afluencia de movilidad y transporte, lo que, consecuentemente, produce grandes emisiones de contaminación en el aire que, al combinarse con las precipitaciones de la época lluviosa del país, forman lluvias ácidas que se depositan sobre las caras de los taludes; y dicha acción puede afectar o dañar al concreto directamente.

En resumen, estas dificultades siempre han existido y seguirán sucediendo. El problema radica en que se puede agravar cuando los taludes no son monitoreados, ni evaluados con sistemas de protección colocados in situ. Es decir, el escaso seguimiento que reciben las intervenciones en esos taludes, provoca que sea muy difícil conocer si se requiere de una reparación o bien una evaluación, que demuestre si el tipo y características del tratamiento han sido los más adecuados para las condiciones particulares de la zona. Todo esto tomando en cuenta el tipo de suelo, inclinación, precipitaciones, contaminación, etc., para lograr así disminuir las pérdidas ocasionadas por una eventual salida de operación del talud.

1.1.2 Importancia

Las principales rutas del país fueron construidas con la intención de comunicar, especialmente, el Valle Central con las zonas de importancia comercial; como la Ruta 27 con la Costa Pacífica o la Ruta 32 con la Costa Atlántica, esto con el fin de mejorar la economía del país.

Sin embargo, es conocido que, desde la construcción de estas vías, se han presentado diferentes problemas de estabilidad, los cuales han generado deterioro en las obras geotécnicas e incluso deslizamientos que, como consecuencias negativas, provocan la interrupción del tránsito vehicular, daños materiales tanto sobre la propiedad privada como en líneas vitales (eléctricas y acueductos), causando muertes.

Al analizar lo mencionado anteriormente, se logra observar que la falta de monitoreo, de evaluación y de diagnóstico para determinar el deterioro que se da en el recubrimiento de concreto lanzado y con ello lograr disminuir sus problemas de estabilidad, representa un riesgo para los habitantes y conductores de las diferentes zonas, convirtiendo entonces esta problemática en una situación de orden nacional. Lo anterior sustenta la idea de cómo en Costa Rica el uso cada vez más generalizado del concreto lanzado para estabilizar taludes, proteger márgenes de ríos contra su efecto erosivo, entre otros, hacen que se deban desarrollar técnicas y políticas para el monitoreo de concretos lanzados, tal que se garantice su adecuado desempeño al largo plazo.

Al respecto, el LANAMME-UCR (2015), afirma que el lograr identificar y entender los mecanismos y procesos, tanto químicos como físicos, que alteran los materiales de los taludes y de los materiales que son empleados en las obras de protección y estabilización, permiten el evaluar la condición de la obra e incluso el poder generar intervenciones para su arreglo. Por esa razón, el proceder con la realización de ensayos destructivos y no destructivos en varios taludes en diferentes puntos del país, ayudará a determinar el estado de los mismos y como ha sido el desempeño del concreto lanzado ya colocado hasta la fecha, para lograr en el proceso generar una metodología de evaluación que se puede implementar para el análisis de otros taludes con y sin evidencia de deterioro.

En síntesis, una correcta intervención y un mantenimiento pertinente para mejorar las condiciones de los taludes y perfeccionar sus diseños, contribuirá a disminuir las interrupciones del flujo vehicular que afecta la economía nacional y al desarrollo de la ingeniería geotécnica del país.

1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

A nivel nacional se han realizado trabajos e investigaciones referentes a taludes y sus daños; no obstante, nunca uno donde se evalúe directamente la calidad del concreto, con ensayos destructivos y no destructivos y que, a su vez, genere una metodología capaz de ser utilizada en el resto de taludes. Por esa razón se realizó una búsqueda bibliográfica que ayudara a obtener los trabajos con información más relevante y cercana a lo necesitado.

Cozar (2016) desarrolló un proyecto con la intención de realizar una auscultación global de taludes y de sus condiciones actuales, esto en cuanto a resistencia y durabilidad. La información obtenida de dicho estudio permite anticipar un deterioro gradual en la obra. Esto fue elaborado dado que, en su momento, el gobierno de Ecuador se encontraba invirtiendo en proyectos de infraestructura vial y, específicamente, en estabilidad de taludes de corte para prever deslizamientos.

Por su parte, LANAMME ha estado trabajando en los diversos daños que presentan los taludes; aunado a ello, en un informe desarrollado por esa misma entidad se analizan las principales características geomorfológicas de los taludes del km 38+600, en la Ruta Nacional No. 27, donde se realizó una caracterización geológica de las rocas ahí presentes para la determinación de presencia de drenaje ácido de roca (DAR), ya que esta es una variable muy importante que da como consecuencia el deterioro y colapso del concreto lanzado. De igual manera, una vez que se confirma la presencia de DAR se permite fiscalizar las intervenciones realizadas (LANAMME, 2015).

Del mismo modo, la Asociación Costarricense de Geotecnia (2010), realizó un reporte encargado de confirmar el tipo de inestabilidad, que se presenta a lo largo del tramo II de la ruta 27, de acuerdo a sus características geométricas, tales como la pendiente, altura de los taludes y con aspectos geotécnicos como el tipo de terreno, litología, condiciones de meteorización, alteración, erosión y grado de fracturamiento.

A su vez, Suárez (2017), presenta en su tesis una metodología que ayuda a la determinación de los cambios provocados por el efecto del DAR en la roca y en el concreto lanzado, el cual es utilizado para la estabilización de taludes. Aunado a esto, se analizan "los cambios de la masa y dimensiones de las muestras de roca y del concreto, tanto en el laboratorio como en el sitio" junto con la descripción de las características mineralógicas del concreto lanzado.

Por lo tanto, partiendo de los estudios mencionados anteriormente, pude decirse que no existe a la fecha, en nuestro país, una metodología que permita realizar una evaluación del desempeño de concretos lanzados, aunque si hay estudios que han reconocido la presencia de problemas aunados a factores que podrían haberse definido a través de una metodología como la que se propone desarrollar, y que permita obtener resultados representativos para cada uno de ellos y de este modo, brindar recomendaciones para el control y monitoreo de este componente en la protección de un talud.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño del concreto lanzado en varios taludes ya construidos en Costa Rica mediante ensayos destructivos y no destructivos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir las técnicas, aplicaciones, diseño, patologías y función del concreto lanzado en el tratamiento de taludes.
- Describir los tipos de suelos y las amenazas naturales presentes en las áreas intervenidas por los sistemas de protección de concreto lanzado en los taludes de estudio.
- Definir los ensayos aplicables en nuestro medio, con base en la información disponible en la literatura para este propósito.
- Realizar ensayos destructivos y no destructivos en el concreto lanzado ya colocado en los taludes seleccionados para el estudio.
- Determinar el estado actual del concreto lanzado mediante la comparación de los resultados de los ensayos con el diseño original de los taludes y la normativa vigente en Costa Rica e internacional.
- Proponer una guía metodológica para la evaluación del desempeño del concreto lanzado en taludes.

1.4 Delimitación del problema

1.4.1 Alcance

Este trabajo final de graduación tiene como alcance el evaluar el desempeño que ha tenido el concreto desde su colocación en tres taludes alrededor de Costa Rica, los cuales fueron seleccionados posteriormente según los permisos obtenidos para su intervención y su acceso. Lo anterior se ejecutó por medio de la aplicación de ensayos destructivos y no destructivos, que ayudó a plantear una metodología de evaluación para futuras intervenciones.

Como ensayos destructivos se aplicó el de resistencia a la compresión simple, el método de prueba estándar para la densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido junto con el análisis petrográfico de secciones delgadas de concreto. Para lograr realizar estas pruebas se obtuvieron núcleos de concreto que fueron fallados en el Laboratorio de Materiales, Bel Ingeniería S.A. En cuanto a los ensayos no destructivos, se realizó el ensayo esclerométrico, el de carbonatación por medio de fenolftaleína y la revisión visual de fisuras. La cantidad de muestras a evaluar se decidió según sea la necesidad, la capacidad del equipo y las facilidades presentes.

Los resultados de los ensayos fueron comparados con las especificaciones iniciales con las que se construyeron los taludes y fueron puestos a prueba al evaluar su condición con las diferentes normativas de diseño del concreto lanzado para estas obras, por ejemplo, American Concrete Institute (ACI) y del Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica; y se realizó una evaluación general del talud al determinar la importancia de diferentes criterios que representan el estado actual del mismo.

Al obtener toda la información necesaria se procedió a realizar sus respectivas conclusiones, junto con una serie de recomendaciones para reparaciones y futuros diseños, según los daños, problemas y resultados encontrados en los taludes analizados. Si bien es cierto, el análisis de desempeño y sus resultados fueron obtenidos en taludes particulares, la metodología propuesta podrá ser utilizados en otros taludes.

1.4.2 Limitaciones

Entre las limitaciones a las que estuvo sujeto el desarrollo del presente proyecto se tienen las siguientes:

- Los taludes de estudio dependieron de los permisos que fueron concedidos, del acceso a los mismos y especialmente de la disponibilidad y capacidad de trasladar el equipo y el personal necesario para ejecutar los ensayos.
- Las pruebas de ensayo no se aplicaron en todo el talud, por lo que se obtuvieron resultados del concreto solo en sitios o espacios específicos del mismo.
- La cantidad de muestreos a realizar en sitio dependió de diferentes variables: condiciones en los alrededores del talud, afectación que se pudieran generar en el tránsito, acceso a los puntos de interés y la necesidad de intervenir en el diseño del talud lo menos posible.

- La posible comparación de la situación actual de los taludes con su estado inicial, dependió estrictamente de la información disponible del proyecto, donde en el caso del Talud de Tarbaca es escasa dada la edad del mismo.
- El ensayo de carbonatación por medio de fenolftaleína dió resultados meramente cualitativos, ya que no es posible obtener los valores actuales del pH con éste.
- Para la extracción de núcleos se requirió de equipo especial y personal capacitado.
- Las limitaciones propias de los equipos que se utilizaron y los ensayos que se aplicaron.

1.5 Descripción de la metodología a utilizar

La metodología seguida para la elaboración del presente proyecto se muestra en la Figura 1.

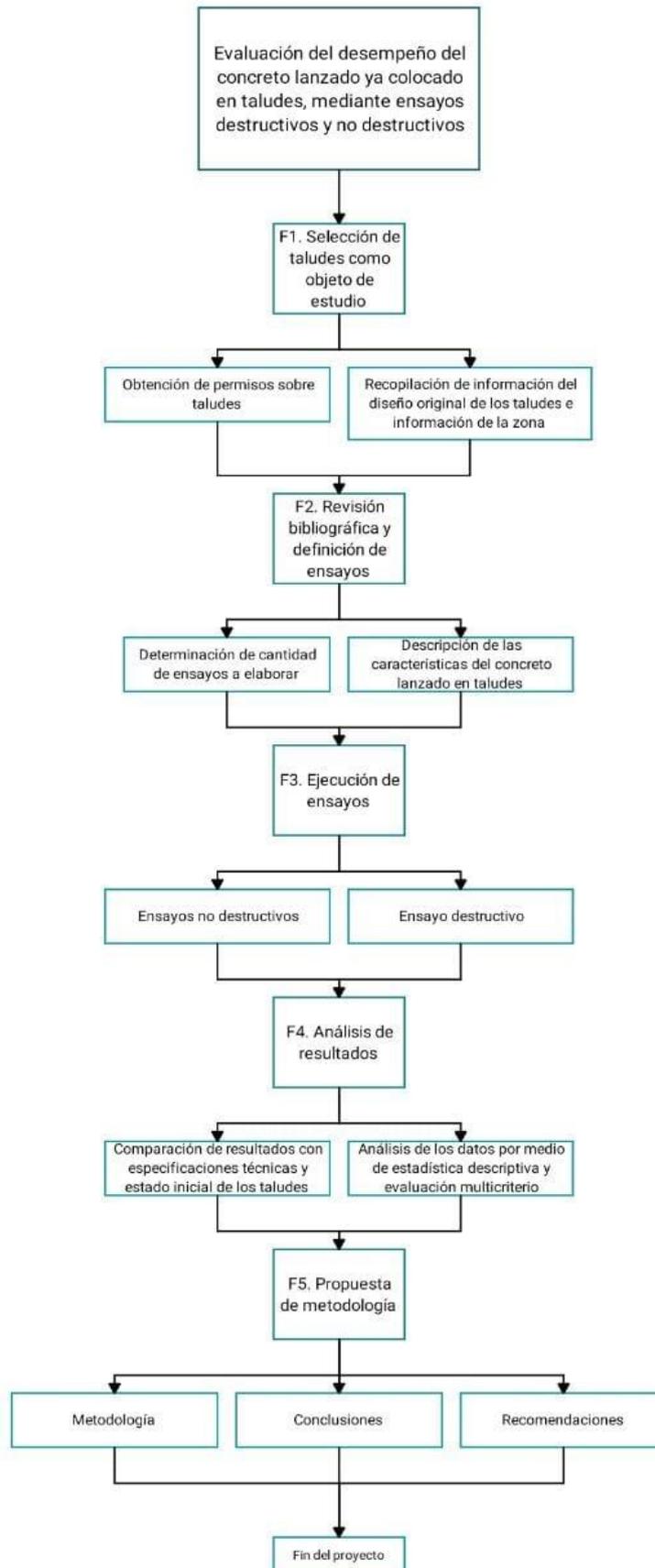


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología a seguir

1.5.1 Fase 1: Selección de taludes como objeto de estudio

La elección de los taludes específicos que fueron evaluados, dependió de ciertas variables importantes de considerar y necesarias de cumplir. En primera instancia, se debió hacer una selección de taludes donde fuera posible acceder a ellos y existiera la facilidad de colocar los equipos para ejecutar los ensayos propuestos

Posterior a esta elección, fue imperativo el obtener los permisos correspondientes a cada talud elegido donde, de forma legal, se consiguió la entrada a ellos para la realización de los ensayos destructivos y no destructivos. Dado que se estudiaron taludes cuya protección con concreto lanzado fue construida por la empresa Ingeotec S.A., o que son propiedad de LANAMME o del ICE, se facilitó la obtención de los permisos.

Seguidamente, se procedió con una recopilación de la información disponible sobre el diseño original de los taludes, con la intención de conocer los materiales empleados en su construcción y las respectivas especificaciones técnicas. Fue entonces cuando se tuvo los posibles taludes a trabajar, con toda la información y permisos suficientes, para ejecutar la selección final.

1.5.2 Fase 2: Revisión bibliografía y definición de ensayos

Al contar ya con los taludes seleccionados para evaluar, se procedió a efectuar una revisión bibliográfica para determinar los ensayos, tanto destructivos como no destructivos que serían útiles aplicar en los taludes para el proyecto de evaluación del estado del concreto; y que además de ello se contara con el equipo, reactivos y personal técnico para ejecutarlos.

Una vez determinados los ensayos más apropiados de realizar, se procuró formar un criterio, por medio de la revisión bibliográfica, para elegir la cantidad de pruebas a realizar en cada talud, cantidad suficiente para obtener datos confiables interviniendo el talud lo menos posible. Se determinó que extraer tres núcleos por talud sería suficiente, uno de ellos fue fallado según el ensayo de compresión uniaxial, otro fue utilizado para efectuar el ensayo de densidad, absorción y vacíos del concreto endurecido y el último de cada talud se entregó a la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) de la Universidad de Costa Rica (UCR) donde se efectuó sobre ellos el ensayo de análisis petrográfico.

De una forma más generalizada y después de una revisión bibliográfica, se realizó una descripción de las técnicas, de los principales componentes y de la función del concreto lanzado en el tratamiento de taludes. Esto se realizó con la intención de conocer correcta y

completamente las características más importantes de este tipo de protección para así utilizarlo como herramienta en la elaboración de las recomendaciones dadas al final del proyecto.

1.5.3 Fase 3. Ejecución de ensayos

Haciendo uso de los equipos, reactivos y personal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR) y de la empresa privada Bel Ingeniería S.A - Laboratorio de Materiales, se procedió a visitar cada uno de los taludes elegidos donde se procedió con los ensayos destructivos y no destructivos finalmente elegidos.

Se visitó cada uno de los taludes cuando fue posible obtener el permiso de visita y cuando el personal del laboratorio BEL Ingeniería S.A estuvo disponible. En cada talud se ejecutó como ensayo destructivo la extracción de núcleos de concreto lanzado. En los casos necesarios se ancló la maquina extractora al talud con la ayuda de pernos de anclaje expansivos.

Ya en el laboratorio se procedió a cortar un cilindro por talud con una sierra con punta de diamante para fallarlo no menos de 5 días después. Otro de los especímenes por talud se cortó en dos secciones para ejecutar el ensayo de densidad, absorción y vacíos del concreto endurecido, esto excepto en el núcleo del talud de LANAMME, ya que su tamaño no lo permitió. Por último, como ya se mencionó, el tercer núcleo de cada talud fue entregado a la ECG - UCR donde procedieron a realizar un análisis petrográfico, esto después de realizar la cotización del servicio.

Durante la visita a cada talud y en paralelo con la extracción de los núcleos se ejecutaron los ensayos no destructivos, entre ellos el de carbonatación por medio de fenolftaleína, el cual se aplicó en cada uno de los núcleos y se procedió a medir la zona carbonatada. Otro de ellos fue el ensayo esclerométrico, para ello se eligieron tres zonas en la superficie del talud y en cada una de ellas se dieron 10 golpes con el martillo Schmidt. Por último, se ejecutó un control de fisuras visual con ayuda de una regla y una lupa.

Antes de abandonar el talud se procedió a reparar de los agujeros de donde se extrajeron los testigos, esto con la ayuda de un motero autonivelante que permitió dejar la superficie lo más similar posible a su estado original.

1.5.4 Fase 4. Análisis de resultados

Después de realizar los ensayos y recopilar sus resultados, se procedió a hacer uso de la estadística descriptiva con los datos que lo permitieron, con el objetivo de tener información precisa que se utilizó para realizar la comparación con los datos de diseño original de los taludes y la normativa nacional, obtenidos al inicio del proyecto.

Como se mencionó, la comparación de datos es de suma importancia. Al tener los resultados de los ensayos y con ellos determinar la condición actual del concreto lanzado en los taludes, se prosigue a analizar su coincidencia o diferencia tanto con el estado inicial del concreto, como con la normativa nacional e internacional sobre concreto lanzado. Esto se debe realizar para determinar si los taludes muestreados se siguen encontrando dentro de los rangos permitidos de especificaciones técnicas considerados como seguros.

Por último, realizó una evaluación multicriterio donde se eligieron diferentes aspectos que afectan la calidad del concreto y se les dió un peso sobre ella, con lo que fue posible observar la situación general de la capa del concreto lanzado del talud.

1.5.5 Fase 5. Propuesta de Metodología

Se propone una metodología de evaluación capaz de ser replicada en el resto de taludes de Costa Rica, logrando con ello dar una herramienta a la necesidad del monitoreo del concreto en obras de retención después de un tiempo de su colocación. Esto se logró después de haber realizado una exhaustiva revisión bibliográfica, con la que se eligió los ensayos más eficientes a aplicar que dieron los resultados necesarios para la evaluación del concreto lanzado ya colocado en los taludes, y con la que se eligió una cantidad mínima de ensayos apropiada a efectuar para obtener datos suficientes. Todo esto fue probado en campo para su debida comprobación y corrección.

Junto con la metodología propuesta, se brindó una serie de conclusiones a las que se logró llegar después de haberla puesto en práctica en el campo. Estas conclusiones fueron de forma general en cuanto al proyecto, al concreto lanzado y a su utilización en los taludes de Costa Rica. Para finalizar, siendo de suma importancia, se elaboraron las recomendaciones que se consideraron pertinentes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Taludes

Un talud o ladera es una masa de tierra que posee pendientes o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural a través del tiempo y talud cuando se conformó artificialmente debido a la intromisión del hombre en su construcción (Suárez, 1998). Tenemos entonces que estas masas de tierra, cuando sean conformadas de manera natural por la pendiente natural del terreno, serán consideradas laderas y cuando sean producto de un relleno o corte del mismo será conocido como talud, estos son de gran importancia en la construcción y diseño de carreteras, embalses, y demás obras de construcción que impliquen un corte del terreno.

Los cortes de ladera 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 (Cozar, 2016), por su lado los terraplenes se definen como estructuras que son el acumulamiento de tierra o suelo de cierta calidad, compactado de acuerdo a técnicas ya muy conocidas. La resistencia de dicha acumulación de tierra varía de acuerdo al tipo de suelo que se use y de acuerdo al uso que se pretenda dar a la obra (Morales, 2015).

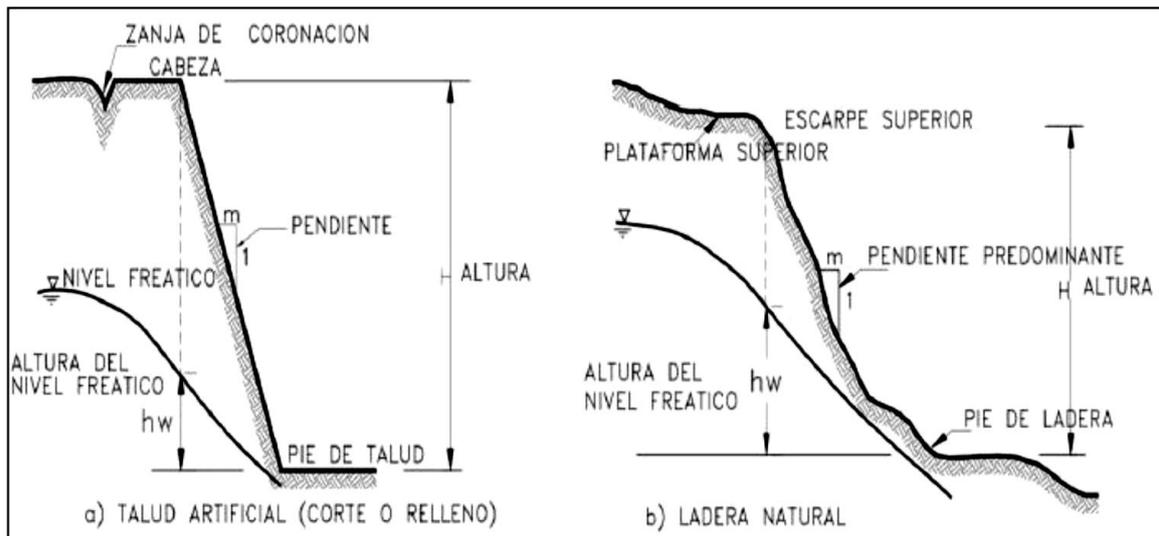


Figura 2. Nomenclatura de taludes y laderas

Fuente: Suárez, 2009

En la nomenclatura de los taludes, tal y como se observa en la Figura 2, se tiene que:

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

2.1.1 Métodos de estabilización de taludes

Los taludes al ser alteraciones del terreno, ya sea por su conformación o por las condiciones medioambientales, deben ser reforzados para mejorar su resistencia y durabilidad, además de mejorar sus propiedades a lo largo del tiempo.

Condiciones como una alta saturación del terreno producto de lluvias fuertes o prolongadas, movimientos sísmicos o la sola erosión producto del medio, pueden ser factores que reducen la calidad de estos terrenos, de aquí la importancia de generar sistemas o estructuras que mejoren y cubran la superficie del talud, además de alargar su vida útil a lo largo del tiempo. Estos sistemas deben ser durables, de bajo costo y de mantenimiento práctico. Para esto se implementan sistemas de protección superficial que cumplen la función de soporte y protección de la cara expuesta del talud, esto se logra mediante muchas maneras, mediante la revegetación del talud, colocando concreto lanzado o utilizando geomatrices las cuales se fijan o se anclan a la cara del talud para prevenir la erosión (Morales, 2015).

De Matteis (2003) define la estabilidad como la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. La génesis de formación, la historia de esfuerzos a que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas, definen aspectos tan importantes en un talud como lo son la configuración de los suelos y las rocas, o el flujo de las aguas subterráneas a través de los suelos que lo forman, el cual influye decisivamente en sus condiciones de estabilidad. Para diferentes inclinaciones de un talud se tendrían diferentes masas de material por estabilizar y por lo tanto diferentes costos.

Existen distintas medidas correctivas o tipos de estabilización de suelos que se pueden seleccionar según los requerimientos, pero para ello cada una demanda un análisis y un diseño que deben tomar en cuenta la topografía del área afectada, las propiedades de los

suelos y rocas, el patrón de drenaje natural, el modo de falla y un estudio de la hidrología, vegetación, clima, entre otros (Ugalde, 2015). Aunado a ello se debe tomar en cuenta las dimensiones del talud, la disponibilidad y costo de los materiales para la construcción, la importancia y la vida útil de la obra, los efectos sobre terceros, la necesidad de obras temporales, la seguridad del personal, la logística, los tiempos de construcción, las limitaciones de espacio en el sitio, las limitaciones por impactos ambientales, mantenimiento asociado y más (Colegio Federado de Ingenieros & Arquitectos, 2015).

En términos económicos y de seguridad es usual que la solución óptima, que garantiza el buen funcionamiento del talud, sea la combinación de dos o incluso más técnicas de estabilización, especialmente en lo que respecta al drenaje, esto según el Colegio Federado de Ingenieros & Arquitectos, 2015). Algunas alternativas viables y que son utilizadas a nivel mundial son:

Cuadro 1. Alternativas de estabilización de taludes

	Eliminación de terreno
Modificación de geometría	Descabezamiento
	Bermas
Corrección Superficial	Mallas Concreto lanzado Soil Nailing Siembras
Corrección por drenajes	Drenajes superficiales Drenajes profundos
Elementos resistentes	Muros Anclajes Pantallas de pilotes

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Ugalde (2015)

Eliminación del terreno: reside en remover material para lograr alcanzar la estabilidad modificando la geometría, esto usualmente se logra disminuyendo la pendiente del talud o construyendo terrazas. En taludes de relleno con problemas de estabilidad se utiliza la sustitución, que consiste en remover este material y remplazarlo con uno con mejores condiciones (Ugalde, 2015).

Descabezamiento: implica retirar material de la corona del talud, ya que es en esta zona donde el peso del suelo contribuye más al deslizamiento (punto de máxima pendiente) y menos a su resistencia (Ayala, 2006). No se debe remover el material, que debido al

deslizamiento se encuentra en el pie del talud, dado que su peso produce un aumento de las tensiones normales y por consiguiente un aumento en su resistencia (Ugalde, 2015).

Bermas: cortes en la cara del talud en forma escalonada, que hacen que la masa total se divida en múltiples taludes de dimensiones y tamaño controlables y estables, haciendo uso de drenajes transversales para el control de las aguas. El talud de banco oscila entre los 75° y los 90° y el talud global o de corta entre 10° y 50° (Ayala, 2006).

Mallas: evitan el desprendimiento de bloques rocosos y capturan los que caen menores a un metro de dimensión. Se fijan sobre el terreno, en la parte superior del talud o en las bermas intermedias (Instituto Geológico y Minero De España, 1986).

Concreto proyectado: concreto lanzado sobre la superficie de taludes susceptibles a la caída de material o deslizamiento de detritos. La lechada conocida como Gunita se utiliza cuando la superficie de suelo es de granulometría menor a 2 cm. Es indispensable acompañar el diseño con drenajes ya que el concreto lanzado no está diseñado para resistir presiones hidrostáticas. El método se utiliza para el control de meteorización y al combinarlo con anclajes aumenta la resistencia ante esta situación. (Instituto Geológico y Minero De España, 1986). Según Canmet (1977) "En el proceso de inyección o rociado se deben tomar en cuenta tensiones tangenciales superiores al 70 kg/cm² y en la masa de concreto son normales tensiones de tracción de 45 kg/cm² y tangenciales de 60 kg/cm²".

La técnica del suelo cosido ("soil nailing") tiene el objetivo de reforzar el suelo al aumentar su resistencia al corte y su estabilidad interna. Para ello se realiza la incrustación de una densa cantidad de barras de refuerzo, colocadas estrechamente entre sí, de 1 y 2 metros, inclinadas ligeramente con respecto a la horizontal. Esta técnica es estable por gravedad y provee seguridad frente a deslizamientos, vuelcos, hundimientos de los apoyos y estabilidad global. Sus anclajes no son postensionados, estos desarrollan su tensión en la medida que el terreno se deforma lateralmente al avanzar la excavación (pasivos). El acero utilizado suele tener una resistencia $f_y=4200$ kg/cm², con un diámetro entre 20 mm y 50 mm (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010).

Siembra: cubierta vegetal que evita la erosión superficial, aunque en algunos casos es necesario un soporte temporal como mallas de geosintéticos. Las raíces de las plantas aumentan la resistencia al cortante hasta 2,5 veces la resistencia del mismo suelo y actúan como drenajes, debido a la absorción de agua; se busca reforestar con especies propias de la región para mantener el ecosistema (Ayala, 2006).

Drenajes superficiales: zanjas transversales construidas en la cabeza del talud que desvían el agua evitando que se infiltre o baje por la cara del talud, controlando así la erosión. El Diseño puede ser una simple excavación hasta sistemas con tuberías y geotextiles (Ugalde, 2015).

Drenajes profundos: orificios que penetran el terreno y recolectan el agua atrayendo líneas de corriente y deprimiendo el nivel freático, suele utilizarse en taludes excavados y en taludes naturales inestables. Se clasifican en drenajes horizontales, posos verticales, galerías de drenaje y zanjas de relleno drenante (Ugalde, 2015).

Muros: elementos resistentes en taludes, brindan estabilidad al excavar en el pie del talud. Los muros se pueden clasificar en tres grandes grupos: Muros de sostenimiento que se construyen separados del terreno y luego se rellenan; muros de contención que se excavan y se construyen para contener un terreno inestable, y muro de revestimiento que, además de proporcionar un peso estabilizador, protege el terreno de la erosión y meteorización (Instituto Geológico y Minero De España, 1986).

Anclajes: elementos de resistencia para generar un amarre en el terreno, esto cuando ocurren deslizamientos traslacionales de roca, para asegurar zonas internas del talud, roca fracturada, en suelos residuales o coluviones densos. Su clasificación se da según el tipo de tirante (cables o barra), según su vida útil (permanente o provisional), según la capacidad de variar su carga (retesables o no retesables) y según el tipo de inyección (IU, IR, IRS) (Ugalde, 2015). En suelos, estos se utilizan en combinación con otros métodos como el soil nailing, cuya finalidad es reforzar el suelo con barras de acero (hincadas o pretensadas) inyectadas con lechada de cemento o mortero; los anclajes se enlazan a una malla de refuerzo y al concreto lanzado.

Pantallas de pilotes: grupos de pilotes unidos de una forma tal que se consigue un sostenimiento casi continuo. Su mayor uso es para sostener taludes excavados, aquí el pilote se instala previo a la excavación y cerca del pie del talud, como medida estabilizadora de deslizamientos. La ventaja sobre los muros de contención es que no se ve afectada la estabilidad del talud durante la construcción y requieren muy poca excavación (Ugalde, 2015).

2.1.2 Normativa nacional de taludes

El CGTL (2015) es el resultado de las preocupaciones que generan las constantes complicaciones en el tránsito en las principales carreteras del país y los grandes costos que implican volver a ponerla en servicio. El código en sí aclara como La Asociación

Costarricense de Geotecnia (ACG) encomendó al Comité Técnico del Código de Cimentaciones de Costa Rica generar las regulaciones necesarias en el diseño de taludes y análisis de laderas, esto junto con el aporte de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias y el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

Con la intención del CGTL (2015) de alcanzar un nivel de seguridad conveniente para los aspectos sociales, económicos y ambientales que interactúan con los taludes y las laderas se establecieron en el código aspectos como:

- Criterios de diseño
- Definición del nivel de seguridad
- Factores de seguridad (Ver Cuadro 2)
- Valores aceptables de probabilidad de falla
- Coeficientes pseudoestáticos para aplicar durante el análisis de taludes
- Inspección inicial de las condiciones del talud o ladera
- Investigación geotécnica según la etapa del proyecto
- Investigación de campo y de laboratorio
- Análisis de Taludes y Laderas
- Procesos de inestabilidad en suelos
- Procesos de inestabilidad en roca
- Definición del modelo geotécnico
- Métodos de análisis
- Método de equilibrio límite en dos dimensiones
- Método de equilibrio límite en tres dimensiones
- Sistemas de protección y estabilización de taludes y laderas, entre muchos otros.

El CGTL (2015) aclara que los lineamientos ahí presentados son aplicables al análisis y diseño de taludes en corte o relleno o en su estado natural, pero quedan por fuera los casos de movimientos en masa activos de gran magnitud, los casos de avalanchas, flujos de detritos, aquellos materiales con potencial de licuación, y de más, los cuales requerirán otros tipos de metodologías.

2.1.3 Factores de seguridad en taludes

Según el CGTL (2015) se define el factor de seguridad como la relación que hay entre la resistencia al corte disponible, con la resistencia al corte necesaria para mantener el equilibrio. Cuando sea requerido, se debe efectuar una estimación de los desplazamientos por medio del análisis de las deformaciones haciendo uso de métodos analíticos o análisis dinámicos de las deformaciones utilizando métodos numéricos.

Al realizar análisis y diseños de taludes permanentes por métodos determinísticos, el CGTL (2015) recomienda utilizar los factores de seguridad mínimos que se muestran en el Cuadro 2, tanto en condición estática como pseudoestática. Ya en el caso que se coloque una estructura en un talud se debe garantizar, además, los factores de seguridad para la cimentación señalados en el Código De Cimentaciones De Costa Rica (CCCR.)

Cuadro 2. Factores de seguridad para el diseño de taludes permanentes y análisis de laderas

Condición de análisis	Riesgo de daños económicos y ambientales	Riesgo de pérdida de vidas	Factores de seguridad		
			Bajo	Medio	Alto
Estática	Bajo		1,2	1,3	1,4
	Medio		1,3	1,4	1,5
	Alto		1,4	1,5	1,5
Pseudoestática:	Bajo		>1,00	>1,00	>1,05
	Medio		>1,00	1,05	1,10
	Alto		1,05	1,10	1,10

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (2015)

2.2 Técnica del concreto lanzado

2.2.1 Marco histórico sobre el uso de concreto lanzado en taludes

El origen del concreto lanzado se dió a principios del año 1907, cuando el Doctor Carl Ethan Akeley, siendo un escultor y naturista norteamericano del museo de historia y ciencias naturales de Chicago, se vió en la tarea de hacer modelos de animales prehistóricos y formar sus músculos; y dado que al modelar manualmente no lograba las formas irregulares necesarias logró inventar una máquina para lanzar mortero. Para su invento utilizó aire

comprimido, que le ayudaba a transportar la mezcla de cemento-arena desde un depósito, pasando a través de una manguera que al llegar a la boquilla se le aplica la cantidad de agua necesaria, para así colocar la mezcla en un armazón de alambre, esto sin escurrirse dado su bajo revenimiento, dándole el acabado deseado.

Este proceso fue patentado por Cement Gun Company en 1911 con el nombre de Gunita, esto mismo ocurrió en Alemania en 1920 pero con el nombre de Spritz-Beton, ya que fue de gran utilidad al emplearse en temperaturas y condiciones climatológicas desfavorables (Clará et al., 2006).

Según Vidaud (2013), la nueva idea de proyectar mortero a altas velocidades sobre diferentes superficies tuvo un éxito inmediato, por lo que se comenzó a utilizar acero estructural como elemento de refuerzo al emprender proyectos. Este complemento tenía la labor fundamentalmente de evitar agrietamientos por contracción térmica y por secado al distribuir de manera uniforme los esfuerzos generados por cualquier posible ocurrencia. Gracias a esto, se demostró la gran ventaja de este mecanismo como protección de las estructuras frente al fuego y la corrosión, motivadas por la alta densidad alcanzada y la fuerte compatibilidad de la mezcla con el acero estructural sin necesidad de vibración.

Por esta misma época se hizo común el empleo del Gunita para la construcción de estanques o depósitos de agua y para el año de 1915 la compañía Cement Gun ya era una fuerte organización, líder en proyectos con numerosas aplicaciones, como la construcción y reparación de edificios, puentes, depósitos, presas, túneles para drenajes, entre otras. Fue así como la técnica del Gunita que se utilizaba por toda Norteamérica se expandió tanto que llegó a cruzar el Atlántico, dando origen a la compañía UK Cement Gun en el Reino Unido, en un proceso que rápidamente abarcó el nivel global cerca del año 1922 (Vidaud, 2013).

En 1930, la American Railway Engineering Association introdujo el invento con el nombre genérico de shotcrete (concreto lanzado) ya que fue considerado como un material de innovación y de mucha calidad que funcionaría como una nueva alternativa para la reparación de elementos estructurales. Según Clará et al. (2006), a finales de la segunda Guerra Mundial se usó este tipo de mortero por primera vez con agregado grueso y fue ahí donde el American Concrete Institute (creado desde 1904) adoptó también el término shotcrete para describir el método de proyectado por vía seca; y a finales de 1950 fue creado el comité de la American Concrete Institute 506, la cual estableció la guía del concreto lanzado.

Durante la década de los 50 se introdujeron pistolas para la aplicación por vía seca, que permitieron la aplicación de concretos con agregados gruesos. Más específicamente, para 1955 se diseñaron equipos para la introducción de concreto lanzado (shotcrete) por el método de la vía húmeda con pistolas rotativas, que permitían un sistema de alimentación continuo y para la época de los setenta y ochenta, al añadir nuevos agregados y mejores aditivos, se crea el método de la vía seca con aire incluido (Vidaud, 2013).

Fue en 1971 cuando en los Estados Unidos se desarrolló el concreto lanzado con fibras y dos años después tuvo su primer uso por parte del Colegio de Ingenieros del Ejército de EUA, en la represa Ririe, en Idaho. Para fines de la década de los setenta ya estaba siendo utilizado este refuerzo en países como Noruega (Ochoa,2014). Durante los años de 1980 a 1990, un gran número de innovaciones se implementaron para el uso del concreto lanzado, expandiendo así su aplicación a diferentes campos de la ingeniería asegurando poco a poco la utilidad, flexibilidad y efectividad general del proceso y su gradual consolidación en la industria moderna.

En la actualidad, la Federación Europea de Productos y Aplicadores de productos especiales para estructuras (EFNARC) define el concreto lanzado como una mezcla de cemento, agregados y agua, los cuales son proyectados neumáticamente desde una boquilla dentro de una masa uniforme de concreto. Es utilizado como elemento de soporte pasivo primario, y al tener una interacción con los pernos de roca pasivos y los arcos de acero se convierte en un controlador del desarrollo de esfuerzos y deformaciones, por esto mismo, en ningún momento el concreto lanzado se debe tratar como un elemento estructural independiente, sino como un elemento de un sistema integral de soporte (Martínez, 2011).

El concreto lanzado se ha logrado convertir en una técnica que cada vez se emplea más como revestimiento definitivo, dada su efectividad para mejorar la estabilidad de las obras donde se emplee, su alta resistencia, su gran adherencia a las superficies que reduce la pérdida de material, su impermeabilidad e inclusive su actual capacidad de cumplir con requerimientos especiales, dada la incorporación de refuerzos con fibra, ya que permite variabilidad en las características de deformabilidad y resistencia (Martínez, 2011).

Los tipos de concreto proyectado más comunes son: superplastificantes, retardadores, con humo de sílice coloidal y en polvo, humo de sílice en polvo con polímeros y aquellos que funcionan como auxiliares en el bombeo y la estabilización.

Según PSI Concreto (2020), este método de construcción se caracteriza por ser rápido, flexible y económico y con la ventaja de que se puede proyectar a cualquier altura y superficie, se adhiere inmediatamente, sostiene su propio peso, logra el revestimiento adecuado para soporte y se puede concretar el refuerzo con fibra o con malla de acero, y al seguir este proceso de construcción se es capaz de conseguir:

- Alta resistencia temprana
- Buena bombeabilidad
- Densidad similar al concreto normal y al de alta resistencia
- Características adecuadas de fraguado del concreto
- Correcta manejabilidad
- Rebote mínimo
- Resistencia a la compresión, la abrasión, el calor y los cambios climáticos
- Baja absorción
- Mayor impermeabilidad
- Resistencia al congelamiento, deshielo, fuego y a las sustancias químicas

2.2.2 Aplicaciones del concreto lanzado

Según Hofler y Schlumpf (2004) los siguientes son los usos más difundidos del concreto lanzado:

- Estabilización de excavaciones en tonelería y construcción subterránea.
- Revestimiento de túneles y cámaras subterráneas.
- Estabilización en la construcción de minas y galerías.
- Reparación de concreto (reemplazo de concreto y reforzamiento).
- Restauración de edificios históricos (estructuras de piedra).
- Trabajos de sello de filtraciones.
- Estabilización de zanjas.
- Estabilización de taludes.
- Revestimiento protector.
- Capas de desgaste.
- Estructuras especiales portantes livianas.
- Aplicaciones artísticas
- Tanques de agua

- Lagos artificiales
- Canales
- Represas y diques
- Domos geodésicos

Una de las primeras aplicaciones del mortero lanzado, "gunite" de Akeley, fue como recubrimiento (inicialmente como estuco y posteriormente como protección de estructuras de acero contra fuego y la corrosión) (Clará et al., 2006). Los inicios de la aplicación del concreto de esta forma tuvieron su origen en el revestimiento de túneles como parte del diseño y construcción de los mismos, donde el material es aplicado inmediatamente después de la excavación cuando es parte del sostenimiento o después cuando se considera como revestimiento (Ubaldo, 2016).

Como se indicó, entre los más importantes usos destaca lo relacionado a la tunelería y a la minería, para la estabilización de sus excavaciones y los arcos de revestimiento temporal o permanente (Figura 3), y a la reparación de concretos (Hofler y Schlumpf, 2004). Adicionalmente, se aplica en las reparaciones donde se requiere impermeabilizar superficies (Martinez, 2011), y como recubrimientos de excavaciones para pozos o fundaciones de edificios.

Por su facilidad de aplicación en entornos de difícil acceso y su modo de aplicación (Figura 4), el concreto lanzado es muy utilizado en estructuras que pueden sufrir ataques químicos dada su gran durabilidad. El ACI-201 define durabilidad como "la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente", de aquí que se use en chimeneas, estructuras marinas, de alcantarillado, tanques de residuos o lagunas de materiales tóxicos.

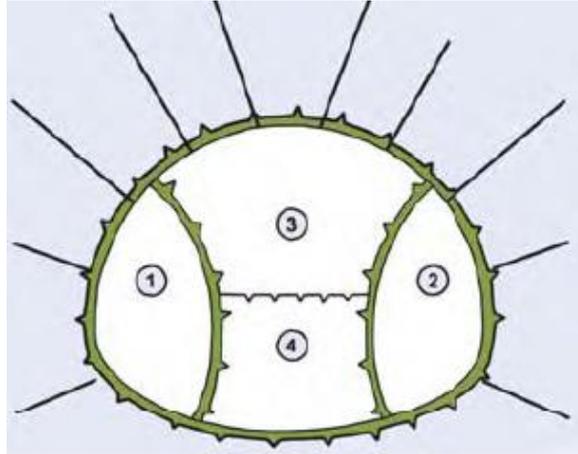


Figura 3. Avance de la excavación y colocación de concreto en las paredes de una galería
Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)



Figura 4. Brazo de proyección con cabina
Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)



Figura 5. Recubrimiento de taludes
Fuente: Mixto Listo (s.f)

Además, por su adaptabilidad a las superficies, es de uso común en el recubrimiento de taludes, ya que se adapta fácilmente a la topografía del terreno, lo cual es una característica deseable en superficies irregulares, asimismo, implica una rápida colocación y puesta en servicio de la estructura, situación necesaria dado que los talques suelen estar a la orilla de caminos que requieren su pronta habilitación (Figura 5). Inclusive, su buena adherencia a otros materiales lo hace óptimo para estos trabajos donde la base puede ser desde roca hasta tierra o gravas.

Las limitaciones de su utilización radican en los aspectos técnicos y económicos que se puedan comparar con otros procesos de colocación del concreto y métodos de construcción.

2.2.3 Diseño del concreto lanzado

La norma ASTM C150/C150M (2021) especifica diez tipos de cemento Portland:

Tipo I: para uso general, cuando las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo no son requeridas.

Tipo IA: cemento incorporador de aire para los mismos usos que Tipo I, donde se desea el arrastre de aire.

Tipo II: para uso general, cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos.

Tipo IIA: cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea el arrastre de aire.

Tipo II (MH): para uso general, cuando se desea tener un calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.

Tipo II (MH) A — Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea el arrastre de aire.

Tipo III: para cuando se desea una alta resistencia inicial.

Tipo IIIA: cemento incorporador de aire para el mismo uso que el Tipo III, donde se desea el arrastre de aire.

Tipo IV: para cuando se necesita un calor bajo de hidratación

Tipo V: para cuando se requiere una alta resistencia a los sulfatos.

Con la norma INTE C68 (2016) (idéntica a la norma ASTM C127–15) se logra determinar la densidad relativa de los agregados gruesos, la cual se utiliza para calcular el volumen ocupado por el agregado en varias mezclas, donde están incluidos el concreto de cemento hidráulico, concretos bituminosos y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas con base en un volumen absoluto. Igualmente, con ella se puede obtener la densidad relativa (gravedad específica) saturada con superficie seca (SSS), utilizada si el agregado está húmedo y si su absorción ha sido satisfecha; y la densidad relativa (gravedad específica) seca al horno (BS) la cual se utiliza cuando el agregado está seco.

De forma homóloga, se puede utilizar la norma INTE C69 (2016) (idéntica a la norma ASTM C128–15) para determinar la densidad relativa la densidad relativa (gravedad específica) saturada con superficie seca (SSS) y la densidad relativa (gravedad específica) seca al horno (BS) pero para agregados finos.

Tipo de procedimiento del concreto lanzado	Contenido Mínimo de Cemento (kg/m ³)	Máxima relación A/C	Rango del Aire Entrapado %	Resistencia Mínima a 28 días (MPa)
Húmedo	325	0,55	NA	28
Seco	325	0,50	NA	28
Húmedo (AE)	325	0,45	5 mín.	28
Seco (AE)	325	0,45	5 mín.	28

Figura 6. Composición del Concreto Lanzado

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2010)

Además de lo especificado en la figura anterior, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes – CR (2010) indica que las mezclas de concreto lanzado deben seguir las especificaciones ACI 506R Guía para el concreto lanzado; ACI 506.1 Reporte del estado del arte en concreto lanzado reforzado con fibra; y ACI 506.2 Especificaciones para el concreto lanzado. Aunado a ello, se indica que se debe verificar el diseño con mezclas de ensayo preparadas con los mismos agregados; esto se debe ejecutar al menos 36 días antes de colocar el concreto lanzado para su aceptación.

Al profundizar en el ACI 506.2 (2013) "Especificaciones para concreto lanzado", se logra aclarar que, si el contrato de construcción no tiene una especificación, la resistencia a la compresión a los 28 días será de mínimo 28 MPa (280 kg/cm²). En cuanto al contenido de aire, la frecuencia de las pruebas, el contenido de iones cloruro solubles en agua, la absorción del concreto, el volumen de los vacíos, el tipo, tamaño y material de las fibras a

utilizar (norma con ASTM C1116 / C1116M), el grado, tipo y tamaño del refuerzo deben tener sus límites especificados en el contrato de construcción.

Para el caso del agua, el ACI 506.2 (2013) "Especificaciones para el concreto lanzado", a menos que se especifique lo contrario, esta debe ser potable; ya cuando en un contrato se permita lo contrario se debe asegurar que esta cumpla con ASTM C1602/C1602M (Especificación estándar para el agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico). Los aditivos, por su parte, deben cumplir con la norma ASTM C1141/C1141M (Especificación estándar para aditivos para concreto lanzado) o la norma ASTM C494/C494M (Especificación estándar para aditivos químicos para concreto) para aditivos de control de hidratación.

Para poder ser bombeado se debe diseñar un concreto cohesivo, con un revenimiento alto (12 cm o mayor); de igual manera se requiere que al ser colocado pierda todo el revenimiento, y ese comportamiento se puede lograr con la adecuada combinación de aditivos como microsílíce, fibras y acelerantes. El diseño de la mezcla del concreto lanzado no es una combinación al azar, sino una elección tomada con ayuda de un laboratorio que analice la materia prima disponible (agregados, agua, cemento, aditivos), en cantidades adecuadas para un propósito determinado. Si este diseño no se realiza correctamente se puede obtener un concreto que no se desempeñe como se desea a un costo excesivo, y que ya una vez colocado, no tenga la resistencia ni la durabilidad que necesita nuestro proyecto (Bracamontes, 2014).

2.2.4 Espesores y resistencias mínimas del concreto lanzado en Costa Rica

El revestimiento que se coloca sobre el talud contribuye, en su mayor parte, con el control de la erosión superficial, además de funcionar como soporte estructural junto con los anclajes cuando estos están presentes. El CGTL (2015) indica que para llevar el proceso de revestimiento en taludes se debe seguir lo estipulado en las divisiones 150 y 600 del CR2010. De igual forma indica que los taludes excavados en suelo pueden ser revestidos con concreto hidráulico, geotextiles, adoquines, mampostería de bloques de concreto, piedra labrada y sin labrar o bloques de concreto. El utilizar árboles y arbustos con raíces profundas puede contribuir a la resistencia cohesiva en las capas más superficiales, lo que facilita el drenaje subterráneo y reduce la probabilidad de deslizamientos poco profundos. Para el caso de los taludes excavados en roca el revestimiento con concreto lanzado (con o sin refuerzo) es capaz de absorber los esfuerzos desarrollados por la roca, lo que colabora

con evitar nuevas fisuras o discontinuidades, reduce la posibilidad de desprendimientos y evita que ocurra el deterioro de la superficie de roca expuesta a los agentes ambientales y el intemperismo.

El revestimiento de la superficie lateral del talud suele realizarse colocando una capa delgada de concreto lanzado de alrededor de 10 cm de espesor, reforzándose con una malla de acero electrosoldada (CR, 2010). Este mismo Manual recomienda seguir las tolerancias para la construcción mostradas en la Figura 7.

Terminado de la superficie	Tolerancia
Espesor completo de concreto lanzado, de las dimensiones de los planos:	
Acabado llaneteado o aplanchado	15 mm
Acabado con concreto lanzado	30 mm
Lisura de la cara acabada o vacío medido con un escantillón de 3 metros	
Acabado llaneteado o aplanchado	15 mm
Acabado con concreto lanzado	30 mm

Figura 7. Tolerancias para la Construcción de Superficies Permanentes

Fuente: Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2010)

2.2.5 Métodos de aplicación del concreto lanzado

La creciente demanda de movilidad, limitación de espacio y la necesidad de infraestructura subterránea continúa en aumento. El concreto lanzado desempeña un papel vital para cumplir estas demandas. Es un método económicamente ventajoso y casi ilimitado en cuanto a técnica se refiere, lo que lo convierte en la mejor alternativa.

Según Hofler y Schlumpf (2004), existen actualmente dos procesos diferentes para la aplicación del concreto proyectado, siendo estas la vía seca y la vía húmeda; en la Figura 8 se puede observar un resumen de ambos métodos de aplicación de concreto proyectado, mientras que en la Figura 9 se tienen los criterios más importantes a la hora de seleccionar la mejor técnica a utilizar. En cuanto al equipo utilizada para cada método y sus principios de operación se pueden distinguir en la Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13.

Tipo de Concreto Proyectado	Método de suministro	Boquilla
Concreto proyectado vía seca Mortero proyectado vía seca Gunitas	Flujo diluido	A adicionar en la boquilla inmediatamente antes: Agua Acelerante de fraguado
Concreto proyectado vía húmeda Mortero proyectado vía húmeda	Flujo denso	A adicionar en boquilla o inmediatamente antes: Aire comprimido Acelerante de fraguado
	Flujo diluido	A adicionar en la boquilla o inmediatamente antes: Aire comprimido Acelerante de fraguado

Figura 8. Resumen de procesos de concreto proyectado
Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)

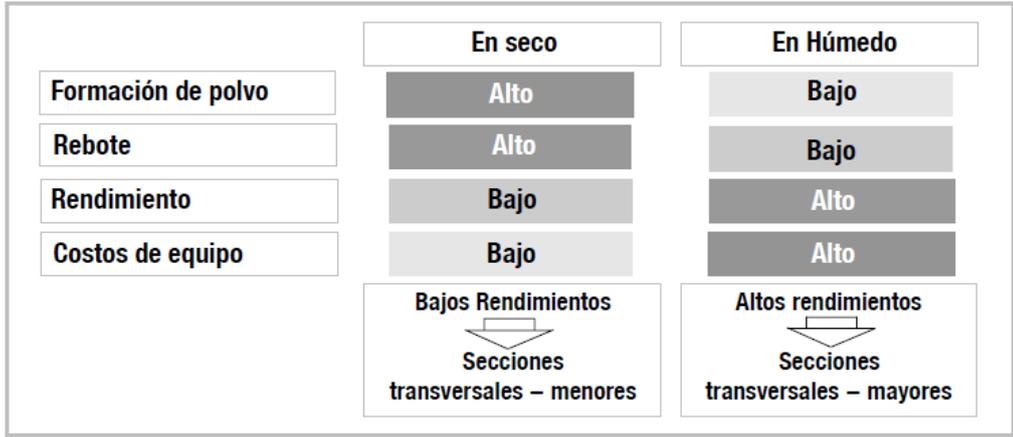


Figura 9. Criterios principales al seleccionar la técnica de lanzado
Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)

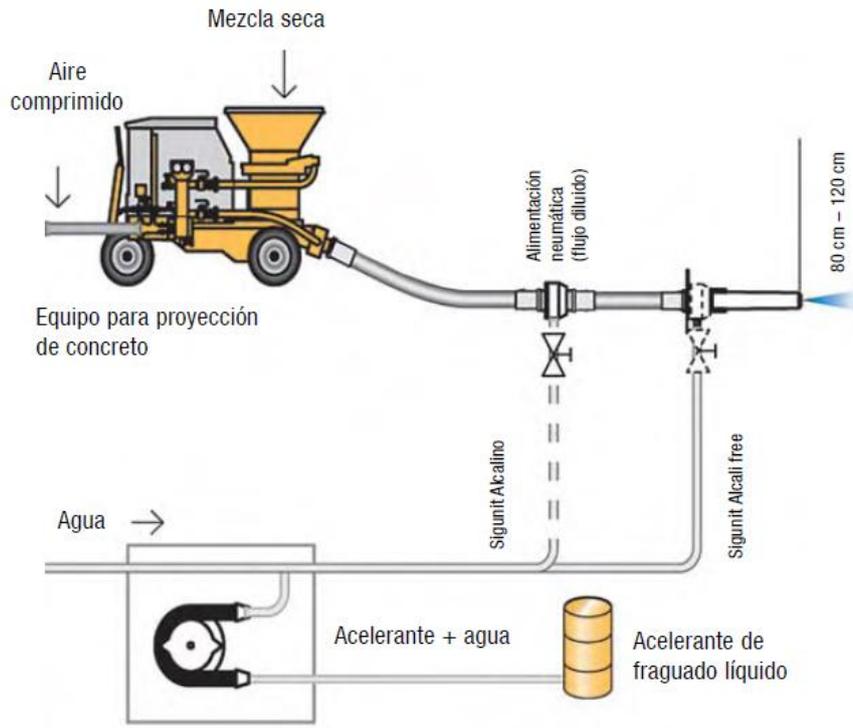


Figura 10. Concreto proyectado vía seca, flujo diluido
 Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)

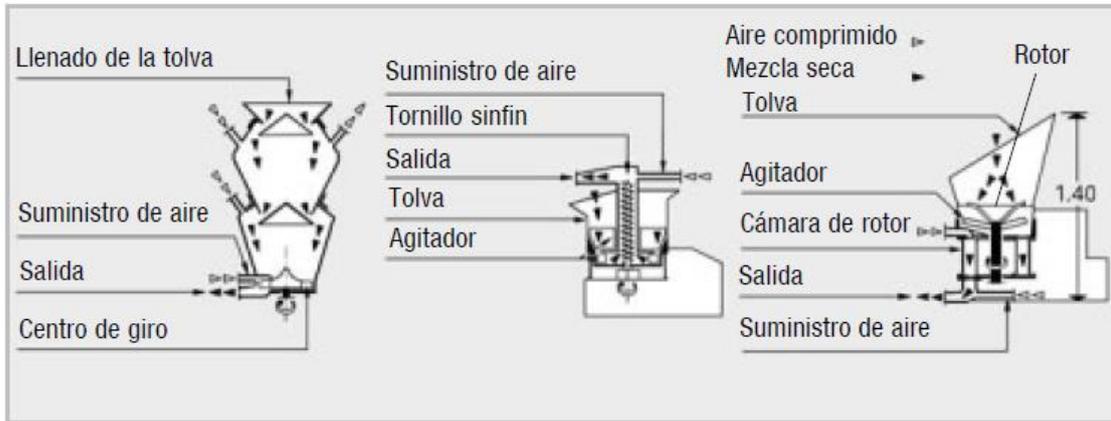


Figura 11. Principios de operación de las máquinas de tipo dos cámaras, tipo tornillo y el tipo rotor para concreto proyectado, vía seca
 Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)

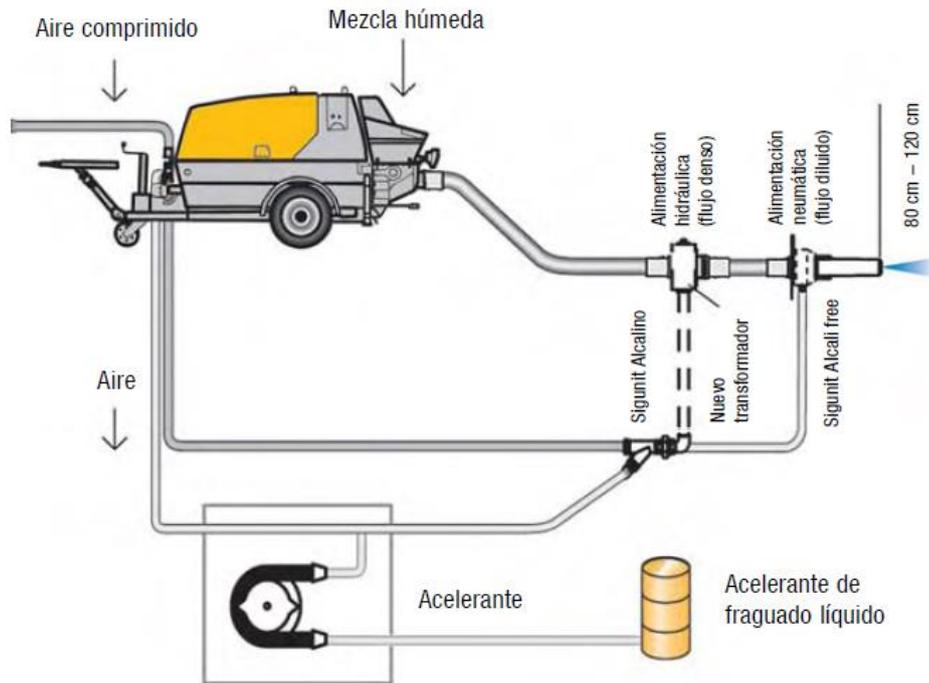


Figura 12. Concreto proyectado, vía húmeda, flujo denso

Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)

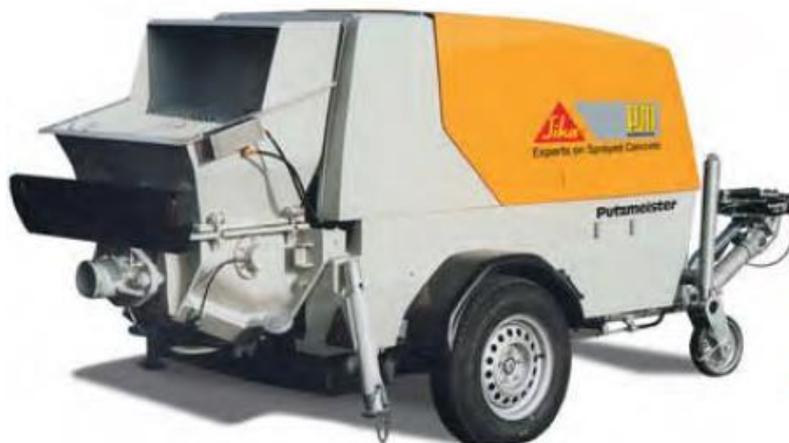


Figura 13. Putzmeister Bomba estacionaria de concreto Sika®-PM702 E

Fuente: Hofler y Schlumpf (2004)

“Cuando se trabaja con mezclas húmedas, se usan principalmente sistemas de concreto proyectado con bombas duplex. A diferencia de las bombas de concreto tradicionales, estos sistemas deben satisfacer el requerimiento adicional de mantener el

flujo de concreto de manera tan constante como sea posible, y por lo tanto continuo, a fin de garantizar una aplicación homogénea del lanzado” (Hofler y Schlumpf, 2004).

Bracamontes (2014) cuenta que la tendencia mundial va hacia la implementación del concreto lanzado vía húmeda, en los últimos 15 a 20 años se ha utilizado de forma exponencial en trabajos subterráneos, en aplicaciones de soporte de rocas alrededor del mundo. Este éxito se debe a los avances en la tecnología de los equipos junto con la nueva generación de aditivos que permiten ajustar el concreto a los requerimientos de la obra, lo cual con la vía seca no se puede. A pesar de que el costo inicial de método de vía húmeda aparentemente es más elevado, existen muchos más factores que afectan el costo real, y entre los definitivos que tiene este método es su mayor eficiencia de aplicación y menores costos relacionados por el tiempo de ejecución de obra. Inclusive, en algunas aplicaciones se han logrado ahorros significativos de hasta un 40%, por la disminución de rebote, ya que en el concreto lanzado vía húmeda se tiene un rebote menor al 10% contra un 30% de la vía seca.

Algunas características de diseños de concreto lanzado vía húmeda aplicados en diversos trabajos alrededor del mundo según Bracamontes son:

- El consumo de cemento generalmente entre 400 kg/m³ a 500 kg/m³.
- Los agregados deben cumplir las especificaciones del ACI 506 “gradation 2”.
- Emplear microsílíce (entre el 5 al 15% del peso del cemento) para mejorar la cohesión, reducir el rebote, y en estado endurecido minimizar la porosidad de la pasta, obtener altas resistencias mecánicas, menor permeabilidad, mayor durabilidad y mayor resistencia a la corrosión y al ataque químico.
- Emplear superplastificantes y reductores de agua normales para mantener la menor relación agua/cemento (0,45 o menores), para mejorar la trabajabilidad y la resistencia de la mezcla.
- Emplear acelerantes libres de álcalis en la boquilla para obtener altas resistencias a edades tempranas, mayores espesores de capa (logrando espesores de 30 cm a 50 cm en una sola pasada), crea un mejor ambiente de trabajo y no da problemas ecológicos.

2.2.6 Recomendaciones en la aplicación del concreto lanzado

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2017) recomienda, primeramente, hacer una preparación de la superficie a la hora de aplicar concreto lanzado, esto implica remover el compuesto de curado en el concreto lanzado previamente, colocado en las superficies a tratar, mediante chorros de arena a presión (sandblasteado). Instalar medidores de profundidad aprobados para indicar el espesor de las capas de concreto lanzado, en cuadros de 2 metros, longitudinal y transversalmente, con no menos de dos medidores por incremento del área superficial que va a recibir el concreto lanzado; y por último, humedecer todas las superficies.

Seguidamente se debe controlar la temperatura y las condiciones del clima, esto implica mantener la temperatura de la mezcla de concreto entre 10 °C y 30 °C. La colocación del concreto lanzado se debe ejecutar cuando la temperatura de la superficie y del ambiente es al menos de 5 °C y está en alza, tomando en cuenta que no se debe llevar a cabo operaciones de concreto lanzado durante viento fuerte, lluvia severa y alta humedad.

En la aplicación del concreto lanzado, se recomienda utilizar el mismo operario de la boquilla de aplicación que haya producido paneles de prueba aceptables. Ya con ello se debe aplicar el concreto lanzado dentro de los 45 minutos de haber añadido el cemento a la mezcla. Limitar el espesor de la capa de cada aplicación de concreto lanzado a 50 milímetros, aplicaciones más gruesas pueden ser aprobadas si el contratista puede demostrar que no ocurren desprendimientos o escurrimientos. Si es requerido espesor adicional, escobillar o escarificar la superficie aplicada y permitir que la capa endurezca, mojando la superficie antes de aplicar una capa adicional.

Se debe recordar la importancia de remover lechadas, material suelto y excesos, y hacer la remoción del exceso prontamente del área de trabajo. Adicionalmente, se recomienda reducir el espesor de la mezcla en las juntas de construcción hasta lograr un borde fino en una longitud de al menos 300 mm. Mojar la superficie de la junta antes de colocar concreto lanzado adicional en la junta (las cuales no debe ser cuadradas) y acabar el concreto lanzado según se haya especificado.

2.2.7 Propiedades del concreto

Abrasión:

Según la INTE 64 (2017), "Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso pequeño, utilizando la máquina de Los Ángeles", se puede medir la degradación de un agregado dada la combinación de acciones sobre él, como la abrasión o el desgaste, el impacto y la trituración; en este caso, lográndolo con la ayuda de esferas de acero.

En el caso exacto del concreto, la ACI 116R (2000) define a la resistencia a la abrasión como "la capacidad de una superficie para resistir el desgaste por frotamiento y fricción". Este desgaste puede incluso generarse por las partículas transportadas por el viento o el agua (Price ,1947), y aunque en algunos casos la abrasión no constituye una preocupación estructural, el desprendimiento de polvo si puede llegar a ser un problema dependiendo del uso que se le dé a la obra.

Durabilidad:

Según Chao et al. (2017), la durabilidad en una estructura de concreto reforzado es la capacidad que tiene de conservar de forma inalterada sus condiciones físicas y químicas a lo largo de su vida útil, esto al ser sometida a la degradación por diferentes efectos de cargas previstas en su diseño estructural. Es requerido estipular en el diseño las medidas adecuadas a tomar en contra de las condiciones ambientales, climatológicas, exposición química, deterioro interno de los materiales y la naturaleza de la construcción, ya que al implementarse suelen ser muy eficaces y reducen posibles gastos posteriores. Inclusive, se debe tener presente la necesidad de la sustitución de algunos elementos como apoyos, juntas o drenajes que tienen una vida útil más corta que la estructura.

Existe un consenso de varios autores sobre la vida útil de los suelos cosidos, definición encontrada en el Cuadro 3, donde se declara que esta es típicamente de 50 años; Trejos (2020), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2015) y Condor Projects (2021) son algunos de ellos.

Cuadro 3. Conceptos a tomar en cuenta al abordar la durabilidad del concreto

Vida prevista	"período para el que una estructura fue diseñada y construida para satisfacer los requisitos arquitectónicos, funcionales, estructurales, de durabilidad, de comportamiento y de seguridad"
Vida útil	"periodo previsto para que un mecanismo de daño o un agente agresor de inicio al deterioro del concreto habiéndose vencido la barrera de protección, pero sin que haya iniciado el debilitamiento de la estructura"
Vida útil de servicio	"periodo considerado desde la ejecución de la estructura hasta que se complete un nivel aceptable de deterioro"
Vida útil total	"periodo que comprende desde la ejecución hasta un colapso total de la estructura"
Vida útil residual	"es el tiempo en que a partir de la fecha de supervisión la estructura aún puede desempeñar sus funciones"

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Chao et al. (2017)

Dado que durante la ejecución del proyecto la buena calidad de la obra y el proceso de curado influyen en la durabilidad del proyecto, según Chao et al. (2017) se deben tomar en cuenta al menos los siguientes aspectos durante la ejecución:

- Seleccionar formas estructurales adecuadas.
- Asegurar una calidad adecuada del concreto y de su capa exterior.
- Emplear un espesor de recubrimiento adecuado capaz de proteger las armaduras.
- Controlar el valor máximo de abertura de fisuras.
- Protecciones superficiales al estar ante ambientes sumamente agresivos.
- Disminuir al máximo la permeabilidad.

Según Chao et al. (2017), en España se ha realizado un estudio que brinda una idea de las principales problemáticas que enfrenta la durabilidad del concreto, cada uno con su respectivo porcentaje de afectación como se observa a continuación:

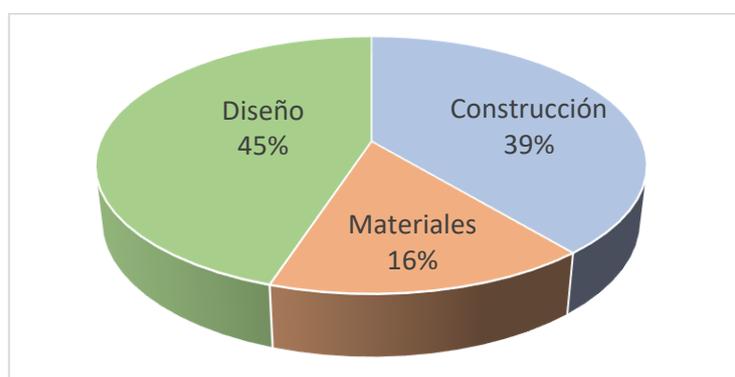


Figura 14. Causantes de las fallas en la durabilidad

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Chao et al. (2017)

Los agentes capaces de afectar la durabilidad del concreto se pueden dividir en dos tipos: los agentes externos que son los que se encuentran en el medio ambiente o se deben a condiciones de servicio, y los agentes internos que se hallan dentro del mismo concreto, tal y como se resumen en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Ejemplos de agentes externos e internos

	Iones de cloruro
	Dióxido de carbono
Agentes externos	Sulfatos, bacterias
	Abrasión
	Ciclos de congelamiento y deshielo
Agentes internos	Iones de cloruro incorporados en determinados aditivos
	Álcalis del cemento que reaccionan con agregados potencialmente reactivos

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Chao et al. (2017)

Al mismo tiempo, estos se pueden clasificar por su origen en agentes físicos, químicos, biológicos y mecánicos, y en ocasiones se pueden presentar simultáneamente. Estos agentes agresivos pueden ser gases, líquidos o partículas que constituyen a los suelos adyacentes al concreto (Chao et al., 2017).

Uno de los factores de la relativa baja durabilidad del concreto es la tendencia de las mezclas de cemento portland de producir fisuras, generando que las estructuras se vuelven permeables y propiciando que el refuerzo de concreto se llegue a corroer causando el deterioro de la estructura. Dada esta situación, se ha encontrado en investigadores que si al realizar la mezcla con agua los materiales de cemento son reducidos con la ayuda de un aditivo súper-plastificante es posible eliminar en gran medida el encogimiento y las grietas del concreto y producir un concreto más durable (Chao et al. 2017).

Resistencia

Según el ACI 318S-14 (2014) a la "resistencia nominal" se le conoce como la resistencia de un elemento o de una sección transversal, que es calculada usando suposiciones y ecuaciones de resistencia normales, junto con valores nominales de las resistencias de los materiales y dimensiones. Por otra parte, la "resistencia de diseño" (utilizable) es la resistencia nominal afectada por el factor de reducción aplicable "φ". El propósito del factor es considerar que existe la probabilidad de tener elementos con una resistencia baja debida a variaciones en los materiales y las dimensiones.

Una evaluación de la resistencia puede ser necesaria de realizar en una estructura cuando se considera que la calidad de los materiales utilizados fue deficiente, si existe alguna prueba de construcción defectuosa, si se observa deterioro, si una edificación tendrá un nuevo uso, o si, por cualquier motivo, la obra o parte de ella aparentemente no satisface los requisitos del Reglamento (ACI 318S-14, 2014).

2.2.8 Patologías en el concreto

Según (Chao et al., 2017), el concreto puede sufrir, a lo largo su vida, defectos o daños que alteran su estructura interna y su comportamiento. Algunos de ellos son congénitos por estar presentes desde su construcción; otros pueden haber atacado durante alguna etapa de su vida útil; y otros pueden ser consecuencia de accidentes.

Avendaño (2006) menciona que las patologías que se producen durante la etapa de operación de una estructura generalmente se dan por:

- Abuso de la estructura o cambio de uso: esto aumenta el requerimiento de resistencia dado el cambio en las cargas de servicio, en las vibraciones, en los impactos, entre otros.
- Desastres naturales o accidentes: entre los que más pueden llegar a afectar se encuentran los incendios, explosiones, choques o impactos, inundaciones, terremotos y huracanes.
- Falta de mantenimiento: esto es imperativo para impedir el deterioro y conservar las condiciones originales de desempeño tanto por resistencia como por durabilidad, pero no se suele establecer un manual con disposiciones de mantenimiento y protección.

Una estructura puede mostrar con diferentes síntomas que se está produciendo daño en ella, estos incluyen manchas, cambios de color, hinchamientos, fisuras, pérdidas de masa u otros; pero para ser capaz de determinar sus causas es necesaria una investigación en la estructura tal y como se indica adelante según Chao et al. (2017):

1. Conocimiento de los antecedentes e historial de la estructura, incluyendo cargas de diseño, microclima que la rodea, vida útil estimada, proceso constructivo, condiciones actuales, el uso que recibe, etc.
2. Inspección visual que permita apreciar las condiciones reales de la estructura.

3. Auscultación de los elementos afectados, ya sea mediante mediciones de campo o pruebas no destructivas.
4. Verificación de aspectos de la mezcla de concreto como el tamaño máximo del agregado grueso empleado, contenido de aire, procedimiento de determinación de las resistencias en compresión, flexión y tracción...
5. Conocimiento del diseño y cálculo de la estructura, de los materiales empleados, de las prácticas constructivas, y los procedimientos de protección y curado; dado que son factores determinantes del comportamiento de la estructura en el tiempo
6. Conocimiento del tipo, cantidad y magnitud de los procesos de degradación que se pueden dar en las armaduras de refuerzo, los cuales, a través del tiempo, determinan su resistencia, rigidez y permeabilidad.
7. Verificación del acero de refuerzo para asegurar el cumplimiento de la resistencia indicada en los planos.

Adicionalmente, el deterioro del concreto se puede ver afectado por tres factores: la humedad, la temperatura, y la presión. La humedad en la atmósfera contribuye con los fenómenos de deterioro en la medida que se presentan ciclos de humedecimiento y secado en el concreto, la temperatura incide en la velocidad con la cual pueden ocurrir los fenómenos de deterioro en el concreto, ya que las reacciones químicas se aceleran con el aumento de la temperatura (un aumento de la temperatura de 10 °C dobla la velocidad de la reacción) y la presión atmosférica y los vientos tienen incidencia sobre la durabilidad al contribuir en la erosión dada por parte de partículas arrastradas por el viento (Chao et al., 2017).

Corrosión del refuerzo

La preservación de la integridad del refuerzo del concreto, según Chao et al. (2017) es fundamental para que la estructura cumpla los requisitos de resistencia, desempeño y funcionalidad para los que fue diseñada. Se conoce que la corrosión del refuerzo conduce al agrietamiento, delaminación y descascaramiento del concreto que lo cubre.

Esta corrosión ocurre ante la presencia interna o a la acción externa de cloruros en el concreto, o inclusive cuando el pH del concreto que recubre el refuerzo disminuye debido a la carbonatación. En las estructuras marinas predomina la corrosión causada por la presencia de cloruros presentes en las sales del agua del mar. Los hidróxidos de calcio, potasio y sodio presentes en la pasta de cemento hidratado proveen un pH alto (entre 12 y 14), con ellos se logra que el acero desarrolle en su superficie una capa pasiva de

protección; por otra parte, la presencia de fisuras en el concreto acelera la acción externa de los cloruros y contribuye a eliminar dicha protección del acero (Chao et al., 2017).

Según Barrera (2017) la tonalidad rojiza es una característica del proceso de corrosión, dada por la presencia de hidróxido de hierro, conocida como herrumbre. Este se produce alrededor de toda la superficie metálica dando lugar a un incremento importante de volumen, ocasionando fuertes tensiones en la estructura de concreto, fisuración, disgregaciones y pérdida de adherencia del concreto con las barras de acero.

Para mitigar el problema de la corrosión se recomienda utilizar concretos con bajas relaciones de A/C, compactar y vibrar el concreto sin generar segregación, controlar la cantidad de ion cloruro (Cl-) que los componentes del concreto (cemento, agua, agregados y aditivos) pueden aportar, entre otras medidas (Avendaño, 2006).

Reacción álcali-sílice (ASR)

Este es uno de los problemas que más afectan la durabilidad del concreto. Según Chao et al. (2017) se da a lo largo del tiempo debido a la reacción química entre la pasta de cemento (altamente alcalina, Na_2O y K_2O) y los agregados que tienen alto contenido de sílice. Se conoce que la ASR (Alkali-Silica Reaction) genera la expansión del agregado dentro de la mezcla de concreto una vez hidratada provocando agrietamiento a nivel microscópico y la pérdida de resistencia del concreto. Entre los participantes de esta reacción se tienen las rocas que contienen vidrio volcánico como riolitas, dacitas, andesitas y sus correspondientes tobas; rocas opalinas como calcedonia, pedernal, pizarras y calizas opalinas; y eventualmente rocas que contienen sílice en forma criptocristalina y/o deformada.

Para evitar esta situación, los agregados seleccionados deben ser "inocuos", siendo esto identificable de forma temprana a través de pruebas tanto petrográficas como químicas (ensayo de barra de mortero normal ASTM C1260 o acelerado ASTM C1567), recomendadas de realizar en el momento de definir las especificaciones del proyecto, sobre todo antes de aprobar el uso del agregado (Chao et al., 2017).

Para esta situación perjudicial, (Chao et al., 2017) afirma que, se ha confirmado que ciertos productos como las cenizas volantes, las escorias y la microsíllica se pueden combinar con el cemento para aumentar la resistencia y la durabilidad de los concretos marinos, dando como resultado un concreto menos poroso y de mayor resistencia al ataque de cloruros y sulfatos. Estas cenizas pueden reemplazar hasta 15 % por peso de cemento y es una posible solución en los casos donde se ha detectado ASR.

Para que se dé la reacción se requiere la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que se produzca fisuración y expansión es necesario que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa (Segarra, 2005).

El ensayo ASTM C295/C295M (2019) "Guía estándar para el examen petrográfico de agregados para concreto" debe ser capaz de identificar potenciales constituyentes reactivos de álcali-sílice y álcali-carbonato en los agregados y recomendar pruebas adicionales para confirmar o refutar la presencia de estos componentes en cantidades significativas. Según esta norma los componentes reactivos álcali-sílice que se pueden encontrar en los agregados son: ópalo, calcedonia, cristobalita, tridimita, cuarzo muy tenso, cuarzo microcristalino, cuarzo criptocristalino, vidrio volcánico y vidrio silíceo sintético. Entre los agregados que los pueden contener están: rocas vidriosas criptocristalino intermedio a ácido volcánico, algunas argilitas, filitas, grauvaca, gneis, esquisto, granito gnéisico, vena de cuarzo, cuarcita, arenisca, pedernal y rocas carbonatadas que contienen formas de álcalis reactivo de sílica.

Reacción álcali-carbonato

Según la norma ASTM C227 (2010), "Método de prueba estándar para la posible reactividad alcalina de combinaciones de cemento y agregado", en las reacciones expansivas los álcalis participantes se derivan del cemento, en ciertas otras circunstancias pueden provenir de otros constituyentes del concreto o de un agente externo. En el caso de las reacciones álcali-carbonato, se involucran dolomitas de ciertas dolomitas calcíticas y calizas dolomíticas, y según Chao et al. (2017) se incluyen también las rocas arcillosas. La reacción se da cuando las rocas carbonatadas reaccionan con los álcalis presentes en los poros del concreto, lo que produce expansiones y fisuraciones nocivas.

Para este caso, según Chao et al. (2017), la acción preventiva que se recomienda radica en limitar aún más el contenido de álcalis totales en el cemento portland simple (CPO), hasta un nivel que pueda ser tan bajo como 0,40 %.

Avendaño (2006) recomienda para las reacciones álcali en general el impermeabilizar las superficies para atenuar el fenómeno de expansión cuando se encuentra en sus primeras manifestaciones; junto con utilizar aditivos a base de litio para mitigar la acción del sodio del cemento.

Según el ACI 201.2R-01 (2000) el método más seguro, y generalmente también el más económico para minimizar la reactividad, es el evitar el uso de rocas reactivas eligiendo

meticulosamente el sitio de dónde se extraerán los agregados. Las puzolanas no son efectivas para mitigar las reacciones álcali-carbonato, ya que sólo sirven como diluyente.

Carbonatación

Cuando un concreto o mortero está expuesto a dióxido de carbono se da origen a una reacción que produce carbonatos, y que está acompañada por contracción. En algunos casos la carbonatación provoca el deterioro en la superficie y una disminución del pH de la pasta cementicia, induciendo la corrosión de las armaduras más próximas. El uso de fuentes de dióxido de carbono (CO₂) durante el proceso de endurecimiento, como calefactores sin ventilación, exposición a los gases de escape de las maquinarias, smog de los autos, entre otras fuentes, puede producir superficies altamente porosas susceptibles a los ataques químicos (ACI 201.2R-01,2000).

Según Terzaghi (1949) algunos estudios han llegado a la conclusión que el agua que contiene más de 20 partes por millón (ppm) de CO₂ agresivo puede inducir la rápida carbonatación de la pasta cementicia hidratada, mientras que las aguas que contienen 10 ppm o menos de CO₂ agresivo pero que se mueven libremente también pueden provocar una carbonatación significativa.

Según Avendaño (2006) para estos casos y en elementos de concreto en servicio, se recomienda, después de realizar la reparación del concreto y del acero afectados por el frente de carbonatación, el hacer uso de barreras impermeables que impidan el ingreso de la humedad. Para cuando se tienen grietas provocadas por la misma razón, se aplican membranas elastoméricas que sellen las aberturas y prevengan el avance de la corrosión del acero de refuerzo.

Formación retrasada de etringita (DEF)

La fisuración a largo plazo del concreto, dada la formación tardía de etringita dentro de él (nombre mineral del sulfoaluminato de calcio), se conoce como DEF (Delayed Ettringite Formation); esto es el resultado de la expansión que sufre la pasta durante las primeras etapas de su hidratación cuando se enfrenta a altas temperaturas (por encima de 70 °C u 80 °C) y a la humedad. El problema más grande al enfrentarse al DEF es que en algunos casos se han detectado los problemas diez o veinte años después de construida la estructura, demostrando que puede tardar mucho tiempo en hacerse evidente, sobrepasando incluso cualquier garantía de construcción que se haya recibido (Chao et al.,2017).

Según el estudio de Segerer (2003) expuesto en las memorias del Simposio FIB Argentina (2005) para controlar la DEF en obras masivas de concreto en ambiente tropical se debe:

- Utilizar cementos elaborados con Clinkers que contengan menos del 1,0 % de sulfatos.
- Omitir el uso de cementos tipo III ya que contienen una alta cantidad de C_3S y una elevada finura, los cuales generan un alto calor de hidratación.
- Controlar la concentración de álcalis solubles (Na_2SO_4) presentes en el concreto, ya que debe ser inferior al 0,8 % de Na_2O equivalente.
- Evitar el curado acelerado con vapor.
- Disminuir el uso de aditivos con un contenido de azufre mayor al 2 % de la masa de cemento.
- Evitar el uso de agregados que puedan estar contaminados con piritas (sulfatos).
- Controlar en todo momento la temperatura a la hora del colado de la mezcla y tomar cualquier medida necesaria para evitar que se superen los 65 °C durante su colocación.

Ataque de sulfatos

Chao et al. (2017) menciona que a pesar de que este no es un problema generalizado, sí es posible que se dé en estructuras que se encuentran en ambientes marinos bajo ciclos constantes de exposición húmeda-seca o cuando los sulfatos naturales de sodio, potasio, calcio o magnesio, que se encuentran a veces en el suelo o disueltos en el agua subterránea, reaccionan con los compuestos hidratados del cemento endurecido. Esto puede estimular el aumento de presiones en la pasta de cemento, suficientes para reducir su cohesión y generar agrietamiento y exfoliación. El concreto de alta permeabilidad es el más vulnerable al ataque de sulfatos.

Según Muñoz y Mendoza (2012) cuando se tienen contenidos de sulfatos ≥ 600 mg/l en el agua o ≥ 3000 mg/kg en el caso de suelos, el cemento a utilizar deberá tener como característica adicional la resistencia a sulfatos (SR), para cuando se trata de agua de mar o con un contenido de cloruros > 5000 mg/l, el cemento deberá tener la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR).

Usualmente la resistencia a los sulfatos del cemento Pórtland disminuye al tener un mayor contenido calculado de tricalcio-aluminato (C_3A) (Mather, 1968); se tiene en la ASTM C150/C150M (2021) el cemento resistente a los sulfatos Tipo V, para el cual el contenido

máximo calculado de C₃A permitido es de 5 %, y al cemento moderadamente resistente a los sulfatos Tipo II, donde el contenido máximo calculado de C₃A permitido está limitado a 8 %.

Para lograr la protección contra estos ataques se debe utilizar concretos que retrasen el ingreso y el movimiento del agua, ambas situaciones se reducen al disminuir la relación A/C. Incorporar aire al diseño del concreto resulta beneficioso para minimizar la fisuración por contracción que se pueda llegar a dar (Verbeck, 1968).

El ACI 201.2R-01 (2000) menciona que existen estudios que demuestran que algunas puzolanas y escorias granuladas de alto horno de hierro trituradas aumentan en gran medida la expectativa de vida de los concretos expuestos a ataques por sulfatos, esto sin importar si se utilizan en el cemento mezclado o cuando se añaden en la mezcladora.

Cambios de coloración

Los cambios de coloración suelen aparecer como una advertencia de algún otro tipo de patología o acción externa como la decoloración dada como respuesta del ataque de la luz solar o el cambio de color en zonas que han pasado por el proceso de reparación de algún defecto. Para este caso, el aspecto estético y a la durabilidad se pueden ver afectados de forma importante (Barrera, 2017).

Deformaciones

Según Barrera (2017) las deformaciones en las estructuras se pueden dar sin llegar al fisuramiento, debido a que siempre se ven sometidas a esfuerzos de compresión y tensión, tanto externos como internos, pero si es posible que se desencadenen otro tipo de afectaciones. Estas deformaciones conciernen a las variaciones de temperatura y humedad, y a la fluencia, donde esta última consiste en la deformación del concreto alrededor de un soporte de acero que no se deforma en la misma medida, lo que produce una transferencia de tensiones indeseada, logrando que la estructura se debilite y sea posible el fracturamiento total

“Para contrarrestar las deformaciones se debe tener en cuenta la calidad de los materiales empleados, los esfuerzos a los que estará sometida la estructura y dependiendo del esfuerzo y condición de la estructura (por prevención o reparación de daño) determinar el tipo de refuerzo a emplear” (Barrera, 2017).

Desintegración

Según Barrera (2017) la desintegración se da cuando el concreto deja de funcionar como aglomerante y los agregados se empiezan a liberar paulatinamente; este proceso es

lento y suele iniciar con ligeros cambios de coloración, viéndose después fisuras entrecruzadas que van aumentando progresivamente, para llegar al punto donde la superficie se deforma y curva hasta desprenderse, junto con la desintegración de la masa de concreto. Los ataques químicos, principalmente sulfatos y cloruros suelen ser la causa principal. Ya para este caso la mejor elección es reemplazar la estructura desintegrada por otra nueva y considerar revestirla con materiales epoxi, poliuretano, siliconas o asfalto.

Filtración

En general para todas las estructuras, la filtración de agua es uno de los problemas más comunes; esto se debe a que el suelo no posee un buen drenaje y a que la superficie de concreto no se encuentre sellada correctamente. Para afrontar la situación existen muchos métodos, pudiendo, en primera instancia, repararse las grietas mayores con cemento hidráulico y rellenar los poros y agujeros con masilla epoxi, también existe la opción de aprovechar aditivos que sellan la estructura, aplicar alquitrán en las zonas con mayor probabilidad de filtración, e inclusive empelar pintura selladora para prevenir futuros eventos de filtración (Barrera, 2017).

Agrietamiento

Como se mencionó, el concreto se contrae y se expande debido a los cambios de humedad y temperatura, lo que conlleva a deformaciones dependiendo de la carga que soporta y las condiciones de apoyo. Cuando en el diseño y en la construcción no se prevén estas situaciones, se dan como consecuencia los agrietamientos, que cuando aparecen a temprana edad no son un problema estructural grave, pero al presentarse a lo largo del tiempo como grietas con patrones ligeramente espaciados sí puede significar un deterioro importante. Para lograr prevenirlo desde un inicio, "se debe considerar remover toda la capa vegetal, emplear concreto con aislamiento moderado, allanar inmediatamente después de enrasar, curar tan pronto sea posible, emplear las juntas ideales para el tipo de movimiento que experimentará el concreto y considerar un recubrimiento sobre el acero de refuerzo" (Barrera, 2017).

Según Avendaño (2006) para evitar las fisuras en estructuras expuestas a ciclos de humedecimiento y secado, se recomienda que el concreto tenga una baja permeabilidad y porosidad, por lo que es normal que se establezcan relaciones A/C máximas y resistencias a la compresión mínimas, tal y como se presenta en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Relación A/C y $f'c$ para concretos expuestos a cambios de humedad

Condiciones de exposición	A/C máxima	$f'c$ mínima (MPa)
Concreto sin acero de refuerzo expuesto al agua	0,50	24
Concreto reforzado expuesto al agua de mar	0,40	35

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Sánchez de Guzmán (2002)

La presencia de organismos y microorganismos (origen vegetal o animal) en la superficie de una estructura de concreto, no solo afecta su estética, sino que puede producir daños y deterioros físicos, mecánicos, químicos y biológicos. La vegetación puede retener y generar humedad, mientras que las raíces pueden penetrar y crecer dentro de los poros del concreto causando grietas por las fuerzas internas de expansión; a lo largo de su vida generan sustancias que pueden causar ataques químicos, como los ácidos húmicos y sales producto de la descomposición vegetal (Avendaño, 2006).

Según Avendaño (2006) las condiciones que pueden favorecer el desarrollo de microorganismos de origen vegetal y animal sobre las estructuras, se presentan a continuación:

Cuadro 6. Condiciones que pueden favorecer el desarrollo de microorganismos

Presencia de agua	Puede provenir tanto del medio ambiente, como de los poros del concreto.
Disponibilidad de nutrientes	La cal y algunos minerales del concreto, son fuente de nutrientes para ciertos microorganismos, junto con algunos gases contaminantes producto de procesos de combustión.
Condiciones ambientales	La temperatura entre 20 °C y 35 °C y la humedad relativa superior al 80 % favorecen el desarrollo de bacterias. Las bacterias aeróbicas requieren concentraciones de oxígeno superiores a 1 g/l, mientras que las anaeróbicas requieren de 0,1 g/l.
Superficie de colonización	Ofrecen la posibilidad de anclaje para facilitar la creación de colonias de organismos.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Avendaño (2006)

Cuando la presencia de humedad en el elemento no es posible evitarse, se pueden utilizar agentes biocidas como las sales de amonio, los fenoles y algunos compuestos de mercurio y estaño (Avendaño, 2006).

Abrasión y medios de contacto

La abrasión se puede atribuir al efecto del viento cargado de partículas sólidas, a un alto contenido de CO₂ o al desgaste producido por el flujo continuo de agua. Este desgaste no ocasiona problemas estructurales, pero si puede volver a las estructuras más vulnerables ante el ataque otros agentes como agresión química, lixiviación, corrosión, etc. Para contrarrestarlo, es imperativo contar con un diseño de mezcla enfocado en la resistencia del concreto, en disminuir la relación agua/cemento, e incluso en la adición de materiales con propiedades puzolánicas que favorecen a la disminución de la permeabilidad en caso de tener contacto con fluidos (Barrera, 2017).

2.3 Mantenimiento y Reparación de estructuras de concreto

“Reparación se define como el reemplazo o corrección de los deterioros, daños o fallas en materiales, componentes y elementos de una estructura de concreto. Se utilizan sistemas conformados por técnicas y materiales diseñados especialmente para cumplir con los requerimientos específicos de cada caso” (Avendaño, 2006).

El mismo autor indica que el gran avance de las patologías que se da en el concreto es debido al poco conocimiento de los factores que intervienen en la durabilidad del concreto, por la falta de diagnósticos oportunos y un inadecuado mantenimiento; esto hasta el punto de ocasionar que las estructuras industriales y civiles se vuelvan ineficientes e inseguras. El plantear y ejecutar medidas correctivas y procesos de reparación en obras que ya están en operación implican un costo sumamente alto al tenerlas que detenerlas, por lo que resulta mucho más aceptable financieramente el tomar las precauciones desde el diseño.

Desde hace décadas se ha estimado el costo en reparación y mantenimiento correctivo de estructuras ya existentes, incluso, según Mehta y Monteiro (1993), para los años 90 en países desarrollados se estimó que más del 40 % de los recursos de la industria de la construcción se emplean en ello, y unos años después Castro (1998) menciona que en México el 90 % de las industrias presentan cierto grado de corrosión en su infraestructura y en algunas ciudades costeras, como es el caso de Yucatán, se destina

alrededor de un 8 % del PIB estatal en reparaciones de edificios afectados por esta situación.

Según la Ley de Sitter (Ley de evolución de costos), se le asigna un costo relativo de una unidad a las decisiones que se toman durante el proceso de diseño y planificación de un proyecto (Helene y Pereira, 2003). En la Figura 15 se observa que las medidas tomadas en la construcción tienen un impacto en el costo cinco veces mayor, el mantenimiento preventivo tiene un costo relativo 25 veces mayor, y el costo del mantenimiento correctivo tiene un impacto de 125 veces el costo del diseño.

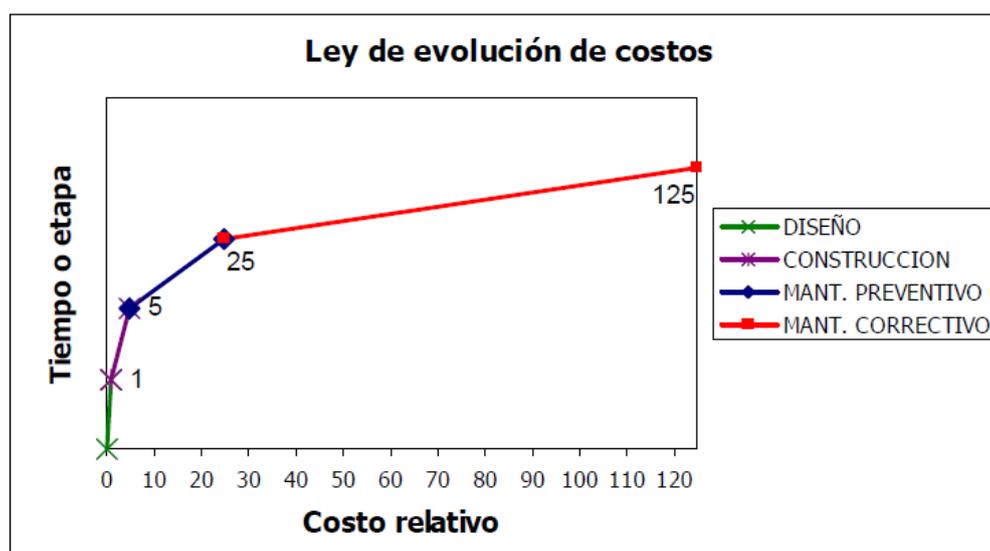


Figura 15. Ley de evolución de costos (Ley de Sitter)

Fuente: Helene y Pereira (2003)

La Patología Estructural es la disciplina de la Ingeniería Forense que se encarga de detectar, tratar y prevenir las patologías o daños que se presentan o se podrían llegar a presentar en las estructuras de concreto (Avendaño,2006).

Según el mismo autor, en las estructuras de concreto en servicio el estudio para detectar, tratar y prevenir las patologías o daños que se presentan o se podrían presentar comienza con la detección de las causas y consecuencias del deterioro presentado, ya con ello se realiza un diseño correctivo tomando en cuenta los requisitos de durabilidad pertinentes; para por último establecer los procesos de reparación, control de calidad y mantenimiento de la reparación. En el caso de estructuras iniciando su proceso de idealización, la Patología Estructural establece que se deben dar recomendaciones y especificaciones para elaborar un diseño preventivo por durabilidad, que se debe cumplir con un control de calidad durante el proceso constructivo, para finalizar con la protección de los elementos después de ser construidos.

Entre los trabajos de mantenimiento se incluyen las reparaciones y obras de prevención, esto con la intención de impedir la aparición de deterioros o suprimir las patologías iniciales. El mantenimiento incluye tanto tareas simples como la limpieza de drenajes y superficies, como tareas más complejas como la impermeabilización y la protección de los elementos de concreto y acero (Avendaño, 2006).

Cuando se decide implementar reparaciones en una estructura Avendaño (2006) menciona que es necesario que las especificaciones del alcance del trabajo sean claras y concisas, y con ello se debe incluir un resumen del diagnóstico para que el contratista ejecutor de la reparación tenga con claridad la condición de la estructura y las necesidades que se tienen que solventar. Conjuntamente, se debe especificar los requerimientos de los materiales, las consideraciones de aplicación, estructuras y elementos de protección temporal, las pruebas y ensayos para evaluar el desempeño y calidad.

Añade además que, los planos de un proyecto de reparación deben ser preparados con flexibilidad ya que se deben considerar las variaciones en sitio como la remoción del concreto, la preparación de la superficie, la reubicación del refuerzo y la estimación de las cantidades de material; y al avanzar con la obra se pueden realizar correcciones o actualizaciones a los documentos iniciales. Estos planos deben incluir con detalle los pasos a seguir en la remoción del concreto, la preparación de superficie, la aplicación de los materiales y la reparación del acero de refuerzo (cuando aplique); junto con la ubicación de las estructuras de soporte temporal y de los sistemas de protección de las áreas adyacentes al sitio de la reparación, con el fin de evitar la propagación del ruido, escombros, polvo y humedad.

Los pasos para ejecutar una reparación en cualquier estructura de concreto, según Avendaño (2006), y que se ejemplifican por medio de imágenes en la Figura 16 ,son:

Paso 1: Localizar, identificar y definir los límites del área a reparar.

Paso 2: Remover el concreto deteriorado.

Paso 3: Preparar la superficie de los límites del área a reparar.

Paso 4: Limpiar la superficie de adherencia, el acero expuesto, los límites y las juntas. Verificar que los poros del concreto se encuentren libres y abiertos para recibir el material de reparación.

Paso 5: Controlar la humedad del sustrato o base, para asegurar la adecuada unión de materiales.

Paso 6: Instalar el material de reparación con las técnicas de vibrado, la presión y la velocidad recomendadas por el fabricante.

Paso 7: Inspección del cumplimiento de especificaciones y requerimientos del diseño de la reparación.

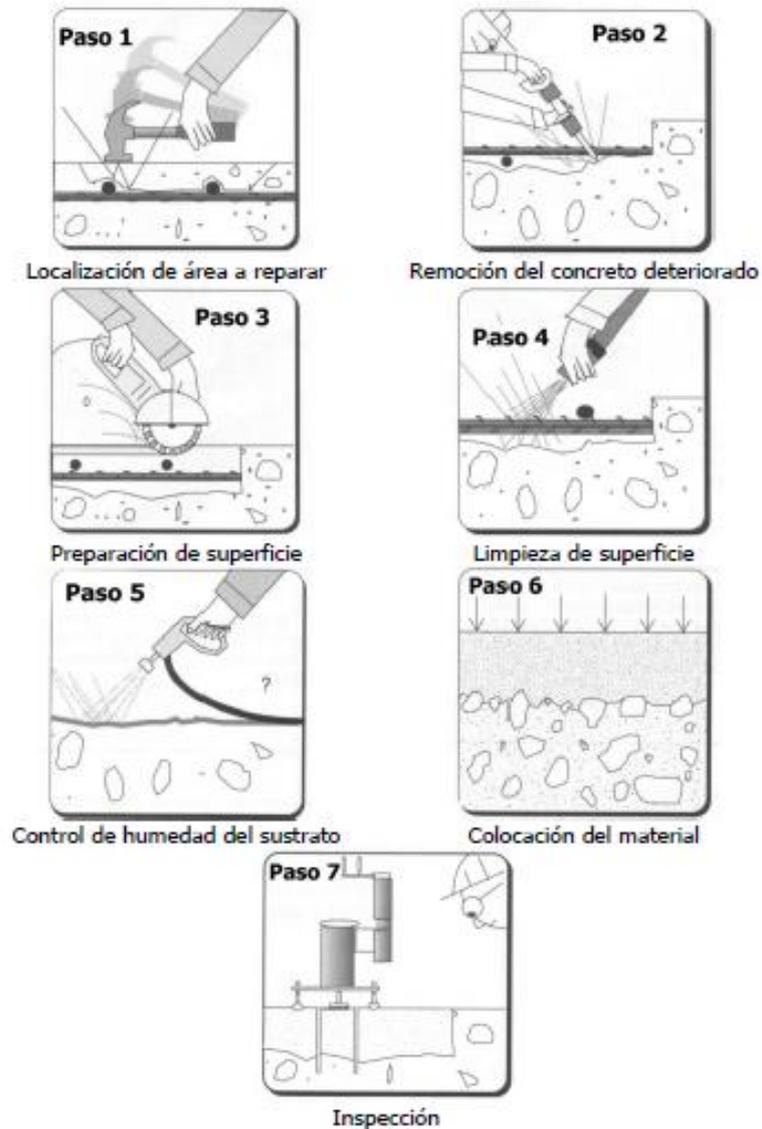


Figura 16. Procedimiento general de reparación

Fuente: Adaptado de Emmons (1993) por Avendaño (2006)

Las reparaciones a realizar se deben elegir según la situación específica que el concreto presente. En la Figura 17 se muestran las características, aplicaciones y limitaciones asociadas a los selladores de grietas o de fisuras; y en la Figura 18 se muestran características de algunos sistemas de protección superficial del concreto.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	APLICACIÓN	LIMITACIONES	OTROS
URETANO	Excelente adhesión y flexibilidad. Alta resistencia a la tensión. Baja viscosidad.	Aplicación manual y/o mecánica. Inyección simples o múltiples. Sella grietas finas.	Sensible a la humedad y a la alta temperatura.	
POLISULFUROS	Sistemas de dos componentes de polímero- polisulfuros.	Sella juntas de toda clase sujetas a expansión y contracción extrema. Se puede aplicar en juntas verticales y horizontales. Resiste a temperaturas extremas, sales, ácidos, álcalis y a impactos fuertes.	No debe aplicarse sobre superficies húmedas. En contacto directo con materiales bituminosos se puede presentar un curado insuficiente.	El material forma un sello sólido de caucho, cuya consistencia o dureza final es variable según requerimientos específicos de la obra.
MATERIALES ASFÁLTICOS	Son revestimientos que pueden aplicarse diluidos o en forma de alta viscosidad con rellenos inertes que lo hacen tixotrópico. También son colocados con calor sin solvente.	Se aplican en pisos, techos, fundaciones y paredes donde se requieren como barrera contra el agua. Mezclado con algunos químicos mejoran su resistencia a gases industriales condensados y ataque de la luz solar.	Son degradados fácilmente por la acción de la luz solar. Considerados riesgosos para la salud. Altamente sensible a compuestos hidrocarbonados.	En comparación con otros revestimientos, son de bajo costo.
LECHADAS (GROUTS)	Productos previamente dosificados. Excelente penetración. Retracción compensada. Alta resistencia mecánica. Resistencia a fluencia, a alta temperatura y a la compresión.	Para reparaciones rápidas. Anclaje de equipos con vibración.	Espesores de grieta entre 12.7 mm y 50.8 mm. Sensible a la humedad. Puede ser dañino para la salud. Fraguado rápido.	

Figura 17. Propiedades de los selladores de grietas

Fuente: Adaptado de Helene y Pereira (2003) por Avendaño (2006)

TIPO DE PROTECCIÓN /REVESTIMIENTO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
Impermeabilizante	Previene la entrada y salida de agua del concreto. Pueden ser decorativos y/o protectores. Pueden ser hechos de materiales epóxicos, uretanos, acrílicos y cubierta cementosa modificadas con polímeros. Estos sistemas pueden ser diseñados para presión hidrostática positiva o negativa. Generalmente son películas gruesas de asfalto, epóxicos o brea uretánica. Pueden ser rociadas en la superficie del concreto o aplicada como láminas. Los revestimientos aislantes usados sellan la porosidad del concreto y previenen la absorción de agua.
Recubrimientos resistentes a la humedad ambiental	Generalmente son películas delgadas de emulsiones asfálticas, alquitrán de hulla o selladores penetrantes. Normalmente no son efectivos contra presiones hidrostáticas. Algunas veces se usan en conjunto con recubrimientos decorativos o protectores. Un uso común de éstos es en proteger al concreto contra el daño por congelamiento-descongelamiento. Dentro de esta clasificación se incluyen los compuestos hidrófugos (repelen el agua pero permiten que el concreto respire).
Protección	Proteger al concreto de la exposición a ciertos químicos, como los ácidos, álcalis y sulfuros. Usualmente previenen la penetración de soluciones salinas y otros químicos corrosivos en el concreto, los cuales causan corrosión del acero de refuerzo.

Figura 18. Características de sistemas de protección superficial

Fuente: Adaptado de Helene y Pereira (2003) por Avendaño (2006)

El colocar concreto proyectado ("shotcrete") sobre superficies de concreto endurecido es también una opción de reparación factible; Do Lago (1997) afirma que si este se aplica correctamente se podrá alcanzar una excelente adherencia con los concretos nuevos o viejos, y muchas veces es considerado el método más satisfactorio y económico para las reparaciones de poca profundidad. Una gran ventaja de este método es su particular adaptación a las superficies verticales o superficies inferiores de elementos horizontales, ya que puede soportarse a sí mismo sin necesidad de utilizar encofrados y sin deformarse ni desmoronarse. Para obtener resultados satisfactorios se recomienda seguir los procedimientos descritos en el ACI 506R (2005). Do Lago (1997) también considera que la inyección de lechada de base de cemento es una gran opción para rellenar cavidades y consecuentemente tornarse adherente, resistente y sin contracción en estado endurecido, esto al ser un material fluido y autonivelante.

Como otras formas de reparación, Rodríguez (1998) indica que los morteros de reparación son una opción a utilizar sobre las estructuras de concreto que presentan fallos en su durabilidad, corrosión de armaduras, baja capacidad mecánica para soportar los esfuerzos, etc.; el planteamiento implica solventar problemas mediante el aporte de un nuevo material que sea capaz de proporcionar las características físico-mecánicas adecuadas. Al realizar su dosificación se debe tomar las mismas precauciones que al preparar un mortero para una obra convencional, con relación agua/cemento baja y uso de aditivos plastificantes o aireantes según requiera.

Menciona además como opciones los morteros hidráulicos, considerados convencionales, pre-dosificados o no según se requiera; morteros hidráulicos poliméricos, los cuales se modifican mediante la adición de polímeros (entre un 5 % y un 20 %); y los morteros poliméricos termoestables, los que pueden estar basados en resinas epoxídicas o de poliéster. Los morteros poliméricos pueden llegar a tener mejor adherencia al soporte y mayor resistencia a tracción y flexotracción, no así la resistencia a compresión. Su bajo precio, su idoneidad para reparaciones en grandes volúmenes y su facilidad de ejecución son ventajas que presenta este método de reparación; pero para poder aplicarse se requiere de una película de imprimación que garantice la adherencia con el concreto viejo, necesita tiempo para aumentar su resistencia y, como todo concreto, sigue teniendo susceptibilidad frente a los futuros problemas de durabilidad (Rodríguez, 1998).

Do Lago (1997) considera los adhesivos y primer como materiales capaces de ser utilizados a manera de puentes de adherencia entre diversos materiales, tales como: concreto viejo/concreto nuevo, acero/ concreto nuevo, concreto viejo/mortero base

poliéster, etc. En todo caso, los primeros no solo actúan como puente de adherencia, sino que también pueden ser protectores del acero de refuerzo contra la corrosión. Entre los adhesivos y primers más empleados, según Do Lago (1997), son de base epóxica y los llamados látex, o sea, base acrílica o base acetato de polivinilo o base estireno-butadieno; los de base polivinilo (PVA) en general son re-emulsionables por lo que no aconsejables para uso en locales húmedos o reparaciones y refuerzos de importancia. Los de base epóxica tienen un comportamiento estructural superior en comparación a los demás, sin embargo, tienen la desventaja de requerir el sustrato seco, lo que no siempre es viable en obra.

Los anclajes tipo adhesivo son una gran herramienta en la reparación del concreto. Estos utilizan un material polímero epóxico para generar adhesión aplicado por medio de una pistola con boquilla, requieren un bajo atrapamiento de aire y deben ser aplicados en agujeros limpios. Estos anclajes adhesivos se conectan al concreto e incluso a la mampostería a través de la adhesión, a lo largo del empotramiento (entre 4 a 20 veces el diámetro del anclaje), producida por el adhesivo con el concreto y con el anclaje. Entre las ventajas con las que este procedimiento cuenta están el que se puede aplicar para hacer cambios de diseño en un proyecto, soportan una gran variedad de soluciones de anclaje, su instalación requiere solo una cantidad moderada de equipo y permiten ser instalados en cualquier orientación (EUCLID GROUP TOXEMENT, 2017).

Otra opción brindada es el uso de barnices e hidrofugantes de superficie, pinturas que al aplicarse sobre la superficie de estructuras de concreto están destinados a protegerlas e impermeabilizarlas. Suelen ser más comunes en superficies expuestas, sin revestimiento, y localizadas en superficies verticales y horizontales internas (techos y coberturas), que no requieran fuertes solicitaciones mecánicas, ni que estén sometidas a la presión de agua (tanques, canaletas y recipientes de contención). Los hidrofugantes de superficie son capaces de penetrar algunos milímetros en el concreto y por mecanismo de repelencia electrostática imposibilitan la penetración de las moléculas de agua y las sustancias agresivas disueltas en esa agua.

Do Lago (1997) puntúa que los hidrofugantes tienen ventaja sobre los productos formadores de película, ya que permiten la libre circulación del vapor de agua y con eso reducir en gran parte los riesgos de condensación y formación de bolas y moho en la superficie o el interior del elemento estructural bajo la capa de barniz; sin embargo, en el mercado existen sistemas de protección que combinan los dos productos y sus ventajas;

base silano/siloxano como primer y metilmetacrilato como barniz de terminación y protección.

Los sistemas de pinturas de protección, según Do Lago (1997), son utilizados para ofrecer resistencia a los mecanismos de degradación más comunes; cumplen la función de reducir el riesgo en la estructura del elemento ante una eventualidad y de mantener el aspecto superficial y la estética del concreto. Además de esto brindan resistencia al intemperismo, poseen resistencia ante la foto-degradación dada la incidencia de rayos ultravioleta, evitan el desarrollo de hongos y bacterias en su superficie, evitan la ocurrencia de eflorescencia gracias a su estabilidad química

Existen dos tipos de sistemas de pinturas de protección, las de revestimientos hidrófugos de poro abierto (confieren repelencia al agua en poros de hasta 3 mm) y los revestimientos impermeabilizantes con formación de película (barnices y tintas que requieren acabados superficiales previos a su aplicación). Para la protección de superficies expuestas de concreto suelen utilizarse los barnices incoloros, disponibles con acabado opaco, brillante y semibrillante.

Por último, Do Lago (1997) plantea que las pinturas impermeabilizantes son una opción más como mecanismo de protección del concreto. Consisten en películas semiflexibles y continuas, que actúan como barrera de baja permeabilidad a gases, a agua y a vapor de agua. Esta clase de pinturas son capaces de cubrir una fisura existente de hasta 0,1 mm, sin embargo, después de su colocación la película sufriría fisuración junto con la estructura. Entre sus ventajas se tiene que reducen significativamente la carbonatación, la lixiviación, la permeabilidad, la difusividad a sales solubles, la aparición de moho y el crecimiento de hongos y bacterias. A pesar de la gran cantidad de beneficios que presenta, para su utilización se debe asegurar el contar con una superficie lisa y homogénea, o al menos realizar un tratamiento previo que permita este acabado.

2.4 Evaluación del desempeño y Control de calidad del concreto endurecido

La evaluación de la condición del concreto con el fin de encontrar defectos estructurales ha sido efectuada de forma común por medio de inspecciones visuales, pudiendo ser acompañada por pruebas de sondeo superficial (impactos de martillo) y la extracción de núcleos para examinar las condiciones internas del concreto. Los resultados

provenientes de este enfoque no permiten la detección de defectos profundos o procesos deletéreos que están en su etapa inicial (Chao et al., 2017).

Por su parte, los núcleos extraídos solo son capaces de proveer información de la zona exacta de donde fueron obtenidos, por lo que para obtener un dictamen confiable de la condición de toda la estructura se requiere implementar métodos que sean capaces de registrar información tanto del exterior como del interior del concreto.

Chao et al. (2017) recalca como con el pasar de los años se han desarrollado y mejorado varios métodos de ensayos no destructivos para lograr evaluar las estructuras de concreto ya endurecido. Recordando siempre que una evaluación apropiada debe de contemplar los posibles defectos que se generaron durante la etapa de construcción y los que se generaron a lo largo de los años de servicio, siempre considerando las condiciones a las que la estructura se encuentra expuesta, para así anticipar el tipo de defectos estructurales por encontrar en el concreto.

Ejecutar ensayos no destructivos no implica el descarte de la ejecución de ensayos destructivos, ya que con su combinación se logra obtener un diagnóstico integro de la estructura, que permitiría proponer una solución integral que alargue la vida de la estructura.

Para encontrar defectos estructurales en el concreto y no en el acero, existen diversos métodos generales, donde según Chao et al. (2017) estos pueden variar a base de ondas nucleares, termografía infrarroja, ondas de radio (electromagnéticas) y ondas de esfuerzo o de sonido. La radiografía es uno de los métodos más comunes a base de ondas nucleares, ya que con él puede obtenerse una imagen del acero y defectos del concreto, sin embargo, su uso en el mercado es limitado ya que requiere de operadores altamente certificados debido al peligro que representa por funcionar con fuentes radioactivas.

Por su parte, Chao et al. (2017) aclara que la termografía infrarroja funciona a base de la identificación de gradientes de temperatura en el concreto, teniendo como uso principal la detección de delaminaciones en las placas de los puentes. La dependencia que tienen sus resultados de las condiciones ambientales y la dificultad de detectar delaminaciones profundas y grietas que tengan menos de 0,25 mm de ancho, son sus principales desventajas.

Adicionalmente, se cuenta con el método a base de ondas electromagnéticas conocido como Georadar, siendo este muy rápido de usar y capaz de cubrir grandes áreas en poco tiempo. Este método es muy eficiente para detectar el acero de refuerzo, pero tiene la

desventaja de que no detecta con facilidad las grietas o vacíos menores a 3 mm de ancho en el concreto. Esta situación se da debido a que las ondas electromagnéticas no generan una buena respuesta ante el aire dentro de los defectos, adicionando que su desempeño se ve nuevamente afectado cuando se está ante la presencia de agua o cloruros en el concreto (Chao et al., 2017).

Los métodos que funcionan a base de ondas de esfuerzo, según Chao et al. (2017), son portátiles, seguros de usar y generan gran respuesta ante todo tipo de defectos estructurales en el concreto, ya que estas se generan al inducir una deformación a base de un impacto en el concreto. Las ondas de compresión, ondas de cortante y ondas Rayleigh son los 3 tipos de ondas de esfuerzo existentes. Las dos primeras viajan una delante de la otra hacia adentro del concreto, mientras que la última viaja en la superficie, por lo que resulta poco útil trabajar con ella para la detección de defectos internos.

Así mismo, las ondas de esfuerzo se reflejan con casi un 100 % de intensidad con respecto a la onda que fue inducida al viajar por concreto y encontrar aire; y se reflejan con una intensidad de casi el 70 % con respecto a la onda inducida cuando viajan por concreto y en este caso se encuentran con agua. Desde hace algunas décadas se han estado desarrollando diferentes métodos a base de estas ondas para evaluar el concreto en estructuras en donde solamente una sola cara es accesible. Los métodos más desarrollados y eficientes para este caso son el Impulso-Respuesta, Impacto-Eco y Eco-Ultrasónico (Chao et al., 2017).

Indistintamente del método no destructivo que se utilice, Chao et al. (2017) señala que ninguno de ellos proporciona una solución universal para evaluar defectos en estructuras de concreto, siendo necesario combinar los resultados de varios métodos para generar un diagnóstico más completo, teniendo siempre presente cada uno de sus alcances y limitaciones. Entre otros ensayos no destructivos disponibles están los desarrollados para evaluar la resistencia a la compresión, localización de acero de refuerzo, análisis de contaminación de concreto por agentes externos y evaluación de corrosión.

Al considerar un presupuesto para la rehabilitación, es importante tomar como parte las evaluaciones no destructivas, para con ello conocer las condiciones internas de la estructura y lograr así atacar el problema real y evitar una rehabilitación en vano. Es posible incluso, con los resultados obtenidos de diferentes métodos de ensayo, determinar la cantidad de concreto por remover y la cantidad de material por usar. Aparte de lo ya mencionado, Chao et al. (2017) recomienda como buena práctica el hacer nuevamente una

evaluación de la estructura después de ser rehabilitado, esto con el fin de verificar que todo se realizó apropiadamente.

Para lograr obtener una evaluación final, en este caso del concreto lanzado en taludes, se puede emplear el método de evaluación multicriterio; Moreno (1996) expresa que "se entiende como decisión multicriterio, el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad integral de los procesos de decisión seguidos por los individuos y sistemas, esto es a mejorar la efectividad, eficacia y eficiencia de los procesos de decisión y a incrementar el conocimiento de los mismos (valor añadido del conocimiento)". Para ejecutarlo se deben seleccionar los criterios más relevantes para la evaluación y según Pacheco y Contreras (2008), se debe definir un grupo de expertos con la pericia necesaria para distribuir una puntuación (usualmente 100 puntos o 100 %) entre las diferentes variables que estarán presentes en el estudio, según su peso en la calidad del concreto.

Para completar la ponderación mencionada anteriormente, Aznar y Guijarro (2012) consideran el método de la Ordenación simple como una opción, donde en ella se demanda al decisor que ordene los criterios de mayor a menor importancia, de forma que después se da el mayor valor al primero y el menor valor al último.

Cada variable, para cada talud, tendrá un valor/condición que se calificará del uno al cinco (0 al 5) según los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados, donde el 5 indicará la mejor situación y el 0 la peor situación. Al contar ya con los pesos asignados por variables según los expertos, y la calificación del 1 al 5 por variable por talud, se dará paso a la evaluación final de cada talud.

Aznar y Guijarro (2012) indican que los métodos multicriterio exigen la normalización de la información. La normalización como un procedimiento por el cual el valor de las variables normalizadas queda comprendido en el intervalo [0 1]; y la razón detrás de esto es la necesidad de unificar las unidades de medida necesarias para poder comparar datos. Un método para obtener este resultado es la normalización por la suma, que consiste en utilizar el cociente de cada elemento por la suma de los elementos de cada criterio, esto siguiendo la formula siguiente.

$$x_{1j} \text{ NORMALIZADO} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

2.5 Ensayos destructivos y no destructivos en el concreto lanzado

Los ensayos en el concreto cumplen un papel relevante en la determinación de sus características internas y externas. Por medio de estos ensayos es posible obtener información del estado actual de las obras de ingeniería, incluidos los taludes, y así crear estructuras de mayor calidad para cada situación que se requiera.

Los ensayos en el concreto pueden ser de dos tipos:

- **Destructivos:** Se denominan ensayos destructivos a los que determinan la caracterización del concreto por medio de la extracción y rotura de piezas o probetas de concreto.
- **No destructivos:** Se denominan ensayos no destructivos a los que permiten conocer la resistencia del concreto sin afectar o destruir su estructura interna. El beneficio que brindan estos ensayos reside en que se pueden realizar incluso en obras en servicio.

2.5.1 Ensayos destructivos

Extracción de núcleos ASTM C1604/C1604M

Según la ASTM C1604/C1604M (2019) este método de ensayo cubre la obtención, preparación y prueba de núcleos extraídos de concreto lanzado para obtener su longitud, su resistencia a la compresión o su resistencia a la tracción, siendo esto posible para obras en pre-construcción, en construcción y para concreto lanzado antiguo.

Es usual que estas muestras in situ se obtengan cuando existen dudas sobre la calidad del concreto debido a resultados bajos en la resistencia durante la construcción o inclusive que se den signos de deterioro en la estructura. Otros usos que la norma menciona que se le pueden dar a este método son: proporcionar especímenes para pruebas de aceptación, control de construcción, revisión del acero de refuerzo y para evaluar el estado, calidad y uniformidad del concreto lanzado.

Compresión Simple ASTM C-39

Se define como la medida de la resistencia a compresión del concreto cuando se somete un espécimen de este material a una carga axial de compresión; está influenciada por la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, una correcta compactación y el curado (Hernández, 2017). Esta es una prueba que se realiza con el fin de determinar la resistencia a carga axial del concreto posterior a su aplicación.

Según la ASTM C39/C39M (2020) este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de los especímenes cilíndricos de concreto, sean estos cilindros moldeados o núcleos extraídos.

La norma es clara al mencionar que se debe tener cuidado al interpretar el significado de los resultados de la resistencia a la compresión por este método de ensayo, ya que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del concreto fabricado de materiales dados. Los valores obtenidos pueden depender del tamaño y la forma del espécimen, tipo de mezcla, procedimientos de mezclado, métodos de muestreo, entre otros.

Análisis Petrográfico ASTM C295/ ASTM C856

Desde mediados del siglo XIX el microscopio petrográfico ha sido utilizado por los geólogos para interpretar la génesis y mineralogía de las rocas. Según Lozano (2005), el pionero de la microscopía utilizada en el concreto fue Johnson en 1915, al que luego siguieron investigadores como L. S. Brown, B. Mather y R. C. Mielenz.

Según Ambriz (2016) la petrografía es un campo de la petrología que describe y clasifica las rocas observando microscópicamente secciones delgadas derivadas de las rocas o muestras de concreto en estudio, para clasificarlas según sus propiedades físicas y composición mineralógica.

Según Araúz (s.f) del Laboratorio de Láminas Delgadas de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, las láminas o secciones delgadas son preparaciones que se realizan en rocas o inclusive en muestras de concreto para estudiarlas haciendo uso de un microscopio petrográfico. Estas consisten en rodajas de la muestra de un espesor de unos 30 μm que se adhieren a láminas de vidrio mediante resina epoxi, siendo posteriormente recubiertas con un cubre objetos.

El microscopio petrográfico, utilizado para este ensayo, posee un polarizador que convierte la luz que emite en luz polarizada y un analizador (lente), que puede o no estar activado, que polariza la luz perpendicularmente al polarizador. Al ejecutarlo, la luz atraviesa el polarizador cuando se observa una lámina, ya una vez polarizada la atraviesa, llega al analizador (si está activado) y por último al observador (Araúz, s.f).

La norma C295/C295M (2019) es una guía que describe los procedimientos a seguir para realizar el análisis petrográfico de materiales propuestos para utilizar como agregados en mezclas cementicias. Entre el conocimiento necesario para ejecutar este ensayo se tiene la identificación de minerales individuales en las partículas del agregado, clasificación de

tipos de rocas, y categorización de las propiedades físicas y químicas de las rocas y los minerales.

Los exámenes petrográficos en agregados se realizan para: 1. Para determinar las características físicas y químicas de un material que tendrá influencia en el material donde se quiere utilizar. 2. Para describir y clasificar los componentes de la muestra. 3. Para determinar las cantidades relativas de los componentes de la muestra que son esenciales para su adecuada evaluación, esto cuando los constituyentes difieren significativamente en sus propiedades y estas influyen en el rendimiento del material en el que se quiere usar. 4. Para comparar muestras de agregados de una fuente nueva con otras de las cuales se tiene los registros de rendimiento (C295/C295M, 2019).

Este tipo de análisis no es exclusivo de los agregados sino que puede aplicarse a concreto endurecido; según la ASTM C856/C856M (2020), algunos de los propósitos que puede tener el ensayo de petrografía en el concreto son: la determinación detallada del estado del concreto en estructuras en servicio, conocimiento de las causas de una baja calidad o del deterioro del concreto, identificación del desempeño futuro del concreto, descripción de la matriz cementante, incluyendo la determinación cualitativa del tipo de aglutinante utilizado, grado de hidratación, grado de carbonatación de estar presente..., determinación de si las reacciones álcali-sílice o álcali-carbonato o cemento-agregado o reacciones entre contaminantes y la matriz se han producido y sus efectos se han visto reflejados en el concreto; identificación de si el concreto ha sido sometido o afectado por el ataque de sulfatos, entre muchos otros.

Según Figueirôa y Andrade en el 2007 existían innumerables obras de concreto afectadas por la RAA esto en más de 35 países. Situación sucedida en obras de pavimentación de carreteras y aeropuertos, diques, puertos, puentes y cimentaciones diversas. Situaciones que pudieron haberse previsto de utilizar análisis petrográficos.

Este análisis permite describir y clasificar los constituyentes de la muestra, determinar sus cantidades relativas, identificar tipos y variedades de rocas, contenido de minerales inestables o reactivos química y volumétricamente, grado de meteorización, nivel de porosidad y posible presencia de contaminantes en los agregados (ASTM C856/C856M, 2020).

Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido ASTM C642

Este método de ensayo, según la ASTM C642, es útil para obtener la información necesaria para realizar conversiones entre la masa y el volumen del concreto, para

determinar el cumplimiento del concreto según especificaciones, para mostrar las diferencias entre un punto y otro dentro de una masa de concreto o bien para identificar concreto lanzado pobremente compactado o con una microestructura dañada.

Para el caso del concreto lanzado, el ACI 506R-05 (2005) dicta que los valores típicos de densidad son de 2230 kg/m³ a 2390 kg/m³ (para concretos de alta calidad), los de absorción son de 6% a 9%, y los de vacíos son de 14% a 17%.

Módulo de elasticidad y relación de Poisson ASTM C469

Se le llama módulo de elasticidad del concreto a la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en compresión cuyo valor está asociado a la resistencia a compresión. Por otra parte, la relación de Poisson se define como la relación entre la deformación transversal generada en el espécimen debido a la aplicación de una carga axial de compresión y la deformación longitudinal (Hernández, 2017).

Resistencia a tensión por compresión diametral ASTM C496

Esta prueba consiste en someter a un cilindro de concreto a la acción de dos fuerzas opuestas de compresión uniformemente repartidas a lo largo de su eje de simetría. Bajo esta carga de compresión diametral, en los extremos se generan esfuerzos de compresión, pero en el resto de la sección del cilindro (aproximadamente el 80 %) se producen esfuerzos de tensión uniformes (Hernández, 2017). Este ensayo es descrito en la norma ASTM C 496.

Ensayo rápido de penetración de iones cloruro ASTM C 1202

Este ensayo consiste en determinar la conductancia eléctrica del concreto, con la finalidad de proporcionar una medida rápida y general sobre la capacidad que tiene el concreto para resistir la penetración de iones cloruro (Hernández, 2017). Esta prueba si bien es cierto refleja que los iones cloruro no afectan directamente el concreto, si afecta el acero que está dentro de él, lo que sí puede generar alguna deficiencia en la integridad de las estructuras que lo contengan, así como el desprendimiento del concreto y el acero. Esta prueba es normada por la norma ASTM C 1202.

Absorción capilar ASTM C1585

El ensayo de absorción capilar consiste en determinar la velocidad de absorción (también llamada sortividad) de agua del concreto endurecido, mediante la medición del incremento de masa de un espécimen de concreto, resultado de la absorción de agua en función del tiempo (Hernández, 2017).

2.5.2 Ensayos no destructivos

Estos ensayos se realizan en cualquier tipo de concreto y permiten obtener información rápida para un diagnóstico o evaluación del estado en que se encuentra el concreto y la estructura que contienen el mismo.

Ensayo Impulso-Respuesta ASTM C1740

El método Impulso-Respuesta para evaluar la integridad estructural del concreto es una prueba con la eficiente necesaria para encontrar zonas dañadas por reacciones álcali-sílice, zonas débiles, zonas de menor espesor, delaminaciones a diversas profundidades, vacíos y segregaciones. Entre el equipo requerido se tiene un martillo instrumentado, un geófono y una unidad para procesamiento de señales, los cuales se utilizan para generar un impacto contra el concreto (el martillo no debe impactar a más de 10 cm del geófono), medir la fuerza de impacto y medir la velocidad de respuesta del concreto (Chao et al., 2017).

Cada prueba de este ensayo da como resultado la unidad de Movilidad, que se refiere a la facilidad con la que la estructura vibra por unidad de fuerza. Cada repetición dura menos de 1 segundo, con un radio de influencia de aproximadamente 50 cm, por lo que Chao et al. (2017) recomienda ejecutar las pruebas en cuadrículas con espaciamientos de 100 cm, no obstante, la norma permite espaciamientos de hasta 200 cm. Ya como resultado final, el software del equipo presenta una gráfica bidimensional en donde se muestran las zonas con problemas estructurales.

Ensayo Impacto-Eco ASTM C1383

Con esta prueba es posible determinar la profundidad de grietas transversales en el concreto que son detectables desde la superficie, es posible evaluar el contenido de lechada en los tubos de postensado e incluso conocer la profundidad de los defectos tipo delaminación, vacío y segregación. Para ser capaz de ejecutar este ensayo se requiere de un impactador tipo bola pequeña de acero, uno o dos transductores para medir la profundidad de grieta y una unidad para procesamiento de señales. Con la bola de acero se impacta el concreto lo más cerca posible del transductor y se mide el desplazamiento en el concreto con respecto al tiempo, ya que cada prueba genera una frecuencia de vibración que corresponde a la profundidad a la que se encuentra un defecto o el espesor del elemento. Chao et al. (2017) también recuerda que cada prueba es puntual y dura menos de 1 segundo, así que la cantidad a realizar queda a criterio del ingeniero operador. Para este caso la prueba requiere de calibración in-situ.

Ensayo de ultrasonido (Eco - ultrasónico) ASTM C597

Según Chao et al. (2017), este método tiene pocos años de estar completamente desarrollado, por lo que aún no cuenta con norma ASTM, de igual manera, funciona con el principio base del famoso Ultrasonido de 2 transductores (norma ASTM C597). A pesar de ello, cuenta con las ventajas de ser preciso, portable y fácil de usar.

El objetivo de esta prueba, según la norma ASTM C597 (2016) es identificar defectos internos del concreto mediante la introducción de pulsos de energía de vibración dentro de un espécimen de concreto haciendo uso de un transductor transmisor, se determina el tiempo que tarda un pulso en viajar de un transductor emisor a un transductor receptor, colocados a una distancia determinada y con base en esa información se calcula la velocidad de viaje de la onda.

El equipo requerido para este ensayo consta de diversos canales de transductores contenidos en una antena que contiene una unidad de procesamiento de datos, donde en su configuración más avanzada el equipo logra medir hasta 66 viajes de ondas en menos de 1 segundo, generando una imagen de la sección virtual transversal del concreto. Por lo general, la antena tiene 30 cm de largo y 10 cm ancho, y esta prueba solo es capaz de obtener información de debajo del área de ella, por lo que la cantidad de repeticiones queda a discreción del ingeniero operador. El realizar mapeos con este equipo, permite generar tomografías tridimensionales del interior del concreto (Chao et al., 2017).

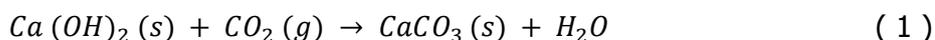
Al igual que con la prueba de Impacto-Eco, se puede calcular la profundidad de los defectos tipo delaminación, vacíos o segregaciones, evaluar el contenido de lechada en tubos de postensado y requiere calibración in-situ; pero no es capaz de calcular la profundidad de las grietas transversales.

Ensayo de carbonatación por medición de fenolftaleína UNE 112011-2011

Según el ACI 515.1R-79 (1986), el pH de una solución indica si esta es alcalina, neutra o ácida. Una solución neutra es aquella con un pH de 7; para que una solución se considere ácida debe tener un pH menor a 7; por último, las alcalinas tienen valores de pH mayores a 7. La guía de igual manera aclara que cuando el pH empieza a decrecer desde 7, la solución se vuelve cada vez más ácida, volviéndose así más agresivos sus ataques en el concreto.

La carbonatación, según Campos et al. (2016), es un fenómeno natural que ocurre de forma espontánea en miles de estructuras de concreto alrededor del mundo. Es una reacción química que sucede entre la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y el dióxido de carbono (CO_2);

la portlandita está presente como producto de la hidratación de los componentes del cemento portland (CP) como el silicato tricálcico (C₃S) y silicato dicálcico (C₂S) (Neville et al., 2007). Esta reacción puede ser escrita de forma simplificada como:



En los concreto donde no se tiene acero de refuerzo se trata de un proceso de pocas consecuencias. De forma distinta sucede en el concreto reforzado con varillas de acero, ya que este proceso químico, considerado inofensivo, avanza progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto, hasta causar corrosión al llegar al acero de refuerzo (Parrot et al., 1987).

Además del efecto en la corrosión del refuerzo, la carbonatación puede dar lugar a aumentos en las resistencias a tracción y a compresión de las zonas afectadas, así como a tensiones y micro-fisuración. Asimismo, dado que durante la reacción el CO₂ atmosférico se fija de forma irreversible, la carbonatación del concreto es también muy importante desde el punto de vista medioambiental (Galán, 2011).

Entre las consecuencias que tiene sobre el concreto está el que disminuye su pH de valores mayores a 12,5 (típico de concretos sanos o recientemente elaborados) a valores entre 8 y 9 unidades, al suceder esto, el ambiente que rodea al refuerzo de acero pierde sus propiedades protectoras (capa de óxido pasivo), y se desencadena la corrosión del acero (Moreno et al., 2000). En ambientes tropicales no marinos, la carbonatación del concreto es el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado (Serrano et al., 2006). El elevado pH del concreto se debe principalmente a la presencia de hidróxido de calcio, que se libera al hidratarse el cemento Portland, que constituye aproximadamente 15 % a 25 % de la pasta (ACI 201.2R-01,2000).

Los principales compuestos del cemento portland sin hidratar son los óxidos: de calcio (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y de hierro (Fe₂O₃) (Moreno et al., 2000); varían ampliamente y en el momento que la proporción de CaO decrece, produce como consecuencia que el Ca(OH)₂ que se forma, como producto de la hidratación del CaO, también disminuya (Montemor et al., 2002). Específicamente en los concretos realizados con cemento portland solamente importa la carbonatación del Ca(OH)₂, sin embargo, cuando llega a consumirse, se da la posibilidad de que inicie la carbonatación del silicato cálcico hidratado, C-S-H (Neville et al., 2007).

La carbonatación del C-S-H produce una descalcificación del gel y una polimerización de los silicatos, llegando en último término a formar, junto con el carbonato cálcico, un gel

de sílice hidratado. El CaCO_3 precipita en la mayoría de los casos en forma de calcita, aunque en determinadas condiciones se pueden generar también los polimorfos aragonitos y vaterita (Galán, 2011).

Los principales factores que hay que considerar en la carbonatación del concreto son: la porosidad, el tipo y la cantidad de cemento, el nivel de compactación, el tipo y el tiempo de curado, la relación agua/cemento, y las condiciones ambientales.

La porosidad es fundamental puesto que la red de poros constituye el camino de avance del CO_2 proveniente del exterior. A su vez, la porosidad está condicionada por el tipo y la cantidad de cemento, el nivel de compactación, el tiempo y tipo de curado y la relación agua-cemento. Un mal curado o una mala compactación del concreto pueden dar lugar a una elevada porosidad, especialmente en la superficie externa del concreto. En general, y dentro de unos límites aceptables de hidratación, una baja relación agua-cemento produce menos permeabilidad en el concreto dada la formación de poros pequeños no interconectados (Houst,1994).

Se ha descubierto la presencia de una mayor profundidad de carbonatación cuando la cantidad de Ca(OH)_2 es menor (Bier et al., 1987); y según Moreno et al. (2004), se ha llegado a concluir que existe una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento, donde la profundidad de carbonatación aumenta conforme el contenido de cemento disminuye (Figura 19). Esto adquiere mayor importancia, debido a que el concreto se puede fabricar usando un rango amplio de contenidos de cemento portland, además del uso de materiales suplementarios para su adición o sustitución.

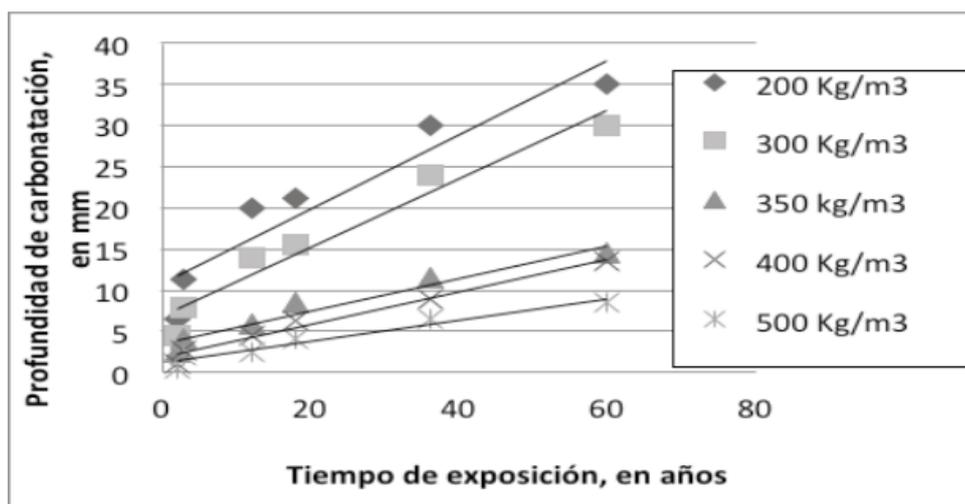


Figura 19. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos de cemento por Kg/m^3

Fuente: Moreno et al., 2004

La cantidad de cemento, según Malami et al. (1994), es determinante no sólo por el efecto que tiene sobre la porosidad del concreto sino también por la capacidad que tiene de fijar el CO_2 . El tipo de cemento también influye en las condiciones de avance de la carbonatación, ya que el contenido en aluminatos y álcalis de las adiciones puede modificar la velocidad de avance. La cantidad necesaria de CO_2 para bajar el pH hasta rangos casi neutros, en los que las armaduras dejan de estar protegidas, variará en función de la reserva alcalina que el cemento aporte al concreto, la cual depende tanto del tipo como de la cantidad de cemento utilizado.

La relación a/c determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación: es así como la relación a/c y el grado de compactación afectan al volumen de vacíos en el concreto, y por ende el volumen de aire del concreto (Neville et al., 2007). La relación agua- cemento (a/c), según Haque et al. (1996), ha sido descrita por diversos investigadores como el principal parámetro que afecta el avance de la carbonatación en el concreto, tal como se observa en el comportamiento de la Figura 20.

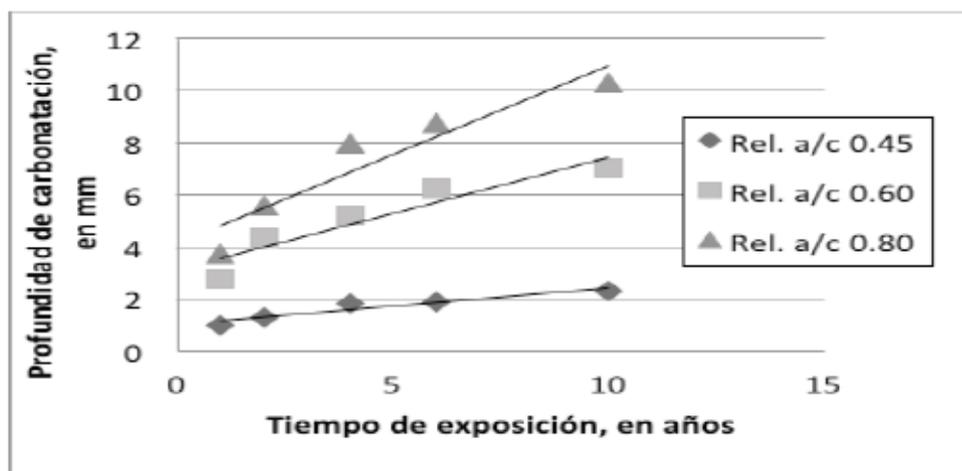


Figura 20. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c

Fuente: Moreno et al., 2004

La humedad relativa (HR) ambiental es un factor importante para la progresión de la carbonatación, con mayor rapidez en el intervalo de 50 % - 70 % (Tuutti et al., 1982), por otra parte, a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas (mayor al 70 %), los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono.

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

Figura 21. Efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación

Fuente: Tuutti et al., 1982

Para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto se requiere de una pequeña concentración de CO₂, la cual normalmente se encuentra en la atmósfera en una concentración promedio de 0,03 % en volumen (300 ppm) según Montani et al. (2000). Las mayores profundidades de carbonatación han sido encontradas en zonas de mayor concentración de CO₂, como lo pueden ser algunas zonas urbanas y/o industriales (Khunthongkeaw et al., 2006).

Khunthongkeaw et al. (2006), obtuvieron una ecuación que permite estimar una predicción del avance de la carbonatación natural utilizando pruebas aceleradas, considerando parámetros ambientales. El estudio fue llevado a cabo utilizando especímenes de concreto con características similares (relación a/c y contenido de cemento); sin embargo, carece de representatividad al tener concretos de características similares, lo que conduce a que sus resultados de predicción puedan ser calculados utilizando un solo parámetro ambiental para todos sus concretos y que aun así estos tengan buena confiabilidad (Campos et al., 2016).

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los concretos endurecidos que indica la carbonataron, 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 1 g de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico (UNE 112011, 2011).

EL ensayo consiste en aplicar el indicador a la superficie de la muestra de concreto, lo que produce una coloración rosa oscuro cuando está en presencia de un medio básico o de pH alto, valor estandarizado como límite (9,5), esto implica que no existen riesgos de carbonatación; por otro lado, si la muestra no cambia su coloración evidencia la existencia de carbonatación. La prueba del indicador de fenolftaleína es recomendada sólo para establecer un estimado de la profundidad que ha alcanzado la carbonatación (profundidad del frente de carbonatación) y no valores específicos de pH (Cozar, 2016).

Para medir la profundidad de carbonataron, X_{CO_2} , es necesaria la extracción de testigos de la estructura. La medida se debe efectuar sobre una superficie limpia de partículas

sueltas, por lo que se puede hacer uso de brochas para limpiar anticipadamente, siempre proceder sin demora con el propósito de evitar que la superficie se carbonate. Es necesario que la muestra posea unas dimensiones suficientes que permitan 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 del concreto no se encuentre suelto o existan fisuras (UNE 112011,2011).

La disolución del indicador (fenolftaleína) puede aplicarse con un pulverizador u otro medio que permita extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie de la muestra de concreto. El avance de la carbonatación se determina al aplicar el indicador de fenolftaleína en la superficie de la muestra y observar las variaciones de color en función del pH del mismo. La fenolftaleína se torna incolora en valores inferiores a 8 (concreto carbonatado) y toma un color púrpura para valores de pH superiores a 9,5 (concreto no carbonatado).

Las mediciones se ejecutan con una regla u otro instrumento de medición. El procedimiento no debe tardar más de 20 min. Pasados 1 o 2 minutos, después de la aplicación y antes de transcurrir 15 minutos, se realiza la medición de la profundidad de la zona incolora (carbonatada) medida desde la superficie (UNE 112011, 2011).

El avance de la carbonatación en el interior del concreto progresa atenuándose en el tiempo, esto debido a que es un proceso de difusión. El modelado de la carbonatación suele realizarse utilizando una solución de la Ley de Fick de la difusión, donde a partir de la profundidad del frente carbonatado X_{CO_2} la velocidad de penetración puede obtenerse (Geocisa, 2002).

Ensayo esclerométrico (Martillo Schmidt) ASTM C-805

El ensayo con esclerómetro (o martillo de Schmidt) consiste en medir la dureza superficial del concreto mediante el principio de rebote de una masa elástica. El rebote medido por el aparato se correlaciona con una curva proporcionada por el fabricante del esclerómetro, con la cual se puede estimar la resistencia del concreto colocado. Se debe dejar en claro que este método no sustituye al de resistencia a compresión simple, pero es útil para verificar la uniformidad del concreto (Hernández, 2017).

Este procedimiento es descrito mediante la norma ASTM C 805, la cual indica que es requerida una masa de concreto con un espesor superior a 10 cm para poder llevarla a cabo, además las superficies de la muestra, al igual que la anterior, deben ser planas y

lisas. Se deben tomar como mínimo 10 lecturas y estas se deben aplicar a 2,5 cm entre sí y a 5 cm de los bordes del espécimen.

Control de fisuras ACI 224R (2001), 224.1 R-93 (1993)

Según el ACI 224R (2001) las fisuras presentes en las estructuras de concreto pueden indicar importantes problemas estructurales y sus causas pueden ser muy numerosas. Diferentes estudios indicaron que la tenacidad a la fractura de la pasta cementicia y el mortero aumenta a medida que disminuye la relación A/C, pero esta relación tiene poco efecto sobre la tenacidad a la fractura del concreto. La tenacidad a la fractura del mortero aumenta al aumentar el contenido de arena, y la del concreto aumenta con el aumento del tamaño máximo del agregado grueso.

Las fisuras se deben reparar si éstas llegan a reducir la resistencia, la rigidez o la durabilidad de la estructura a niveles inadmisibles, o en el peor de los casos, si la función de la estructura resulta seriamente perjudicada. Es necesario tener en cuenta que, antes de iniciar con los detalles de las reparaciones en una estructura, es necesario establecer las causas de la fisuración y para ello se deben revisar los planos, las especificaciones y registros de construcción y mantenimiento, e inclusive, de ser necesario, se debe realizar una investigación in situ y un análisis estructural completo. La ubicación y magnitud de las fisuras, así como el estado general del hormigón de una estructura, se pueden determinar mediante observaciones directas e indirectas, ensayos no destructivos y destructivos, y ensayos de núcleos extraídos de la estructura (ACI 224.1R-93,1993).

2.6 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, 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 se tiene:

2.6.1 Medidas de tendencia central

- 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:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}$$

Donde:

\bar{X} = Es la media aritmética

N = Números de valores obtenidos

2.6.2 Medidas de dispersión

Según Folgueras (s. f.) entre las medidas de dispersión se tienen:

- 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:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}$$

Donde:

σ^2 = Es la varianza

N = Números de muestras

X_i = Observación número i de la variable X . i puede tomar valores entre 1 y N

\bar{X} = Es la media de la variable X

- 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:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Donde:

σ = Es la desviación estándar

- Coeficiente de variación: Es una medida de dispersión relativa de los datos y permite comparar la dispersión o variabilidad de dos o más grupos. Es una medida de dispersión más representativa que las anteriores, dado que da un resultado independiente de las unidades que figuran en las variables y se expresa solo como un porcentaje. 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

3. SELECCIÓN DE TALUDES PARA ANÁLISIS

Se realizaron los estudios en tres taludes localizados en diferentes puntos del país; de ellos se obtuvieron los permisos pertinentes para iniciar con la ejecución de los ensayos. En el Cuadro 7 se observa la información de la ubicación de cada una de las estructuras ensayadas.

Cuadro 7. Información general de la ubicación de los taludes a ensayar

Talud	Nombre	Coordenadas	Ubicación
Talud 1	Tarbaca I.C.E Estación Terrena	N9.82258 W84.10983	Ruta 209, 7,1 km suroeste del parque central de Aserrí Distrito: Tarbaca Cantón: Aserrí Provincia: San José
Talud 2	Guayabal	N9.993371 W84.113868	Calle Guayabal, contiguo a la Urbanización El Río Distrito: Heredia Cantón: Heredia Provincia: Heredia
Talud 3	LANAMME	9.935306 W84.045321	Dentro de las instalaciones de LANAMME Distrito: Sam Pedro Cantón: Montes de Oca Provincia: San José

3.1 Talud 1: Tarbaca

El primer talud ensayado fue el localizado en Aserrí, específicamente en la Estación Terrena del Instituto Costarricense de Electricidad (I.C.E); este tiene ya poco más de 15 años de haberse lanzado. Para una mejor ubicación espacial se presenta más adelante la locación por medio del sistema satelital de Google.

3.1.1 Descripción del sitio de ensayo

Datos Generales:

Ubicación: Terrena, Aserrí

Provincia: 1º San José

Cantón: 6º Aserrí

Distrito: 2º Tarbaca

Tipo de Obra: Suelo cosido

Fecha de Finalización: 2006

Área Estabilizada: No se obtuvo la información

Datos constructivos:

Anclajes Pasivos: No se obtuvo la información

Drenes Profundos: No se obtuvo la información

Acera y Cuneta: No se obtuvo la información

Instalación de drenes sub horizontales: No se obtuvo la información



Google (s.f.). [Vista satelital de la ubicación del talud en Tarbaca, San José]



Google (s.f.). [Vista satelital ampliada de la ubicación del talud en Tarbaca, San José]

3.1.2 Información del diseño

Cuadro 8. Dimensiones de los aspectos utilizados en la construcción del Talud

Aspecto	Dimensiones de diseño
<i>Espesor del concreto</i>	10 cm
<i>Resistencia del concreto</i>	250 kg/cm ²
<i>Malla electrosoldada</i>	No se obtuvo la información
<i>Anclajes</i>	No se obtuvo la información

3.1.3 Información de la zona

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (2020) en la zona de Tarbaca en Aserrí se pueden encontrar suelos utisoles e inceptisoles. El orden de suelos utisoles son uno de los más viejos en Costa Rica, y fácilmente localizables en lugares muy húmedos con mucha precipitación, lo cual provoca que se laven las bases como sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg); su coloración y tonalidades pardo rojizas o rojizas es dada por la deshidratación o lixiviación del hierro (Fe) y las coloraciones pardo amarillentas y amarillentas se dan cuando el suelo se encuentra hidratado INTA-Costa Rica (2014). Estos suelos presentan una mezcla de arcilla y cuarzo llamada plintita, rica en hierro y pobre en materia orgánica. En la Figura 22 se pueden observar algunas variables climáticas de Aserrí.

El INTA-Costa Rica (2014) menciona también que estos suelos se caracterizan por:

- Presencia de un horizonte argílico (es un horizonte superficial con un porcentaje mayor de arcillas filosilicatadas que el material del suelo subyacente).
- Alto contenido de aluminio extraíble y baja cantidad de calcio (suelos ácidos).
- Suelos más meteorizados y más bajos en bases que los Alfisoles ya que tienen menos del 35 % de saturación de bases.
- Poseer uno o varios horizontes con concreciones de manganeso en el subsuelo, dada la disolución y precipitación, por periodos alternos de humedad y sequedad del suelo.
- Relieves que van desde ligeramente hasta fuertemente ondulados.
- Son suelos profundos, y bien desarrollados con una transición difusa entre los horizontes.
- Drenaje interno bueno dada su buena estructuración.

- Contienen arcillas 1:1 (principalmente caolinita) y óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al).

En el caso de los suelos inceptisoles, según el INTA-Costa Rica (2015), estos provienen del efecto de la descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre (meteorización), sobre los sedimentos aluviales (suelos formados de materiales transportados por corrientes de agua) y coluviales (producto de desprendimientos o depósitos) que se depositan cuando no reciben nuevos aportes de sedimentos por un cierto periodo de tiempo. Se consideran suelos recientes y son una etapa juvenil de futuros suelos de los órdenes de los ultisoles y oxisoles.

El INTA-Costa Rica (2015) menciona también que estos suelos se caracterizan por:

- pH ácido.
- Pueden contener minerales de arcilla amorfa como la alófana.
- Meteorización ligera a moderada del material parental y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla iluviada, materia orgánica y, compuestos de Aluminio (Al) y/o Hierro (Fe).
- Alto contenido de materia orgánica.
- Baja tasa de descomposición de la materia orgánica debido a las bajas temperaturas, pero en climas cálidos la tasa de descomposición de materia orgánica es mayor.

Variable	Rango
Temperatura promedio	20°C
Precipitación	148-168 mm.
Horas luz	11.5
Radiación solar	15 (MJ/m ² . día.
Periodos secos /lluvia	5.1/6.9 meses.

Figura 22. Variables climáticas de Aserrí

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2020

Además de las variables climáticas presentadas, el Instituto Meteorológico Nacional (2021) indica que la humedad relativa de la zona de Aserrí es de 92%.

En cuanto a las amenazas de origen natural que se pueden presentar en el cantón de Aserrí se tiene la sismicidad; la Comisión Nacional de Emergencias afirma que el cantón de Aserrí se localiza muy cerca de algunas fuentes sísmica, consideradas fallas activas dadas las evidencias geomorfológicas existentes sobre su fuerte actividad neotectónica, las cuales son las fallas Jaris y Frailes al sur del Valle Central; y existe también la posibilidad que estas fallas tengan continuidad con la falla Belo Horizonte y con la falla Agua Caliente. Entre los

efectos sísmicos de un evento superficial dado cerca del cantón de Aserrí se tienen, deslizamientos de tierra hacia el sur, debido a las fuertes pendientes del lugar y el tipo de roca dominante (rocas volcánicas y sedimentarias intensamente fracturadas); fracturas presentes en el terreno, que pueden generar daños a viviendas y caminos; y el asentamiento del terreno, en suelos poco compactos como rellenos.

Los deslizamientos (Inestabilidad de Terrenos), según la Comisión Nacional de Emergencias, es otra de las amenazas que se pueden presentar; las áreas más vulnerables son las localizadas hacia el sur del cantón (Tarbaca, Guadarrama, Tanquerillas, Vuelta de Jorco, Monte Redondo, Limonal, Buena Vista, La Legua, etc.), dada su topografía y características de las rocas. La actividad sísmica, las fuertes lluvias y la actividad humana (cortes de carretera, tajos, deforestación, etc.) pueden activar esta situación. Entre los efectos de los deslizamientos, se pueden mencionar:

- Caminos y puentes dañados.
- Casas sepultadas.
- Flujos de lodo, causadas por represamientos en ríos.
- Daños a cultivos.

3.2 Talud 2: Guayabal

El segundo talud ensayado fue el localizado en Calle Guayabal de Heredia; el cual cuenta ya con poco más de 7 años de haberse lanzado. En las siguientes imágenes se podrá observar por medio del sistema satelital de Google la zona ensayada para su mejor ubicación espacial.

3.2.1 Descripción del sitio de ensayo

Según la página de la empresa diseñadora y constructora, Ingeotec, S.A, se tiene la siguiente información.

Datos Generales:

Ubicación: "Calle Guayabal", Heredia

Provincia: 4º Heredia

Cantón: 1º Heredia

Distrito: 1º Heredia

Cliente: Municipalidad de Heredia

Tipo de Obra: Suelo cosido

Fecha de Inicio: Junio, 2014

Fecha de Finalización: Setiembre, 2014

Duración: 3 meses

Área Estabilizada: 2501 m²

Datos constructivos:

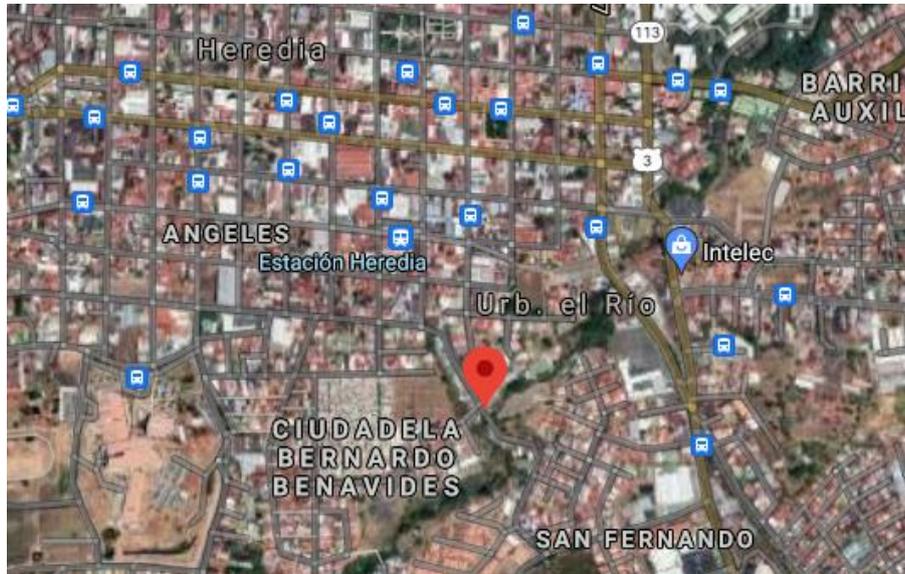
Anclajes Pasivos: 5 518 metros lineales de perforación

Drenes Profundos: 450 metros lineales de perforación

Acera y Cuneta: 150 m de acera; y 150 m de cuneta

Instalación de drenes sub horizontales: 49 unidades

Se construyó un muro anclado tipo "Soil Nailing" como solución a los deslizamientos dados durante la época de lluvia, esto con el fin de brindarle una condición de estabilidad al talud y así proteger la estructura de las casas de residencia ubicadas sobre la corona del talud. Adicionalmente se construyó una acera y caño a lo largo de toda la obra.



Google (s.f.). [Vista satelital de la ubicación del talud en Guayabal, Heredia]



Google (s.f.). [Vista satelital ampliada de la ubicación del talud en Guayabal, Heredia]

El proceso de construcción de este talud se puede observar en la Figura 23 y en la Figura 24; esto desde el movimiento de tierras hasta el lanzado del concreto sobre la malla electrosoldada.



Figura 23. Movimiento de tierra del talud de Guayabal

Fuente: Ingeotec (2014)



Figura 24. Proceso del lanzado de concreto sobre la malla electrosoldada

Fuente: Ingeotec (2014)

3.2.2 Información del diseño

Seguidamente se presenta un resumen de la información recopilada sobre el diseño original de la estructura colocada sobre el talud de Calle Guayabal, presentando su perfil de diseño en la Figura 25 y algunas de sus dimensiones en el Cuadro 9.

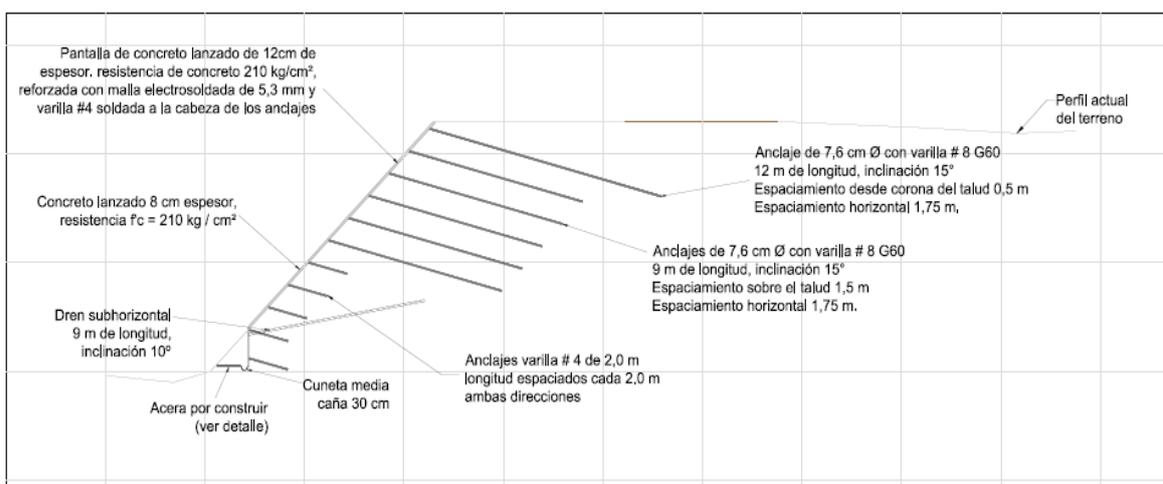


Figura 25. Perfil de diseño utilizado en el talud

Fuente: Ingeotec, S.A (2014)

Cuadro 9. Dimensiones de los aspectos utilizados en la construcción del talud

Aspecto	Dimensiones de diseño
<i>Espesor del concreto - zona superior</i>	12 cm
<i>Espesor del concreto - zona inferior</i>	8 cm
<i>Resistencia del concreto</i>	210 kg/cm ²
<i>Malla electrosoldada</i>	5,3 mm @ 15 cm, G40
<i>Anclajes</i>	Varilla No. 8, G60, mínimo

3.2.3 Información de la zona

Según el informe preparado por IMNSA, Ingenieros Consultores S.A. (2013) para la Municipalidad de Heredia la geología del área está compuesta por formaciones de origen volcánico, tales como formación Tiribí o depósitos de Avalancha Ardiente y formación Colima.

La formación Tiribí o los Depósitos de Avalancha Ardiente, según Echandi (1981) se divide en tres unidades:

- Miembro Electriona (Ignimbritas bien soldadas)

- Miembro La Caja (Tobas poco soldadas)
- Miembro Nuestro Amo (Depósitos de lodos ardientes).

Este suelo se conforma por ignimbritas soldadas con disyunción columnar y bandeamiento horizontal de vidrio negro y pómez, incluyendo fragmentos de lava y escoria que se suelen ubicar en la confluencia de los ríos Torres y Virilla. En otras zonas se presentan tobas poco soldadas compuestas por cenizas finas a gruesas, con fragmentos lávicos y escorias (Pérez, 2000).

En cuanto a la formación Colima, esta representa las primeras emisiones asociadas al vulcanismo de la Cordillera Volcánica Central (Denyer & Arias, 1991). Esta aflora principalmente a lo largo del río Virilla, así como en el río Bermúdez, considerando que está compuesta por lavas cuyas estructuras varían entre blocosa, masiva, lajeada y fracturada irregularmente.

Según Echandi (1981) esta formación tiene un espesor variable, con un máximo de 270 m, que se dividió en tres miembros:

- Miembro Belén: Son andesitas pirogénicas interrumpidas por capas de ceniza.
- Miembro Puente de Mulas: Constituye un manto ignimbrítico, con fragmentos de escoria, lapilli y vidrio, en una matriz tobácea bien desarrollada. Presentan una estructura columnar bien desarrollada.
- Miembro Linda Vista: Son brechas lávicas con un núcleo central denso de lavas andesíticas.

Las variables climáticas también juegan un papel importante en el afecto que puede haber sobre el concreto, por ello, además de los factores climáticos presentadas en el Cuadro 10, el Instituto Meteorológico Nacional (2021) indica que la humedad relativa de la zona de Heredia es de 100 %. De igual manera, la Municipalidad de San Pablo de Heredia Alcaldía Municipal (2014) menciona que, en el cantón de San Pablo de Heredia, zona muy cercana a la localización del talud de ensayo, se presenta una humedad promedio de 77 %, y en periodos húmedos del año esta puede alcanzar los 90% e inclusive registrarse valores diarios de horarios de un 100 %. Para marzo, mes más seco del año, se registra un promedio de un 65 % de humedad relativa y un 90 % de humedad en el mes más húmedo, octubre.

Cuadro 10. Variables climáticas de Heredia

Variable	Datos
Precipitación Anual Promedio (mm/año)	2369
Temperatura (máx./min) (°C)	25/16
Altitud Media (msnm)	1200
Brillo Solar (máx./min) (horas/d)	8,9/4,2

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Municipalidad de San Pablo de Heredia Alcaldía Municipal (2014).

Según el mapa de amenazas de la Comisión Nacional de Emergencias, las principales amenazas naturales que se presentan en Guayabal de Heredia son la inestabilidad de laderas, principalmente a lo largo del río Pirro; la presencia de zonas de deslizamientos en sectores localizados y la actividad sísmica. Para las dos primeras amenazas, la CNE aconseja planificar el envío de las aguas servidas y pluviales de las diferentes urbanizaciones, para que estas no aumenten el caudal de los ríos, evitando así que se provoquen inundaciones en las épocas de lluvias intensas.

En cuanto a la sismicidad, la Comisión Nacional de Emergencias afirma que el cantón de Heredia se localiza dentro de una región sísmica con una gran cantidad de fallamientos locales, denominada "Valles y Serranías del Interior del País", la cual ha generado sismos de magnitud de moderada a baja y superficiales; además de esto, a 3 km hacia el norte de la ciudad de Heredia, se localiza un sistema de fallas sumamente importantes, Ángel-Vara Blanca, la cual ha generado sismos de magnitudes hasta de 6,2 Mw.

3.3 Talud 3: LANAMME

El tercer talud ensayado fue el localizado dentro de las instalaciones del (LANAMME); el cual tiene ya 10 años de haberse lanzado. Más adelante se presenta la locación por medio del sistema satelital de Google para su mejor ubicación espacial, un croquis de la zona trabajada en la Figura 26 y la obra finalizada en la Figura 27.

3.3.1 Descripción del sitio de ensayo

Según la página de la empresa diseñadora y constructora, Ingeotec, S.A, se tiene la siguiente información.

Datos Generales:

Ubicación: San Pedro, UCR

Provincia: 1º San José

Cantón: 15º Montes de Oca

Distrito: 1º San Pedro

Cliente: Universidad de Costa Rica

Tipo de Obra: Suelo cosido

Fecha de Inicio: Enero, 2011

Fecha de Finalización: Febrero, 2011

Duración: 1 mes

Área Estabilizada: 178,8 m²

Datos constructivos:

Anclajes Pasivos: 14 anclajes de 6 m, 14 anclajes de 3 m, 126 metros lineales.

Espaciamiento entre anclajes cada 1,75 m en ambas direcciones.

Drenajes de PVC de 5,0 cm de diámetro y 25 cm de longitud a cada 1,75 m, en ambas direcciones sobre el talud (aproximadamente un dren por cada 3 m²).

En este caso se realizó el diseño y la construcción de un muro de suelo cosido en la parte posterior del edificio de LANAMME, en San Pedro, dada la necesidad de su estabilización. Fue necesario realizar un corte de altura importante por las características topográficas de la zona, teniendo como limitante la existencia de una carretera en la corona del talud.

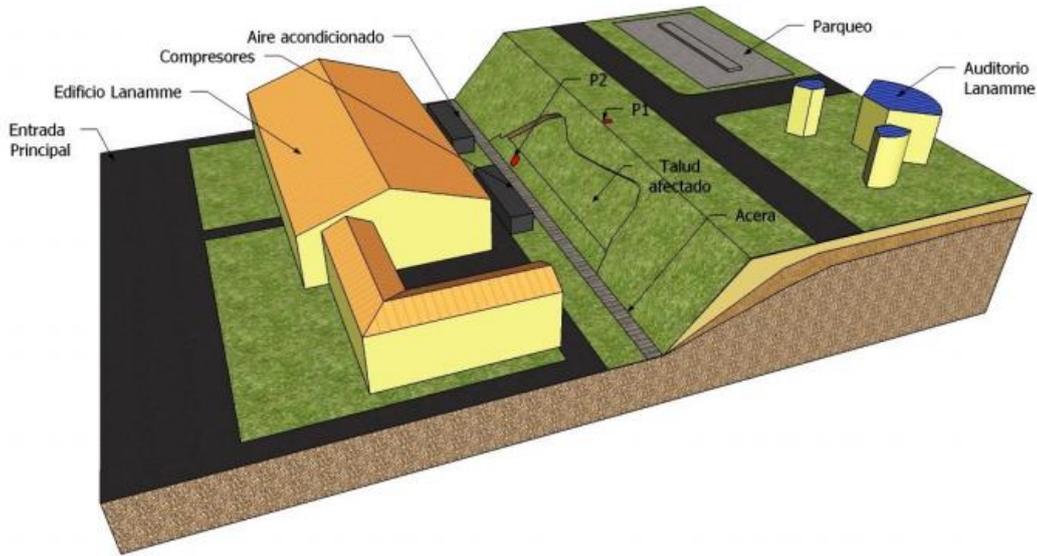
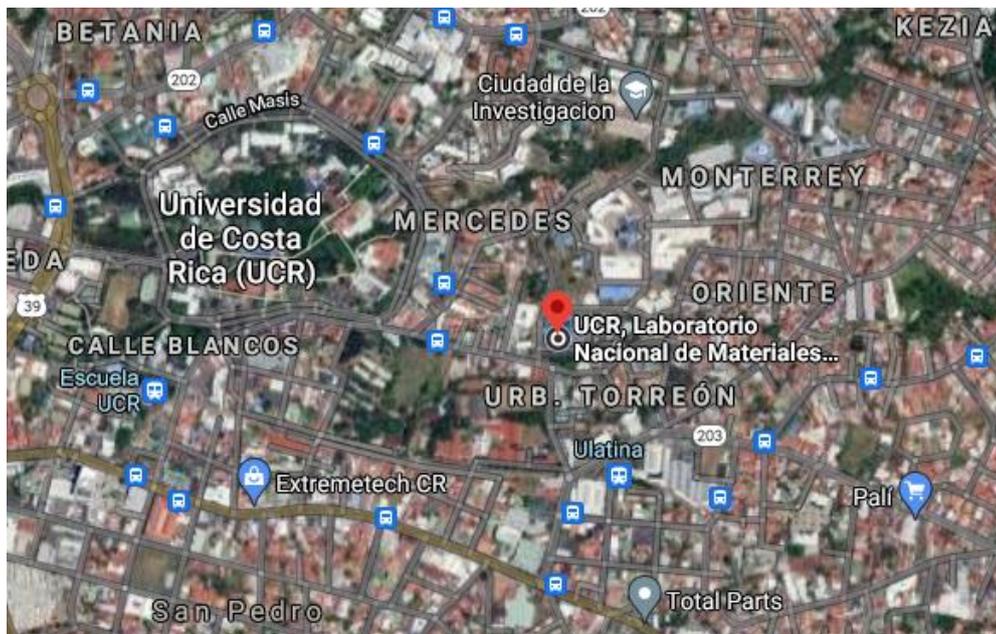


Figura 26. Croquis de Ubicación de los trabajos de campo

Fuente: Ingeotec, S.A (2010)



Google (s.f.). [Vista satelital de la ubicación del talud en LANAMME, San Pedro]



Google (s.f.). [Vista satelital ampliada de la ubicación del talud en LANAMME, San Pedro]



Figura 27. Detalles finales del talud de la LANAMME

Fuente: Ingeotec (2011)

3.3.2 Información del diseño

Se presenta a continuación un resumen de la información recopilada sobre el diseño del talud de LANAMME, el cual se puede observar en la Figura 28 y la Figura 29 , junto con algunas de sus dimensiones en el Cuadro 11.

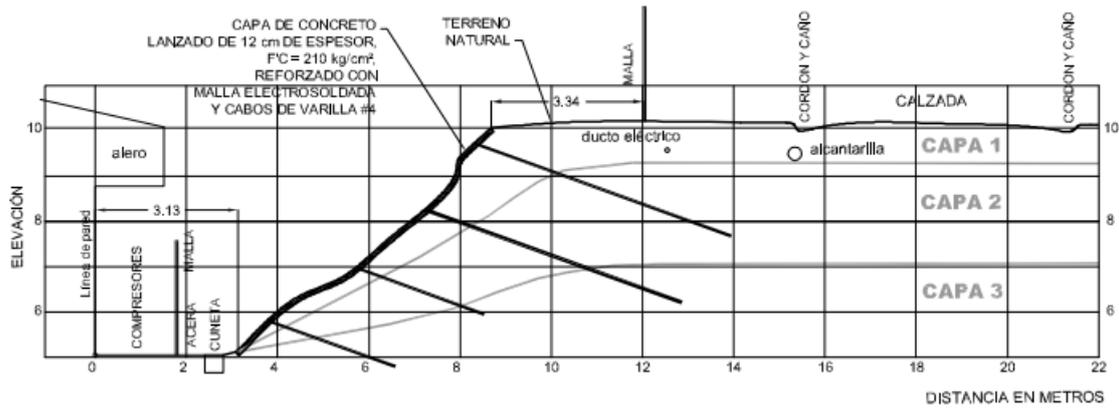


Figura 28. Perfil de diseño utilizado en el talud, perfil No.4

Fuente: Ingeotec, S.A (2010)

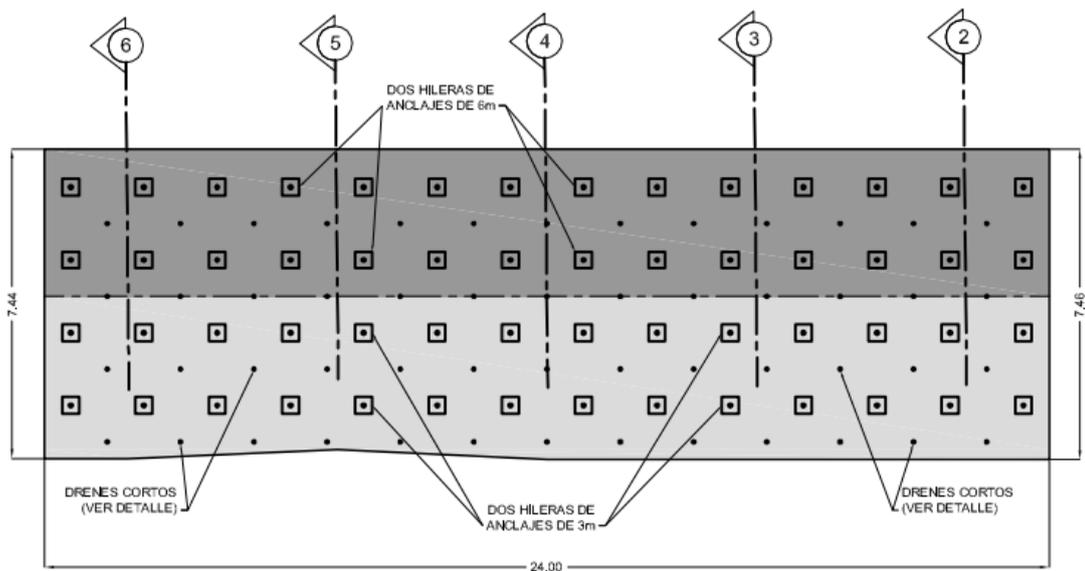


Figura 29. Vista frontal del talud con la solución

Fuente: Ingeotec, S.A (2010)

Cuadro 11. Dimensiones de los aspectos utilizados en la construcción del Talud

Aspecto	Dimensiones de diseño
<i>Espesor del concreto - zona superior</i>	12 cm
<i>Espesor del concreto - zona inferior</i>	12 cm
<i>Resistencia del concreto</i>	210 kg/cm ²
<i>Malla electrosoldada</i>	No.2, 4,8 mm @ 15 cm
<i>Anclajes</i>	Varillas No. 8, G60

3.3.3 Información de la zona

Según Tencio (2013) en la zona de Montes de Oca predominan los suelos andosoles y los inceptisoles (estos últimos presentes también en la zona de Tarbaca). Los andosoles, también conocidos como andisoles, se desarrollan a partir de cenizas y materiales volcánicos como piedra pómez y lavas, donde adicionalmente presentan altos valores de materia orgánica, y buena acumulación de humus al ser suelos de las regiones subhúmedas y húmedas (INTA-Costa Rica, 2015).

Entre las propiedades físico-químicas de estos suelos, según INTA-Costa Rica (2015), se menciona su caracterización mineralógica, ya que posee minerales de poco ordenamiento cristalino (amorfos) como la imogolita y las alofanas; meteorizan rápida que forma mezclas amorfas de aluminio y silicato; suelos de texturas medias (franco arenosa, franco o franco limosa); poseen de moderada a débil estructuración; drenaje de bueno a moderadamente excesivo; y por lo general son suelos de color negro en la superficie y de colores café con la profundidad.

Además de las variables climáticas presentadas en el Cuadro 12, el Instituto Meteorológico Nacional (2021) indica que la humedad relativa de la zona de San Pedro es de 88 %.

Cuadro 12. Variables climáticas de Montes de Oca

Variable	Datos
Precipitación Anual Promedio (mm/año)	2400
Temperatura (máx / min) (°C)	25/15
Altitud Media (msnm)	1161
Brillo Solar (horas/d)	5

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Tencio (2013)

Según la Comisión Nacional de Emergencias, una de las amenazas de origen natural que se pueden presentar en el cantón de Montes de Oca es la actividad sísmica, ya que el cantón se localiza dentro de la región sísmica denominada Valles y Serranías del interior del país, caracterizada por eventos generados a partir de fallas geológicas locales. Entre los efectos que podría causar un sismo superficial y que sea cercano al Cantón de Monte de Oca serían:

- Fracturas de importancia en el terreno, que podrían afectar viviendas, carreteras y acueductos.
- Deslizamientos de tierra, principalmente en las laderas donde la pendiente y el contenido de humedad de los terrenos favorecen este proceso.

Además de lo mencionado, la Comisión Nacional de Emergencias puntea la actividad Volcánica como otra amenaza para algunas regiones del Cantón de Montes de Oca, esto si se produjera una erupción en el Volcán Irazú o el Volcán Turrialba. Entre los efectos más probables están las pérdidas totales en agricultura y ganadería; la generación de lahares (avalanchas de lodo) que afectan los cauces, y sectores aledaños a los ríos y afluentes; colapso de viviendas por acumulación de cenizas en el techo y problemas de salud a la población.

Los deslizamientos (Inestabilidad de Suelos) son también una amenaza nombrada por la Comisión Nacional de Emergencias, acelerados por la actividad sísmica, la deforestación, cortes de carreteras mal diseñadas y las lluvias fuertes. Las zonas más vulnerables son aquellas de gran pendiente localizados hacia los márgenes de los principales ríos y quebradas del cantón. Entre los efectos que podrían llegar a tener sobre Montes de Oca son la destrucción de carreteras y puentes, daños en casas, e inclusive personas sepultadas, daños en acueductos, tendidos eléctricos..., avalanchas de lodo que afecten las partes bajas de ríos aledaños.

4. DEFINICIÓN DE LOS ENSAYOS A REALIZAR

Los ensayos realizados de las muestras obtenidas en cada uno de los sitios señalados en el capítulo anterior, se dividieron en destructivos y no destructivos según su naturaleza; y se eligieron dada la capacidad de realizarlos en los taludes elegidos y a la disponibilidad de equipos, técnicos e indicadores.

Cuadro 13. Resumen de ensayos destructivos y no destructivos aplicados

Ensayos destructivos	Ensayos no destructivos
Obtención y prueba de núcleos extraídos de concreto lanzado, ASTM C1604/C1604M	Número de rebote de concreto endurecido (Ensayo esclerométrico), ASTM C805
Resistencia a la compresión uniaxial, ASTM C39	Profundidad de carbonatación, UNE 112011
Densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido, ASTM C642	Causas, evaluación y reparación de fisuras ACI 224.1 R
Análisis Petrográfico ASTM C295 / ASTM C856	-

4.1 Ensayos destructivos

4.1.1 Método de prueba estándar para la obtención y prueba de núcleos extraídos de concreto lanzado

La resistencia del concreto lanzado se ve afectada por la ubicación del concreto en la estructura, lo que se debe considerar al seleccionar los puntos de extracción. La obtención de las muestras puede requerir una combinación de taladrado, aserrado y rectificado, que pueden llegar a tener el potencial de afectar negativamente la condición de la muestra si no se tiene cuidado durante el muestreo y las pruebas (ASTM C1604/C1604M, 2019).

El número de muestras, los lugares de muestreo y los procedimientos de muestreo deben ser establecidos, el ACI 318S-14 (2014) indica que esto puede depender de la uniformidad del material en la estructura y debe ser determinado por un profesional facultado. En este caso se determinó que, dados los ensayos requeridos a realizar sobre los especímenes, la extracción de tres núcleos permitiría el contar con el material suficiente para realizarlos, pero es posible recurrir a más perforaciones de ser necesario y si se cuenta con los permisos pertinentes.

Según la norma ASTM C1604/C1604M (2019), para realizar la extracción de los testigos de concreto lanzado se debe perforar de forma perpendicular a la superficie y se

debe evitar perforar cerca de juntas o bordes. Estos núcleos deben tener un diámetro, para determinar la resistencia a la compresión, de al menos 75 mm, aunque diámetros menores podrían ser permitidos. Si la relación entre la longitud y el diámetro (L/D) del núcleo excede 2,1, se debe reducir la longitud del núcleo para que la relación esté entre 1,9 y 2,1. Los especímenes con relaciones longitud-diámetro iguales o menores a 1,75 requieren correcciones en los resultados en la resistencia a la compresión.

Después de extraer los núcleos, se debe limpiar el agua superficial con un paño seco y dejar que la humedad restante de la superficie se evapore, pero sin dejar pasar más de 1 h después de la perforación, se debe colocar los núcleos separados en bolsas de plástico o en recipientes no absorbentes bien sellados para prevenir la pérdida de humedad. Estos núcleos se deben mantener a temperatura ambiente, y bien protegidos de la exposición directa a la luz solar. Se deben transportar los núcleos al laboratorio tan pronto como sea posible, y si se usa agua durante el aserrado o pulido del núcleo, se debe completar estas operaciones tan pronto como sea posible, pero no más tarde de 2 días después de la perforación de testigos.

Después de completar la preparación final se debe utilizar un paño seco para eliminar la humedad de la superficie, para colocar los núcleos nuevamente en bolsas de plástico selladas por al menos 5 días después de la última vez que se humedeció y antes de la prueba.

4.1.2 Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto.

Según la ASTM C39/C39M (2020), antes de realizar la prueba de compresión se debe medir la longitud del espécimen y con ella calcular la relación longitud-diámetro (L/D). El diámetro se obtiene promediando dos medidas tomadas en ángulo recto entre sí a la altura media del espécimen. No se deben fallar los núcleos si cualquier diámetro individual de un mismo cilindro difiere de cualquier otro diámetro por más de 2%.

Para realizar la prueba se debe colocar el bloque de carga inferior con su superficie endurecida hacia arriba, sobre el plato o la mesa de la máquina de ensayo, también se deben limpiar las caras de aplicación de carga de los bloques de carga superior e inferior, de los espaciadores si se utilizaran, y del espécimen. Si se utilizan almohadillas no adheridas (neopreno), se deben limpiar las caras de aplicación de carga de los anillos de retención y se deben centrar las almohadillas no adheridas en el espécimen. Por último, se debe colocar

el espécimen sobre el plato de carga inferior y alinear el eje del espécimen con el centro del bloque de carga superior.

Se debe aplicar la carga de compresión hasta que el indicador muestre que la carga decrece firmemente y el espécimen exhibe un patrón de fractura bien definido, recordando que al ensayar con almohadilla de neopreno una fractura de esquina como la del Tipo 5 o 6 del patrón, mostrado en la Figura 30, puede ocurrir antes de que se haya alcanzado la capacidad última del espécimen. Es por ello que se debe continuar comprimiendo el espécimen hasta que la capacidad última sea obtenida. Es necesario anotar la carga máxima alcanzada por el espécimen y el tipo de fractura.

<p align="center">TIPO 1</p> <p align="center">Conos bien formados en ambos extremos y menos de 25 mm de la grieta a través de la corona</p>	<p align="center">TIPO 2</p> <p align="center">Cono bien formado en un extremo, grietas verticales a través de la cabeza, cono no bien definido en el otro extremo</p>	<p align="center">TIPO 3</p> <p align="center">Agrietamiento vertical columnar a través de ambos extremos. Conos no bien formados</p>
<p align="center">TIPO 4</p> <p align="center">Fractura diagonal sin agrietamiento a través de los extremos, golpearlo con un martillo para distinguirlo del tipo 1.</p>	<p align="center">TIPO 5</p> <p align="center">Fracturas laterales en la parte de arriba o abajo (ocurren comúnmente con las almohadillas de neopreno)</p>	<p align="center">TIPO 6</p> <p align="center">Similar al tipo 5 pero el extremo del cilindro es puntiagudo</p>

Figura 30. Patrones esquemáticos de fracturas típicas

Fuente: INTE C39 (2020)

Si la relación entre la longitud del núcleo y el diámetro (L/D) del espécimen es 1,75 o menos, se debe corregir los resultados obtenidos por la máquina de falla multiplicando el valor por el factor de corrección apropiado que se muestra en la siguiente tabla, recordando que se puede hacer interpolación de ser necesario.

Cuadro 14. Factores de corrección de la carga a compresión según la relación L/D

L / D	1,75	1,50	1,25	1,00
Factor	0,98	0,96	0,93	0,87

4.1.3 Método de prueba estándar para la densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido

Según la norma internacional, ASTM C642 (2013), con este método de ensayo se puede lograr determinar la densidad, el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el concreto ya endurecido.

Siempre que sea posible, la muestra debe consistir de varias porciones individuales de concreto, donde cada una se debe ensayar por separado. El volumen de las porciones individuales no debe ser menor de 350 cm³ (o para concreto de peso normal, de aproximadamente 800 g), teniendo en cuenta que cada porción debe estar libre de grietas, fisuras visibles, o de bordes rotos.

Primeramente, se debe determinar la masa seca al horno, para ello se obtiene la masa de las porciones y se secan en un horno a una temperatura de 110 °C ± 5 °C por no menos de 24 h. Después de remover los especímenes del horno se secan en aire seco a una temperatura de 20 °C a 25 °C y se les determina su masa. Ellos se deben secar por periodos de 24 h hasta que la diferencia de valores de masa sucesivos no exceda del 0,5% del valor menor de masa comparado. Este último valor de la masa seca al horno se designa como: A.

Se continúa con la masa saturada después de inmersión el agua, donde después de su secado final, enfriado y determinación de la masa, los especímenes se sumergen en agua a temperatura de aproximadamente 21 °C por un período no menor de 48h hasta que dos valores sucesivos de masa de la muestra saturada de superficie seca a intervalos de 24h, indique un incremento de la masa de menos de 0,5% del valor mayor comparado. Para cada determinación de masa se utiliza una toalla con la cual se remueve la humedad superficial de los especímenes para dejarlos en condición de saturados de superficie seca. El último valor obtenido de masa saturada de superficie seca después de su inmersión en agua, se designa como: B.

Como próxima determinación se tiene la masa saturada después de ebullición en agua, donde el espécimen ya sumergido en agua, se coloca en un recipiente adecuado, cubierto con agua potable, y se hierve por un período de 5 h. Se le deja enfriar al aire por

pérdida natural de calor, por un período no menor de 14 h, hasta que su temperatura final sea de 20 °C a 25°C. Se le remueve la humedad superficial con una toalla y se determina la masa del espécimen. La masa saturada de superficie seca después de ebullición, se designa como: C.

Por último, después de su inmersión en agua y ebullición, los especímenes se suspenden dentro del agua por un alambre y se determina su masa sumergida aparente, que se designa como: D.

Se procede a la ejecución de los siguientes cálculos utilizando las masas A, B, C y D determinadas.

$$\text{Absorción después de inmersión, \%} = [(B - A) / A] * 100 \quad (2)$$

$$\text{Absorción después de inmersión y ebullición, \%} = [(C - A) / A] * 100 \quad (3)$$

$$\text{Densidad seca global} = [A / (C - D)] * \rho = g1 \quad (4)$$

$$\text{Densidad global después de inmersión} = [B / (C - D)] * \rho \quad (5)$$

$$\text{Densidad global después de inmersión y ebullición} = [C / (C - D)] * \rho \quad (6)$$

$$\text{Densidad aparente} = [A / (A - D)] * \rho = g2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de vacíos (espacio de poros permeables), \%} \\ = (g2 - g1) / g2 * 100 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{o bien, \%} = (C - A) / (C - D) * 100 \quad (9)$$

4.1.4 Análisis Petrográfico

Los procedimientos requeridos en el análisis petrográfico de cualquier muestra, según la norma C295/C295M (2019), dependerán en gran medida del propósito del examen y la naturaleza de la muestra, donde en la mayoría de los casos será requerido el uso de un microscopio óptico. La norma también especifica que para los análisis petrográficos completos se requerirá la examinación de los agregados por medio de procedimientos adicionales como análisis de difracción de rayos X (XRD), análisis térmico diferencial (DTA), espectroscopía infrarroja entre otros.

El análisis petrográfico debe lograr establecer si el agregado contiene minerales químicamente inestables (como sulfatos solubles) o materiales volumétricamente inestables (como esmectitas anteriormente conocidas como el grupo de minerales montmorillonita-saponita o arcillas expansivas). Además de ello debe establecer el contenido de minerales de sulfuro de hierro que potencialmente puede oxidar dentro del concreto o la pirita, la marcasita o la pirrotina que pueden causar manchas de óxido cerca de su superficie. Pirrotina dentro de algunos tipos de rocas, y en presencia de humedad, podrían oxidarse y expandirse, causando un agrietamiento significativo dentro del concreto. Inclusive, la oxidación de los minerales del sulfuro de hierro, dentro del concreto, pueden producir un ataque de ácido sulfúrico, de sulfatos, o ambos (C295/C295M, 2019).

Es posible realizar el análisis petrográfico directamente en concreto endurecido, y para ello la norma ASTM C856/C856M (2020) estipula que las muestras a examinarse pueden tomarse de construcciones de concreto, pueden ser productos de concreto o partes de ellos, pueden ser muestras de concreto o mortero que han sido expuestas a entornos naturales, a condiciones de servicio simuladas, o sometidas a pruebas de laboratorio.

Lozano (2005) indica que la petrografía se encarga de combinar la inspección visual con el examen microscópico usando el estereoscopio, el microscopio petrográfico y el microscopio metalográfico. El ser capaz de interpretar la información es una herramienta poderosa para desarrollar soluciones prácticas a los problemas que se presentan en las construcciones. El análisis petrográfico puede llegar a determinar según el autor:

- Condiciones del material
- Causas del deterioro del concreto
- Probable comportamiento futuro
- Conformidad con la especificación del proyecto

- Descripción del concreto, definiendo: Grado de hidratación del cemento, estimación de la relación A/C, grado de carbonatación en la pasta de cemento, presencia de ceniza volante y estimación de la cantidad, grado de corrosión en el acero de refuerzo, identificación de la evidencia de la reacción patógena álcali-agregado, ataque de los sulfatos, identificación del potencial reactivo de los agregados, causas de fisuración, entre otros.

Además de ello, Lozano (2005) recuerda que el análisis petrográfico se podría remplazar con un análisis químico, con un análisis de difracción de rayos X o con la exploración con microscopía electrónica. Al ejecutar el análisis una de sus intenciones es determinar los componentes de la muestra según se requiera; para este caso se desea conocer la posibilidad de que existan minerales que puedan ocasionar alguna reacción álcali-agregado. En la Figura 31 se detallan varios de los minerales y rocas potencialmente nocivos para las reacciones álcali-árido.

MINERALES	
Ópalo	
Calcedonia	
Tridimita	
Cristobalita	
Cuarzo vitrificado	Criptomicrocristalino, microcristalino
Cuarzo de grano grueso	Intensamente fracturado, granulado y deformado con incrustaciones submicroscópicas, de las que la illita es una de las más corrientes.
Silice volcánica cristalizada	Intermedia y básica
Cuarzo jaspeado	
ROCAS	
Rocas ígneas	
Granitos	Más del 30 % de cuarzo deformado, caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más
Granodiorita	
Charnockitas	
Piedra Pómez	
Riolitas	
Andesitas	Silice o silice intermedia, rica en cristales volcánicos; cristales desvitrificados; tridimita.
Dacitas	
Latitas	
Perlitas	
Obsidias	
Toba volcánica	
Basaltos	Calcedonia; cristobalita; palagonita; vidrio volcánico básico
Rocas metamórficas	
Gneis	Más del 30 % de cuarzo deformado, caracterizado por un ángulo de extinción ondulante de 25° o más
Esquistos	
Cuarcitas	Cuarzo deformado como anteriormente; 5 % o más de silice
Corneanas	Cuarzo deformado como anteriormente; cuarzo microcristalino a criptomicrocristalino
Fillitas	
Argilitas	
Rocas sedimentarias	
Areniscas	Cuarzo deformado como antes; 5 % o más de silice; ópalo
Grauwacas	Cuarzo deformado como antes; cuarzo microcristalino a criptomicrocristalino
Limos	Cuarzo deformado como antes; cuarzo microcristalino a criptomicrocristalino
Pizarras	
Tilitas	Cuarzo deformado como antes; cuarzo microcristalino a criptomicrocristalino
Silice	Cuarzo criptomicrocristalino; calcedonia; ópalo
Silix	
Diatomita	Ópalo; cuarzo criptomicrocristalino
Calizas arcillosas dolomíticas	Dolomita; filosilicatos expuestos por dedolomitización
Dolomías arcillosas cálcicas	
Calcita arcillosa dolomítica con cuarzo	
OTRAS SUSTANCIAS	
Vidrio sintético	Gel de silice

Figura 31. Algunos minerales, rocas y otras sustancias potencialmente nocivas reaccionando con los álcalis del cemento

Fuente: Segarra (2005)

4.2 Ensayos no destructivos

4.2.1 Método de prueba estándar para el número de rebote de concreto endurecido

Conforme la norma internacional, ASTM C805/C805M (2018), se tiene que al utilizar un martillo de acero que impacta, con una cantidad predeterminada de energía, un émbolo de metal en contacto con una superficie de concreto. Se mide la distancia a la que rebota el martillo (reportado como un rebote adimensional) o las velocidades del martillo antes y después del impacto.

Esta prueba es aplicable para evaluar la uniformidad del concreto, para revisar variaciones en la calidad del concreto en toda la estructura y para estimar la resistencia en el lugar, la cual se obtiene de una relación entre el número de rebotes y la resistencia del concreto, proporcionada por los fabricantes del instrumento, para este caso se observa la relación aplicada en la Figura 32.

La norma deja claro que para una mezcla de concreto dada, el número de rebote es afectado por factores como el contenido de humedad de la superficie de prueba, tipo de acabado utilizado en la construcción de la superficie a ensayar, la distancia vertical desde el fondo de la colocación del concreto, la profundidad de carbonatación e inclusive la orientación del instrumento. Todos estos factores deben tenerse en cuenta al interpretar el número de rebote.

Para seleccionar la superficie de prueba esta debe tener al menos 100 mm de espesor y estar fijado dentro de una estructura, de al menos 150 mm de diámetro. Cuando se tienen superficies con texturas toscas, con texturas suaves o con mortero suelto se pulirá con la piedra abrasiva que viene con el equipo, secando siempre cualquier agua superficial que esté presente.

En cuanto a la ejecución del ensayo, el instrumento se debe sostener firmemente de modo que el émbolo quede perpendicular a la superficie de prueba. Luego se debe empujar gradualmente martillo hacia la zona de prueba hasta que impacte el martillo, manteniendo la presión ejercida, para así presionar el botón en el costado del instrumento para bloquear el émbolo en su posición retraída. Ya con ello se procede a leer y registrar el número de rebote al número entero más cercano.

En cada área de prueba elegida se deben tomar diez lecturas, donde las distancias entre los puntos a impactar sean de al menos 25 mm, y la distancia entre los puntos de

impacto y los bordes de la estructura deben ser de al menos 50 mm. Es requerido examinar la impresión hecha en la superficie después del impacto, y si este golpeó a través de un vacío de aire cercano a la superficie, se debe ignorar la lectura y tomar otra.

Las lecturas que difieran del promedio de los diez impactos dados en más de 6 unidades, deben ser eliminados para nuevamente determinar un promedio con las lecturas restantes. Si más de dos lecturas difieren del nuevo promedio en más de 6 unidades, se descarta todo el conjunto de lecturas y se determinan los rebotes en diez nuevas ubicaciones dentro de la zona de prueba.

Algunos de los datos que se deben reportar para este ensayo son la fecha de la prueba, la edad del concreto, resistencia de diseño del concreto, características de la superficie ensayada, orientación del instrumento con respecto a la horizontal al incremento de 45 grados más cercano (se debe utilizar un ángulo positivo si el instrumento apunta hacia arriba y un ángulo negativo si apunta hacia abajo con respecto a la horizontal durante la prueba), cualquier condición inusual que pueda afectar las lecturas, entre otras.

Es importante tener en cuenta que la utilización de este método presenta un alto porcentaje de error; según un análisis realizado por Rudeli y Santilli (2017) se determinó que el porcentaje de error que presenta un esclerómetro con curva completa es de entre 38,9% y 45%.

IMPACT ANGLE α					
R	$\alpha -90^\circ$	$\alpha -45^\circ$	$\alpha 0^\circ$	$\alpha +45^\circ$	$\alpha +90^\circ$
20	125	115	115	115	115
21	135	125	125	125	125
22	145	135	135	135	135
23	160	145	145	145	145
24	170	160	160	160	160
25	180	170	170	170	170
26	198	185	185	185	185
27	210	200	200	200	200
28	220	210	210	210	210
29	238	220	220	220	220
30	250	238	238	238	238
31	260	250	250	250	250
32	280	265	265	265	265
33	290	280	280	280	280
34	310	290	290	290	290
35	320	310	310	310	310
36	340	320	320	320	320
37	350	340	340	340	340
38	370	350	350	350	350
39	380	370	370	370	370
40	400	380	380	380	380
41	410	400	400	400	400
42	425	415	415	415	415
43	440	430	430	430	430
44	460	450	450	450	450
45	470	460	460	460	460
46	490	480	480	480	480
47	500	495	495	495	495
48	520	510	510	510	510
49	540	525	525	525	525
50	550	540	540	540	540
51	570	560	560	560	560
52	580	570	570	570	570
53	600	590	590	590	590
54	over 600	over 600	580	580	580
55	over 600	over 600	800	570	570

Figura 32. Relación del número de rebote y la resistencia del concreto, según el ángulo de impacto del martillo

4.2.2 Determinación de la profundidad de carbonatación en concretos endurecidos y puestos en servicio

Según la norma UNE 112011 (2011), este ensayo permite el obtener información del estado de carbonatación de un elemento en un determinado momento de su vida, para con ello conocer si esta ha llegado hasta la armadura y ha logrado provocar el inicio de su corrosión. La profundidad de la capa carbonatada en el concreto demuestra una reducción de la alcalinidad, la cual puede determinarse mediante un indicador de pH, haciendo esto visible por medio de cambios de coloración.

La carbonatación del concreto es un proceso químico de envejecimiento debido al ambiente, 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 concreto endurecido tiene un alto pH, provocado principalmente por la presencia del hidróxido de calcio, pero el concreto al ir perdiendo el hidróxido de calcio, produce que el pH disminuya, dando paso a que se pueda generar la corrosión del acero (González, 2012). Esta corrosión, según Rojas (2008), genera consecuencias como la disminución de la sección de la varilla, fisuras en el concreto dada la disminución o desaparición de la adherencia entre el refuerzo y el concreto y a las presiones que realiza el óxido expansivo.

Para medir la profundidad de carbonatado X_{CO_2} , es necesario utilizar una superficie limpia de partículas sueltas, por lo que debe limpiarse anticipadamente con brocha, procediendo siempre rápidamente, con el propósito de evitar que la superficie sufra más carbonatación por estar directamente contra el ambiente. Las muestras no requieren una geometría determinada, solo que posea unas dimensiones suficientes como para medir la profundidad de la capa carbonatada desde la cara exterior del elemento.

La fenolftaleína preparada puede aplicarse con pulverizador, goteo o cualquier otro medio que permita extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie; este no debe aplicarse en cantidad excesivas ni tampoco sobre superficies mojadas para que no escurra de una zona a otra.

El avance de la carbonatación se logra determinar al aplicar el indicador de fenolftaleína a la superficie de la muestra de concreto y medir las variaciones de color en función del pH del mismo. La fenolftaleína se vuelve incolora en valores inferiores a 8 (concreto carbonatado) y toma un color morado para valores de pH superiores a 9,5 (concreto no carbonatado). Las medidas de la profundidad de la zona incolora, desde la

superficie, se realizan con una regla u otro instrumento pasados de 15 a 30 minutos después de aplicar el indicador.

La norma utilizada también menciona que debe tenerse en cuenta que, si la carbonatación presenta un frente homogéneo o singular, se toma una sola profundidad. Cuando el frente aparezca de forma irregular, la medida se expresa como la penetración media, la máxima y la mínima.

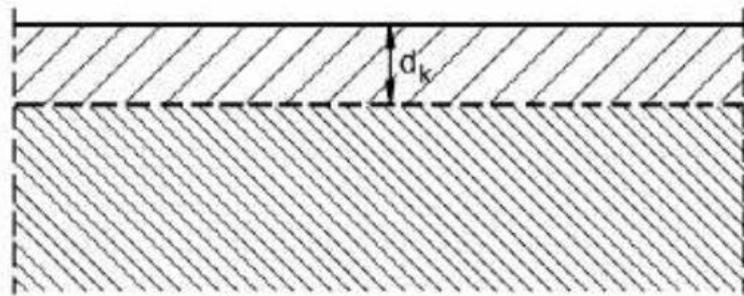


Figura 33. Frente homogéneo de la profundidad de carbonatación

Fuente: UNE 112011 (2011)

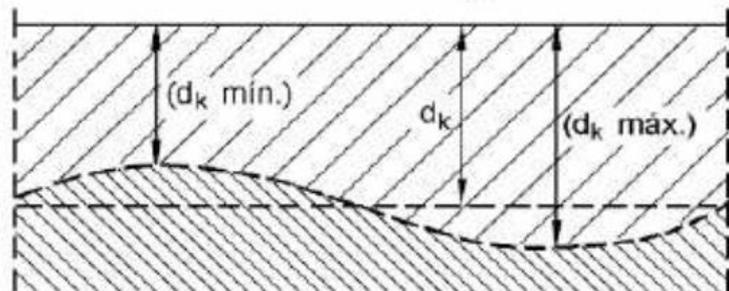


Figura 34. Frente irregular de la profundidad de carbonatación

Fuente: UNE 112011 (2011)

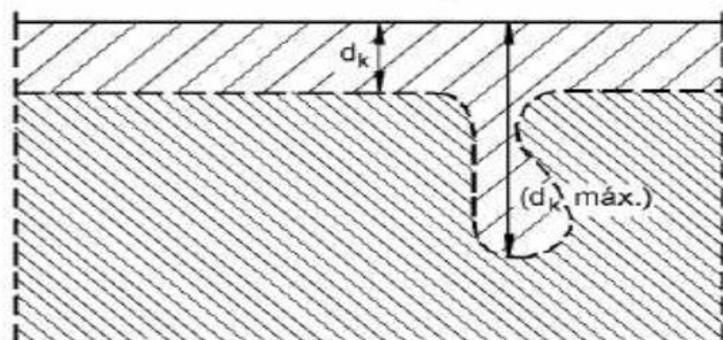


Figura 35. Frente singular de la profundidad de carbonatación

Fuente: UNE 112011 (2011)

Según (Geocisa, 2002), la carbonatación es un proceso de difusión y por ello su avance en el interior del concreto se da con el tiempo. El modelizado de la carbonatación

suele realizarse utilizando una solución de la Ley de Fick de la difusión, siendo esta la siguiente ecuación.

$$X_{CO_2} = V_{CO_2} * \sqrt{t} \quad (10)$$

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)

A partir de la profundidad del frente carbonatado X_{CO_2} , la velocidad de penetración puede obtenerse y con ello predecir en cuantos años se produciría la corrosión de las armaduras embebidas en el concreto. Esto se predice al sustituir en la ecuación anterior la profundidad de carbonatación por la profundidad que hay entre el punto máximo de carbonatación y el acero ($X_{recubrimiento}$) y haciendo uso de la velocidad ya determinada se consigue el tiempo "t" buscado. Para este caso, el ensayo de fenolftaleína para determinar la presencia de carbonatación se aplicó en las tres muestras de concreto extraídas del talud en estudio, y así con ellos determinar la carbonatación más cercana a la malla electrosoldada.

4.2.3 Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de concreto

"Los defectos estructurales más comunes que el concreto reforzado puede presentar a causa de mal control de calidad o procesos deletéreos son: grietas transversales (perpendiculares a la cara del concreto), delaminaciones (grietas paralelas al plano de la cara del concreto), vacíos internos y segregaciones" (Chao et al, 2017), ejemplo de ello se observa en la Figura 36.



Grieta Transversal



Delaminación



Segregación con alto

Figura 36. Defectos estructurales comunes
Fuente: Chao et al. (2017)

Según el ACI 224.1R-93 (1993) las fisuras pueden afectar la apariencia de una estructura, pero pueden también indicar fallas estructurales o falta de durabilidad, y la importancia que se le dé dependerá del tipo de estructura, como así también de la naturaleza de la fisuración, ya que una fisura permisible en una estructura podría no serlo en otra. Por ello, en cada uno de los taludes se hará un análisis visual de las fisuras ya presentes en ellos y con el uso de una regla medir su espesor aproximado.

Una fisura sólo se podrá reparar correctamente si se conocen sus causas y si los procedimientos de reparación son adecuados para dichas causas, ya que de no ser así las reparaciones durarán poco.; por ello para que las reparaciones sean exitosas a largo plazo se debe atacar no sólo las propias fisuras sino también las causas de ella. La fisuración del concreto se le puede atribuir a numerosas razones, y según el ACI 224.1R-93 (1993) las siguientes son las principales causas que lo puede producir.

Fisuración por retracción plástica: Este tipo de fisuración se crea en el proceso de rigidización, por tensiones de tracción que provocan fisuras poco profundas, esto ocurre por la pérdida de humedad rápida provocada por la temperatura tanto del aire y como del concreto, de la humedad relativa y de la velocidad del viento. Estos factores pueden terminar combinándose para provocar altos niveles de evaporación superficial tanto en clima caluroso como en clima frío.

Cuando la humedad se evapora de la superficie del concreto que está recién colocado más rápido de lo que puede ser reemplazada por el agua de exudación, el concreto superficial se contrae y es así como en el concreto débil, plástico y en proceso de rigidización se desarrollan tensiones de tracción que provocan fisuras poco profundas pero variables, pero a menudo bastante anchas en la superficie. En cuanto a su longitud, esta varía entre pocos milímetros y más de un metro, y su separación puede ser de pocos milímetros o de hasta 3 m. Las fisuras por retracción plástica pueden comenzar con poca profundidad, pero pueden convertirse en fisuras que abarquen la totalidad de la altura del elemento. Una forma típica de esta fisuración se observa en la Figura 37.

Para prevenir estos problemas el ACI 224.1R-93 (1993) menciona que existen medidas como el uso de boquillas de niebla para saturar el aire en contacto con las superficies, y el uso de láminas plásticas para cubrir las superficies, resultan también útiles los rompevientos que reducen la velocidad del viento y los parasoles que reducen la temperatura superficial.

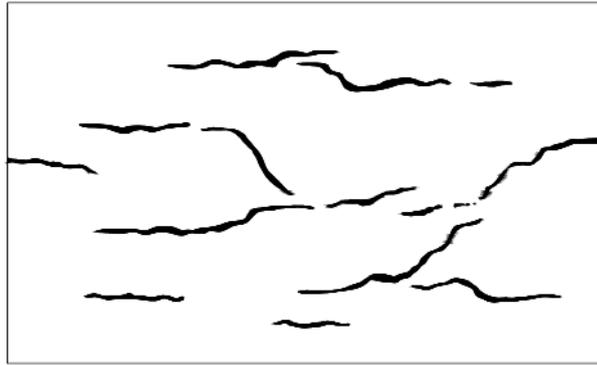


Figura 37. Típica fisuración por retracción plástica

Fuente: Price, 1982

Fisuración por precipitación de los agregados: El concreto tiende a continuar consolidándose incluso después de su colocación, vibrado y acabado, y durante este período puede estar restringido por las armaduras, por el encofrado o por una colada previa, que pueden provocar vacíos y/o fisuras adyacentes al elemento. Esta fisuración aumenta a medida que aumenta el tamaño de las barras, que aumenta el asentamiento del concreto y disminuye el recubrimiento y se puede intensificar si el vibrado es insuficiente o si se emplean encofrados muy flexibles o con pérdidas. Una representación de este tipo de fisuración se puede observar a continuación.

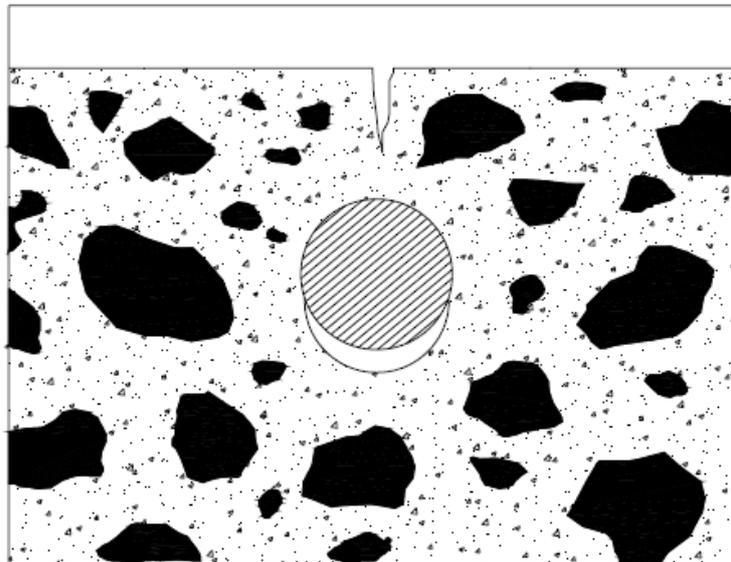


Figura 38. Fisura formada debido a una precipitación

Fuente: Price, 1982

Retracción por secado: Esta es provocada por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, la cual se puede contraer hasta un 1%. Por otro lado, los agregados proveen una restricción interior que reduce la magnitud de este cambio de volumen en aproximadamente 0,06%.

Cuando se humedece el concreto este tiende a expandirse y si esta retracción se produjera de manera no restringida el concreto no se fisuraría. La mayor retracción de la superficie provoca el inicio de fisuras, que con el tiempo pueden penetrar más profundamente hacia el interior.

Tensiones de origen térmico: Según el ACI 224.1R-93 (1993), en una estructura de concreto las variaciones de temperatura pueden ser provocadas por partes de la estructura que pierden calor de hidratación a diferentes velocidades, o sino por condiciones climáticas que la enfrían o la calientan.

Los diferenciales de temperatura que son provocados por las tasas de disipación del calor de hidratación del cemento normalmente sólo afectan al concreto masivo (puede incluir columnas, estribos, vigas, zapatas, además de presas), mientras que, por otro lado, los diferenciales de temperatura provocados por cambios de la temperatura ambiente pueden afectar a cualquier estructura.

El ACI 224.1R-93 (1993) afirma que cuando se da la fisuración del concreto masivo esta se puede deber a una temperatura en la superficie de la masa mayor que la temperatura en el interior de la misma. Donde el gradiente de temperatura puede ocurrir o porque la parte central del concreto se calienta más que la parte exterior por el calor liberado durante el proceso de hidratación del cemento, o bien por un enfriamiento más rápido del exterior respecto del interior de la estructura. Sea cual sea el caso, en ambos se originan tensiones de tracción en el exterior y, si estas tensiones llegan a superar la resistencia a la tracción, habrá fisuración.

Reacciones químicas: Algunas reacciones químicas pueden provocar fisuraciones, esto producto de los materiales que están en contacto con el concreto endurecido o de los materiales utilizados para su preparación. Una de ellas es la álcali-sílice, la cual provoca la formación de un gel expansivo que tiende a extraer agua de otras partes del concreto. Esta situación provoca expansiones locales junto con las correspondientes tensiones de tracción, y eventualmente el deterioro total de la estructura. Las medidas de control utilizables incluyen la correcta elección de los agregados, el uso de cementos con bajo contenido de álcalis y el uso de puzolanas, las cuales a su vez contienen sílices muy finas y altamente

activas. La primera medida mencionada puede impedir que ocurra el problema, mientras que las dos últimas tienden a reducir la relación entre álcalis y sílice reactiva, provocando la formación de un silicato de calcio alcalino no expansivo (ACI 224.1R-93,1993).

Ciertas rocas carbonatadas son partícipes de reacciones con los álcalis; en algunos casos estas reacciones producen expansión y fisuración. Estas reacciones álcali-carbonato generalmente están asociadas con calizas dolomíticas y arcillosas que tienen una estructura granular muy fina. El concreto que es afectado por esta reacción se caracteriza por un patrón de fisuración en red, y se distingue de la reacción álcali-sílice por la ausencia de depósitos superficiales de gel de sílice en las fisuras. Este problema se puede minimizar evitando los agregados reactivos, utilizando un menor tamaño máximo de agregado y utilizando cemento de bajo contenido de álcalis (ACI 224.1R-93,1993).

De forma general y en algunos casos extremos y luego de realizar los ensayos convenientes, se podrían usar puzolanas que son conocidas por brindar una resistencia adicional contra el ataque de los sulfatos.

El ACI 224.1R-93 (1993) menciona que, en base a una cuidadosa evaluación de la magnitud y las causas de la fisuración encontrada, es posible seleccionar procedimientos para lograr uno o más de los siguientes objetivos:

1. Restablecer y aumentar la resistencia
2. Restablecer y aumentar la rigidez
3. Mejorar la funcionalidad
4. Lograr impermeabilidad
5. Mejorar la apariencia de la superficie del concreto
6. Mejorar la durabilidad
7. Impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo en las armaduras

Recordando que, por ejemplo, si la fisuración fue originada principalmente por retracción por secado, es probable que luego de un tiempo se estabilice. Pero, por el contrario, si las fisuras se deben a un proceso de asentamiento de las fundaciones, las reparaciones serán inútiles hasta que se corrija el problema del asentamiento. Algunos métodos de reparación de fisuras según el ACI 224.1R-93 (1993) son:

Inyección de resinas epoxi: Fisuras de muy poca abertura, hasta 0,05 mm, pueden ser adheridas con resinas epoxi, ya que esta técnica generalmente consiste en establecer

bocas de entrada y venteo a intervalos poco espaciados a lo largo de las fisuras, pero se debe tener en cuenta que, a menos que se haya corregido la causa que originó la fisuración, es posible que aparezca una nueva fisura cerca de la original. Si no se logra eliminar la causa se puede iniciar por perfilar y sellar la fisura, tratándola como una junta, o sino establecer una junta para luego acomodar el movimiento e inyectar la fisura con una resina epoxi u otro material adecuado.

El primer paso para este método consiste en limpiar, tanto como sea pueda, las fisuras que se hayan contaminado, mientras que las superficiales se deben sellar para evitar que el material epoxídico salga antes de gelificarse. Instalar las bocas de entrada y venteo para luego mezclar la resina epoxi por pastones, donde los componentes adhesivos se mezclan previamente de acuerdo con instrucciones dadas por el fabricante generalmente usando un agitador mecánico tal como una paleta mezcladora, o por métodos continuos.

Es necesario cuidar el mezclar sólo la cantidad de adhesivo que se pueda usar antes que el material comience a gelificarse. Se procede con la inyección de la resina epoxi utilizando bombas hidráulicas, tanques de presión o pistolas neumáticas, teniendo en cuenta seleccionar de forma cuidadosa la presión de inyección a utilizar; ya que con frecuencia una mayor presión no mejora mucho la velocidad de inyección, al contrario, el uso de una presión demasiado elevada puede propagar las fisuras ya existentes, esperando la situación. Una vez que se ha curado la resina epoxi que fue inyectada, el sellado superficial se debe eliminar por trituración o el medio más conveniente.

Perfilado y sellado: Este método se puede aplicar en condiciones que requieren una reparación inmediata no estructural, tanto fisuras finas de patrón irregular como fisuras aisladas de mayor tamaño. Consiste en agrandar la fisura a lo largo de su cara expuesta para llenarla y sellarla con un sellador adecuado. Se adapta especialmente a superficies planas y horizontales (pisos o pavimentos), pero también aplica sobre fisuras en superficies verticales (utilizando un sellador no fluido) y superficies curvas (tubos, pilas y postes).

Este tratamiento reduce la posibilidad de que la humedad llegue a las armaduras o que de alguna manera atraviese el concreto, provocando manchas superficiales u otros problemas; ya que un uso habitual y efectivo es la impermeabilización de superficies de concreto que se encuentran en contacto con el agua o que están expuestas a presión hidrostática.

Los selladores pueden ser de diferentes materiales, donde se incluyen resinas epoxi, uretanos, siliconas, polisulfuros, materiales asfálticos o morteros de polímero., pero evitando los morteros cementicios por su potencial de fisuración.

El procedimiento en sí (Figura 39) consiste en preparar en la superficie una ranura de profundidad generalmente entre 6 mm a 25 mm, utilizando una sierra para concreto, herramientas manuales o herramientas neumáticas. Esta ranura se limpia con un chorro de aire, con arena o con agua a presión para luego secarla y así colocar un sellador en la ranura y permitir su curado.

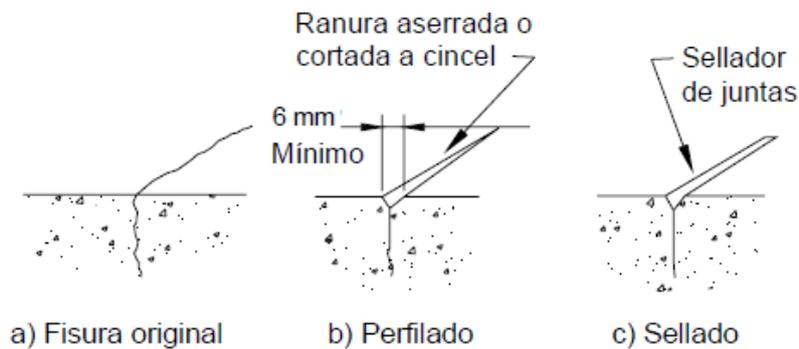


Figura 39. Reparación de una fisura mediante perfilado y sellado

Fuente: Johnson, 1965

Costura de fisuras: En este caso y según Johnson (1965), coser una fisura consiste en perforar orificios a ambos lados para insertar unidades metálicas en forma de U de patas cortas (grampas o bridas de costura) y asegurarlas con mortero, tal y como se observa en la Figura 40.

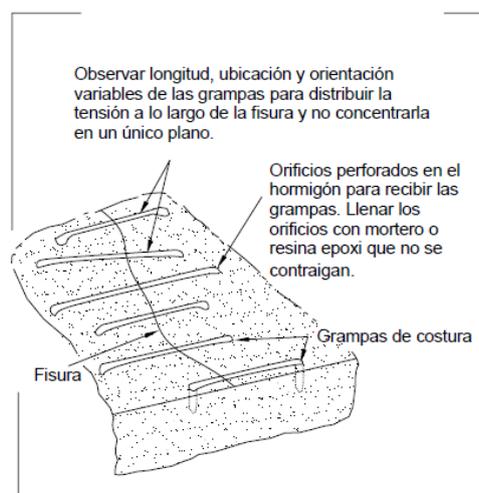


Figura 40. Costura de una fisura

Fuente: Johnson, 1965

La estructura tiende a volverse más rígida cuando se cose una fisura, pudiendo con ello aumentar la restricción global de la estructura y provocar fisuración en otras zonas del concreto; por lo que llegaría a ser necesario el reforzar las secciones adyacentes y emplear este método junto con otros.

Para realizar el procedimiento de costura se debe iniciar con la perforación de orificios a ambos lados de la fisura, limpiarlos y anclar las patas de las grampas en ellos, utilizando un sistema adhesivo en base a resina epoxi o un mortero que no permita contracción. La longitud de las grampas y su orientación deben ser variables y se las debe ubicar de manera que la tracción transmitida a través de la fisura se distribuya sobre cierta superficie.

Armadura adicional: Esta técnica, según el ACI 224.1R-93 (1993), consiste en sellar la fisura, para luego perforar orificios que intersequen el plano de fisuración aproximadamente a 90 grados, inyectar adhesivo epoxi tanto en el orificio como en la fisura y colocar una barra de armadura en el orificio perforado. En ocasiones el uso de acero postensado es la mejor solución para cuando se debe reforzar una parte importante del elemento, o cuando se deben cerrar las fisuras; sin embargo, se puede hacer uso de barras pretensadas para aplicar una fuerza de compresión, analizando cuidadosamente los efectos de la fuerza de sobre las tensiones dentro de la estructura de concreto.

Perforación y obturación: Este método consiste en perforar hacia abajo en toda la longitud de la fisura y llenarla con mortero de manera de formar una cuña o tapón, pero por lo mencionada, esta técnica sólo es aplicable cuando las fisuras son de forma relativamente recta y siempre que uno de sus extremos sea accesible.

Para ello se debe perforar un orificio de entre 50 mm a 75 mm de diámetro centrado sobre la fisura y siguiendo la trayectoria de la misma. El orificio realizado debe ser suficientemente grande para intersecar la fisura completamente y proveer suficiente material de reparación que absorba estructuralmente las cargas ejercidas sobre la cuña. Luego de la perforación, este se debe limpiar, impermeabilizar y llenar con mortero.

Es necesario tener en cuenta que, si lo esperado es lograr impermeabilidad y no la transferencia de cargas estructurales, este orificio perforado debería ser llenado con un material resiliente de bajo módulo de elasticidad, y no mortero. Y si, por otra parte, el efecto obturador es esencial, el material resiliente se puede colocar en un segundo orificio, llenando con mortero el primero.

Llenado por gravedad: Al hacer uso del método del llenado por gravedad, se puede recurrir a monómeros y resinas de baja viscosidad para sellar fisuras con anchos superficiales de entre 0,03 mm a 2 mm. De igual forma se ha hecho uso de los metacrilatos

de alto peso molecular, uretanos y algunas resinas epoxi de baja viscosidad, ya que cuanto menor sea la viscosidad, más finas serán las fisuras que se pueden llenar.

El procedimiento inicia por la limpieza de la superficie, ya sea con chorro de aire y/o con chorro de agua, permitiendo que las superficies húmedas se sequen durante varios días para lograr el mejor llenado posible. El material elegido se puede verter sobre la superficie y esparcirse empleando cepillos, rodillos o escobas de goma.

El ACI 224.1R-93 (1993) menciona que se pueden utilizar testigos extraídos de las fisuras para evaluar la efectividad de su llenado y medir la profundidad de penetración del sellador.

Llenado con mortero: Las fisuras anchas son posibles de reparar llenándolas con mortero de cemento portland, con baja relación agua-cemento a fin de maximizar la resistencia y minimizar la retracción, siendo incluso efectivo para detener las fugas de agua, pero sin unir estructuralmente las secciones fisuradas.

En este caso el procedimiento consiste en limpiar el concreto que exista en las caras de la fisura, instalar boquillas de mortero a intervalos sobre la fisura, sellarla utilizando pintura cementicia, sellador o mortero, lavar la fisura para limpiarla y probar el sellado; para luego llenar toda el área con mortero. Una vez que la fisura ha sido llenada se debería mantener la presión durante varios minutos para asegurar una buena penetración.

También es posible hacer uso de un mortero químico, el cual consiste en una solución de dos o más productos químicos (como por ejemplo uretanos, silicatos de sodio y acrilomidas) que se combinan para formar un gel, un precipitado sólido o una espuma. Con esta clase de mortero se han llenado fisuras de hasta 0,05 mm, y teniendo incluso como ventaja la capacidad de aplicarlo en ambientes húmedos. Por otro lado, tiene como desventajas el elevado grado de capacitación necesario para emplearlo satisfactoriamente y una falta de resistencia.

Colocación de mortero como mezcla seca (Drypacking): Este método consiste en la colocación manual de mortero de bajo contenido de agua y su posterior apisonado. Antes de colocar el mortero como mezcla seca se debe ensanchar la zona adyacente a la superficie hasta tener una ranura de alrededor de 25 mm de ancho y 25 mm de profundidad, donde sea ligeramente más ancha en la base que en la superficie.

Esta mezcla de mortero se puede emplear para llenar surcos angostos con el fin de reparar fisuras inactivas (sin movimiento), y no es un método aconsejable para llenar o reparar fisuras activas (con movimiento).

Para realizar este tipo de reparación se debe iniciar con la limpieza y secado de la ranura, aplicando seguidamente una capa de adherencia consistente en una lechada

cementicia o cantidades iguales de cemento y arena fina que al añadirle agua se logre tener la consistencia de una pasta fluida, o un compuesto adherente adecuado a base de látex (ASTM C1059, 2021).

Este mortero seco se debe colocar de forma inmediata después del adherente, en capas de alrededor de 10 mm de espesor, compactando cada capa utilizando una varilla y cada capa se debe rayar para facilitar su adherencia con la siguiente (No es necesario que haya tiempos de espera entre capas). Este mortero consiste en una parte de cemento, una a tres partes de arena pasando el tamiz de 1,18 mm y apenas agua suficiente para que el mortero se ligue.

Impregnación con polímero: Al calentar los monómeros, estos se unen entre sí, o polimerizan, creando un plástico tenaz, resistente y durable que mejora en gran medida varias de las propiedades del concreto. El monómero más utilizado es el metacrilato de metilo, ya que como el resto de monómeros adecuados, posee diversos grados de volatilidad, toxicidad e inflamabilidad, y no es apto para ser mezclado con agua; tiene muy baja viscosidad y penetra el concreto seco llenando las fisuras como lo haría el agua.

Si una superficie de concreto fisurado se seca, esta se inunda con el monómero y se polimeriza, con ello algunas fisuras se llenarán y quedarán estructuralmente reparadas; sin embargo, si estas contienen humedad el monómero no logrará empapar el concreto en cada una de sus fisuras, y, por lo tanto, la reparación no logrará darse.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO

Después de la ejecución de los ensayos, tanto destructivos como no destructivos, se obtuvo una serie de resultados que se presentarán a continuación, esto para cada uno de los taludes seleccionados.

5.1 Talud 1: Tarbaca

En la Figura 41 se tiene una descripción visual de la condición actual del talud de Tarbaca, cuyo tratamiento se realizó en el año 2006, donde se evidencia la presencia de materia orgánica sobre toda la superficie. Al mismo tiempo se observa la zona del talud de la cual se extrajeron los tres núcleos de concreto.



Figura 41. Zona ensayada del Talud de Tarbaca

El siguiente cuadro, Cuadro 15, muestra el resumen de los resultados obtenidos que caracterizan el concreto del talud analizado.

Cuadro 15. Resumen de resultados obtenidos junto con sus respectivos valores a cumplir

Aspectos del concreto	Resultados obtenidos	Valores a cumplir	Error (%)
Espesor de capa mínima encontrada (mm)	72,15	100	27,9
Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)	198,7	250	20,5
Absorción promedio (%)	12,2	6 a 9	35,6
Densidad promedio (Mg/m³)	1,9	2,23 a 2,39	14,8
Vacíos promedio (%)	22,9	14 a 17	34,7
Avance de carbonatación (%)	43,2	0	43,2

5.1.1 Ejecución de ensayos destructivos

En cuanto a los ensayos destructivos ejecutados, se inició con la extracción de núcleos de concreto, seguidamente con la falla de los mismos, y terminando con la determinación de la densidad, porosidad y vacíos de la muestra junto con su análisis petrográfico.

- **Extracción de núcleos**

Para la ejecución de este ensayo se requirió de equipo y personal especial; tal y como se observa en la Figura 42 es necesario contar con una máquina extractora, con bronca de punta de diamante, la cual se debe colocar de forma perpendicular sobre la superficie que va a ser perforada. Ya al ser capaz de anclar el equipo sobre la estructura, se procedió con la extracción de tres núcleos en diferentes zonas de la masa de concreto (Figura 43), perforaciones que fueron rellenadas con mortero autonivelante para así causar el menor afecto sobre la obra.



Figura 42. Colocación de la máquina extractora de forma perpendicular a la superficie



Figura 43. Primer núcleo extraído a 0,98 metros de la base, Segundo núcleo extraído a 1,35 metros de la base y Tercer núcleo extraído a 1,51 metros de la base, respectivamente

En los puntos de extracción de los núcleos se esperaba encontrar, según las características de diseño recopiladas inicialmente, espesores de cubierta de concreto de al menos 100 mm; sin embargo, al lograr medir los especímenes obtenidos se observó que el espesor iba de entre 75 mm a 100 mm, esto tal y como se observa en Cuadro 16.

Cuadro 16. Dimensiones de los tres núcleos extraídos

Núcleo	Diámetro	Altura
<i>Primer Núcleo</i>	99,75 mm	72,15 mm
<i>Segundo Núcleo</i>	99,75 mm	98,60 mm
<i>Tercer Núcleo</i>	99,75 mm	100,49 mm

Posterior a la extracción, tal y como se había indicado, se procedió a sellar los sitios de muestreo. Las condiciones finales del talud después del sellado se muestran en la Figura 44.



Figura 44. Sellado del segundo, primer y tercer núcleo, respectivamente

Respecto a los ensayos a realizar, uno de los testigos fue tomado para determinar la resistencia a la compresión.

- **Compresión uniaxial**

Para este ensayo se utilizó el tercer núcleo extraído ya que era el de mayor longitud. Después de su extracción, se procedió a cortar los extremos del núcleo para cumplir con la planicidad requerida según las normas. Antes de ser fallado se tomaron dos mediciones de diámetro y dos de altura. En el Cuadro 17 se tiene la información general del núcleo fallado, donde las alturas ahí presentes son después de cortado. Es importante aclarar que las alturas del cuadro siguiente son mucho mayores a las presentadas en el Cuadro 16 debido

a que en él se tomó en cuenta la masa total del concreto extraído, mientras que el anterior es menor debido a que se descartó la parte de concreto que pertenecía al sello inicial, para lograr hacer la comparación ya que este no es parte del diseño del lanzado de 100 mm.

Cuadro 17. Información del núcleo utilizado para el ensayo de compresión uniaxial

Fecha de extracción	7-may-21
Fecha de corte	8-may-21
Fecha de falla	17-may-21
Diámetro 1 (mm)	99,78
Diámetro 2 (mm)	99,71
Altura 1 (mm)	133,51
Altura 2 (mm)	133,57
Carga de Falla (kN)	160,9
Carga de Falla Corregida (kN)	152,3
Carga de Falla Corregida (kg/cm²)	198,7
Tipo de Falla	5

Los datos utilizados para obtener la carga de falla corregida se observan en el Cuadro 18 presentado a continuación.

Cuadro 18. Carga de falla corregida con su información requerida

Diámetro Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Relación L/D	Factor de Corrección	Carga de Falla Corregida (kN)
99,75	133,54	1,34	0,9464	152,3



Figura 45. Núcleo colocado en la máquina de compresión, junto con su modo de falla

- **Densidad, absorción de agua y vacíos en el concreto**

Para este ensayo uno de los núcleos extraídos fue dividido en dos porciones, cada una de más de 800 g como dicta la norma ASTM C642-13. A continuación se observan las muestras de concreto ensayadas y los resultados de ambas.



Figura 46. Muestras de concreto a ser ensayadas

Cuadro 19. Resultados del ensayo en la primera y segunda porción de concreto

Resultados Muestra 1 y Muestra 2 de concreto	M1	M2	Promedio
Masa de muestra inicial, g:	999,6	812,6	906,1
Masa de muestra seca al horno, al aire (A), g:	919,4	730,4	824,9
Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión (B), g:	1022,4	820,7	921,6
Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición (C), g:	1027,0	822,7	924,9
Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición (D), g:	544,1	427,5	485,8
Absorción después de inmersión, %:	11,2	12,4	11,8
Absorción después de inmersión y ebullición, %:	11,7	12,6	12,2
Densidad seca bruta, Mg/m³:	1,9	1,8	1,9
Densidad bruta después de inmersión, Mg/m³:	2,1	2,1	2,1
Densidad bruta después de inmersión y ebullición, Mg/m³:	2,1	2,1	2,1
Densidad aparente, Mg/m³:	2,4	2,4	2,4
Volumen de vacíos, %:	22,3	23,4	22,9

- **Análisis petrográfico**

El análisis petrográfico realizado por la ECG - UCR indica los siguientes hallazgos:

- No se observan patologías en los contactos agregado-pasta.
- Presenta materiales potencialmente reactivos en forma de clastos volcánicos con texturas hipocristalinas (parte vidrio y parte cristales), para que suceda la reacción álcali-sílice (Figura 47).
- El agregado está compuesto principalmente por clastos andesíticos (composición intermedia en contenido de sílice) con matrices con vidrio, esto en alrededor de un 2%.
- Presencia de cristaloclastos potencialmente perjudiciales como calcita y olivino alterado en un 20%, involucrados en las reacciones álcali-carbonato (Figura 48).
- Alteración en el agregado, representado por bordes color café oscuro e isótopos.

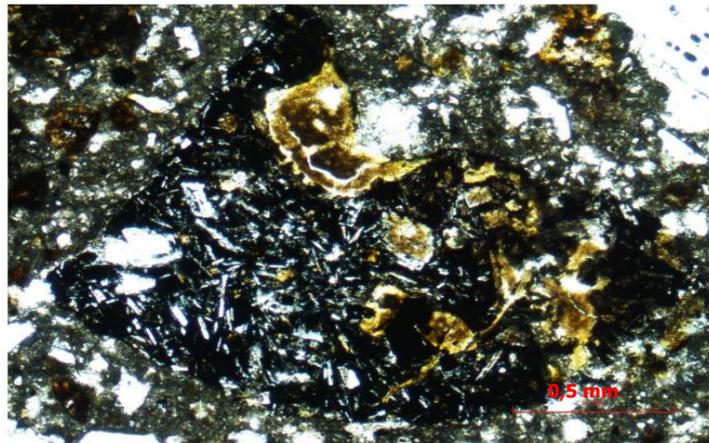


Figura 47. Clasto hipocristalino con calcedonia en textura amigdaloida bajo polarización paralela

Fuente: Lücke (2021)

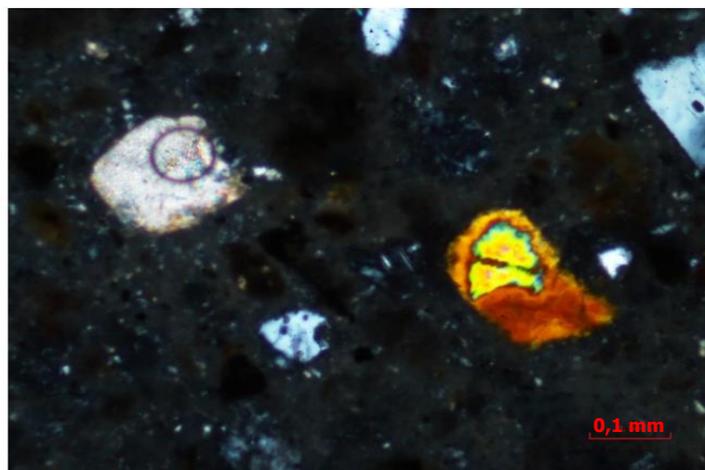


Figura 48. Cristales de calcita y olivino alterado bajo polarización cruzada.

Fuente: Lücke (2021)

En la Figura 47 se puede observar parte de la composición de la muestra del concreto del talud de Tarbaca; y según la Figura 31, Lozano (2005) indica que la calcedonia es un mineral potencialmente nocivo reaccionando con los álcalis del cemento, pero como ya se mencionó, ninguna reacción se ha dado después de 15 años de colocación. La textura amigdaloida presentada, según Barrientos (2012-2013), se refiere a cavidades resultado de la expansión de gases y, más tarde, rellenas por diversos minerales. Mientras que como se observa en la Figura 48, y según la Dirección General de Desarrollo Minero (2020), la calcita es uno de los carbonatos más comunes de encontrarse, siendo entonces un potencial reactivo álcali-carbonato.

5.1.2 Ejecución de ensayos no destructivos

Paralelamente a los ensayos destructivos se ejecutaron ensayos no destructivos sobre el concreto, el uso del esclerómetro, la determinación de la profundidad de carbonatación y la observación de las fisuras y daños presentes, todo esto ejecutado en el campo.

- **Esclerómetro**

Para ejecutar este ensayo se eligieron y lijaron tres puntos diferentes a lo largo de la superficie del concreto lanzado (Figura 49). A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada sección.

Cuadro 20. Resultados obtenidos al utilizar el esclerómetro, en tres secciones del talud

Rebote		
Sección 1	Sección 2	Sección 3
33	33	29
31	35	35
35	32	32
30	34	37
31	32	37
32	31	40
34	33	34
32	34	34
35	36	36
34	33	35
Promedio de Rebote		
33	33	35
Promedio de Rebote sin desviaciones		
33	33	35
Resistencia (kg/cm²)		
210	210	238

En las tres secciones el ángulo de aplicación fue de 45°. Al comparar los valores con el obtenido del ensayo de compresión simple, se registran desviaciones del orden indicado en el Cuadro 21. Los errores obtenidos están muy por debajo del que este equipo suele presentar.

Cuadro 21. Relación entre el esfuerzo a compresión obtenido por el esclerómetro y el obtenido por la falla a compresión

Sección	Relación	Error
Sección 1	1,06	6%
Sección 2	1,06	6%
Sección 3	1,20	20%

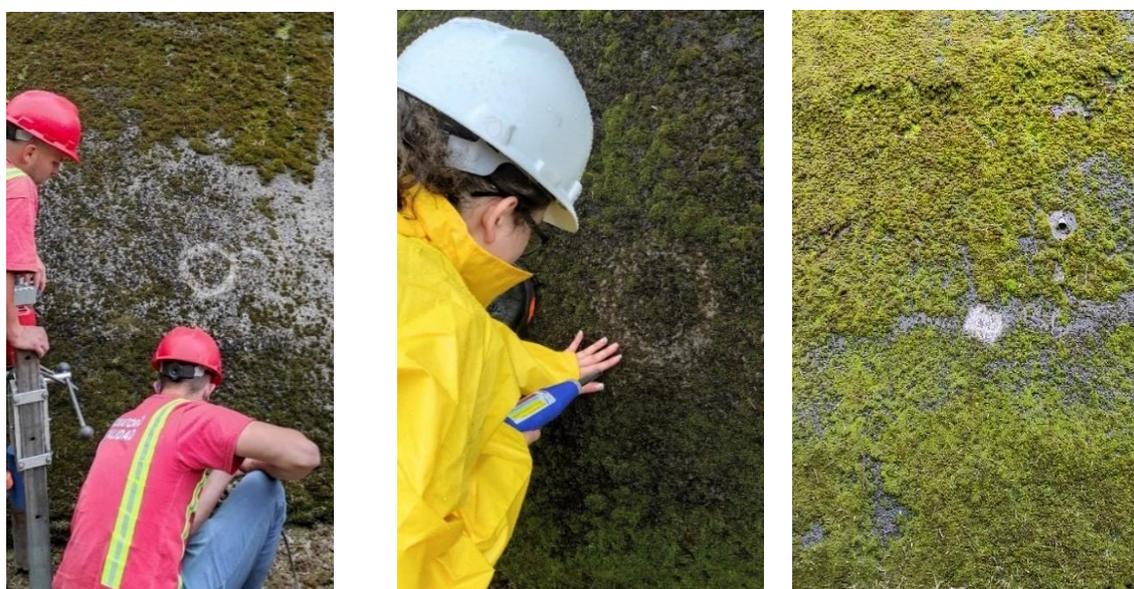


Figura 49. Secciones donde se utilizó el esclerómetro

- **Carbonatación por medio de fenolftaleína**

En el primer núcleo se encontró una carbonatación de alrededor de 19 mm en la parte más profunda, y de 12 mm en la menos profunda; fue posible determinar que la carbonatación se encuentra a alrededor de 25 mm de la malla electrosoldada. Para el caso del segundo núcleo se determinó una profundidad de carbonatación de 21 mm en la parte más profunda, y de 3 mm en la menos profunda; la malla electrosoldada se encuentra a unos 40 mm desde la zona más profunda de carbonatación. El núcleo tres, por su parte, demostró que su carbonatación llega ya a los 33 mm desde la superficie, siendo la menor profundidad de 10 mm; para este testigo, la malla electrosoldada se encuentra nuevamente

a alrededor de 40 mm desde la zona más profunda de carbonatación. En la figura siguiente se puede observar la coloración morada en los tres núcleos de concreto.



Figura 50. Reacción de la fenolftaleína en el primer, segundo y tercer núcleo extraído, respectivamente.

Cuadro 22. Información requerida, por espécimen, para determinar el tiempo aproximado en el que la carbonatación llegará al acero

Espécímenes	X_{CO2} (mm)	V_{CO2} (mm/año^{1/2})	X_{recubrimiento} (mm)	T (años)	Espesor afectado (%)
Espécimen 1	19	4,91	25	26	43,2
Espécimen 2	21	5,42	40	54	34,4
Espécimen 3	33	8,52	40	22	45,2

En el Cuadro 22 se observa un resumen de la información utilizada para conocer el tiempo aproximado en el que la carbonatación avanzará tanto que llegará a alcanzar la malla electrosoldada. Dado que para el tercer núcleo se obtuvo el tiempo en años menor, será con esta información que se ejemplifique el procedimiento seguido para obtener el tiempo en que la carbonatación podría llegar a suceder.

Datos: $X_{CO_2} = 33 \text{ mm}$; $T = 15 \text{ años}$

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

$$33 \text{ mm} = V_{CO_2} \sqrt{15}$$

$$V_{CO_2} = 8,52 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Al conocer que faltan 40 mm para que la carbonatación llegue hasta donde se encuentra el acero, es necesario determinar cuántos años le tomará a la carbonatación llegar hasta él, de la siguiente manera:

$$X_{recubrimiento} = V_{CO2} \sqrt{T}$$
$$40 \text{ mm} = 8,52 \text{ mm/año}^{1/2} \sqrt{T}$$
$$T \approx 22 \text{ años}$$

Para este caso la carbonatación ya ha alcanzado un 45,2 % del espesor del núcleo antes de llegar al acero, y como se observa, según el resultado, podrían pasar cerca de 22 años para que la carbonatación llegue hasta el acero; situación crítica para el buen funcionamiento de la estructura.

- **Control de fisuras**

Para el caso de este talud se encontraron fisuras cerca de los bordes del tratamiento mismo, mas no en el resto del cuerpo. Fue posible encontrar aberturas desde 0,7 mm hasta algunas de 2,0 cm y 3,5 cm tal y como se observa en la Figura 51. Esta situación pudo haber sido provocada por diferentes situaciones, entre ellas las presiones de hinchamiento en el suelo sobre el concreto debido al mal control de las aguas (dependerá del tipo de suelo), podría ser también causada por deslizamientos internos de masas de suelo que deforman la estructura de concreto y generan las fisuras por el sobreesfuerzo, por alteraciones dinámicas que sobre pasaban el esfuerzo de diseño o inclusive por la combinación de todas. Aunado a ello, se aprecia el crecimiento de raíces y de más materia orgánica la cual se ha venido abriendo paso por entre las fisuras y se ha esparcido sobre la superficie del talud.



Figura 51. Fisuras de diferentes aberturas, con material orgánico

Del mismo modo fue posible apreciar en los extremos del talud el desprendimiento y quebradura de material, esto se aprecia en la Figura 52. En la zona se aprecia un espesor de capa mucho menor al diseño original, siendo esto culpa del mal control de calidad en la ejecución del lanzamiento del concreto, y si a esto se suma el sufrir alguna o varias de las situaciones ya mencionadas da como resultado la fisuración excesiva que concluye en desprendimiento de bloques.



Figura 52. Desprendimiento y quebradura de material

Por último, en la Figura 53, se observa un lavado de material que implica que el concreto ya no se encuentra en contacto directo con el suelo, esto pudo haber sido la consecuencia de una perturbación en el suelo durante el proceso constructivo o pudo darse con el paso del tiempo por un mal manejo de las aguas en la corona al no haberse construido una cuneta revestida para su canalización. De igual manera se observa un recubrimiento menor del que debería, producto del mal control de calidad en el lanzamiento y en la carbonatación ya presente.



Figura 53. Lavado de material en el extremo superior del talud

5.2 Talud 2: Guayabal

En la Figura 54 se tiene una fotografía que muestra la condición actual del talud de Guayabal, donde se procedió a ejecutar la extracción de los núcleos de concreto.



Figura 54. Sección del talud ubicado en Guayabal de Heredia

El resumen de resultados encontrados que caracterizan el concreto del talud analizado, después de ejecutar los ensayos destructivos y no destructivos, se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Resumen de resultados obtenidos junto con sus respectivos valores a cumplir

Aspectos del concreto	Resultados obtenidos	Valores a cumplir	Error (%)
Espesor de capa mínima encontrada (mm)	93,72	80	0
Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)	235	210	0
Absorción máxima (%)	11,6	6 a 9	28,9
Densidad promedio (Mg/m³)	2,1	2,23 a 2,39	5,8
Vacíos máximos (%)	22,1	14 a 17	30
Avance de carbonatación (%)	66,7	0	66,7

5.2.1 Ejecución de ensayos destructivos

Para este segundo talud se repite el proceso de los ensayos destructivos ejecutados, iniciando con la extracción de núcleos de concreto, continuando con su falla, y terminando con la determinación de la densidad, porosidad y vacíos de la muestra junto con su análisis petrográfico.

- **Extracción de núcleos**

Nuevamente, como en el caso del talud de Tarbaca, se colocó la extractora en posición horizontal a la superficie, Figura 55, se procedió con la obtención de tres testigos y se finalizó con el sellado de los agujeros dejados (Figura 56 y Figura 57, respectivamente).



Figura 55. Colocación de la máquina extractora de forma perpendicular a la superficie



Figura 56. Primer núcleo extraído a 1,60 metros de la base a 8,70 metros desde el punto 0+000 m, Segundo núcleo extraído a 1,20 metros de la base a 79,34 metros desde el punto 0+000 m y Tercer núcleo extraído a 1,20 metros de la base a 145,00 metros desde el punto 0+000 m

Para este talud el tratamiento esperado debía tener 80 mm de espesor, ya que los tres núcleos fueron extraídos en la parte inferior del talud. En el Cuadro 24 se puede observar los espesores encontrados en cada punto de extracción.

Cuadro 24. Dimensiones de los tres núcleos extraídos

Núcleo	Diámetro	Altura
<i>Primer Núcleo</i>	99,40 mm	235,33 mm
<i>Segundo Núcleo</i>	99,40 mm	123,62 mm
<i>Tercer Núcleo</i>	99,40 mm	min 93,72 mm/ máx 120,58 mm



Figura 57. Sellado de los tres núcleos extraídos

- **Compresión uniaxial**

Para este ensayo se utilizó el primer núcleo extraído ya que era el de mayor longitud. Después de su extracción, se procedió a cortar los extremos para cumplir con la planicidad requerida según las normas.



Figura 58. Medición del núcleo a fallar, ya cortado, por medio de un vernier

Antes de ser fallado se tomaron dos mediciones de diámetro y dos de altura; esto y el resto de información general del núcleo fallado se observan en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Información del núcleo utilizado para el ensayo de compresión uniaxial

Fecha de extracción	4 de junio de 2021
Fecha de corte	5 de junio de 2021
Fecha de falla	15 de junio de 2021
Diámetro 1 (mm)	99,40
Diámetro 2 (mm)	99,40
Altura 1 (mm)	187,00
Altura 2 (mm)	186,00
Carga de Falla (kN)	179,2
Carga de Falla Corregida (kN)	179,2
Carga de Falla Corregida (kg/cm²)	235,0
Tipo de Falla	5

En el Cuadro 26 siguiente se observan los datos utilizados para obtener la carga de falla corregida.

Cuadro 26. Carga de falla corregida y su información requerida

Diámetro Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Relación L/D	Factor de Corrección	Carga de Falla Corregida (kN)
99,40	186,50	1,88	No requerido	179,2



Figura 59. Núcleo colocado en la máquina de compresión, junto con su modo de falla

- **Densidad, absorción de agua y vacíos en el concreto**

Para este ensayo uno de los núcleos extraídos fue dividido en dos porciones, cada una de más de 800 g como dicta la norma ASTM C642-13. A continuación se presentan los resultados de las dos fracciones.

Cuadro 27. Resultados del ensayo en la primera y segunda porción de concreto

Resultados Muestra 1 y Muestra 2 de concreto	M1	M2	Promedio
Masa de muestra inicial, g:	977,2	1034,8	1006,0
Masa de muestra seca al horno, al aire (A), g:	934,8	939,6	937,2
Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión (B), g:	994,5	1044,7	1019,6
Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición (C), g:	996,2	1048,5	1022,4
Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición (D), g:	565,5	554,7	560,1
Absorción después de inmersión, %:	6,4	11,2	8,8
Absorción después de inmersión y ebullición, %:	6,6	11,6	9,1
Densidad seca bruta, Mg/m³:	2,2	1,9	2,1
Densidad bruta después de inmersión, Mg/m³:	2,3	2,1	2,2
Densidad bruta después de inmersión y ebullición, Mg/m³:	2,3	2,1	2,2
Densidad aparente, Mg/m³:	2,5	2,4	2,5
Volumen de vacíos, %:	14,3	22,1	18,2

- **Análisis petrográfico**

Según el informe del análisis petrográfico realizado se tiene:

- No se observan patologías en los contactos agregado-pasta.
- Se presentan materiales potencialmente reactivos, que podrían desarrollar patologías relacionadas con el deterioro del agregado, en forma de cuarzo microcristalino (sílice cristalizada) del cual se tiene presencia de un 2 % (Figura 60), clastos de material volcánico vítreo (participantes en la reacción álcali-sílice) con menos de 1 % de aparición así como clastos con otras texturas hipocristalinas (composición de vidrio y cristales) con hasta un 20% de presencia con un porcentaje de vidrio menor.
- No se observan indicios de minerales en el agregado que indiquen composiciones ricas en álcalis.
- El agregado está compuesto en su mayoría por clastos andesíticos, cerca de 20 % (composición intermedia en contenido de sílice).

- Se tiene presencia de óxidos/hidróxidos de hierro (limonita: comúnmente Goethita y hematita) producto de la alteración en clastos con indicios de alteración hidrotermal, que sugiere un proceso de alteración en la fuente del agregado (Figura 61).

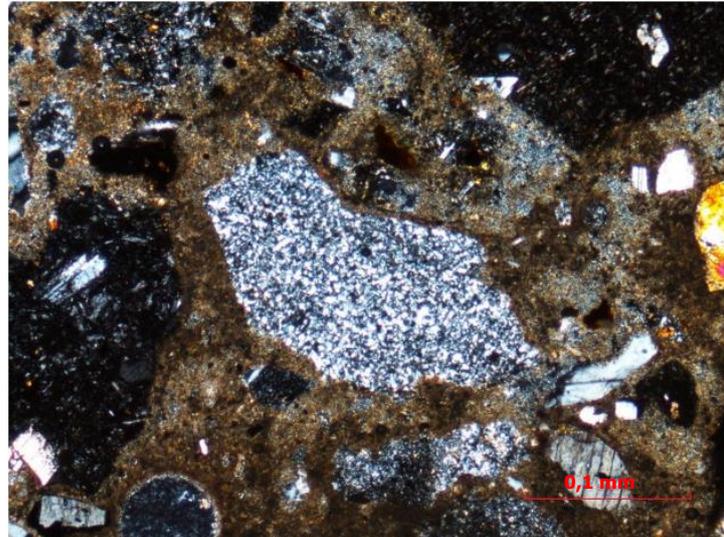


Figura 60. Clasto de cuarzo microcristalino bajo polarización cruzada
Fuente: Lücke (2021)

Según Lozano (2005) y según la norma ASTM C295/C295M (2019), el cuarzo microcristalino, indicado en la Figura 60, es un mineral compuesto de sílice que se enlista entre los componentes reactivos para que suceda la reacción álcali- sílice con la pasta de cemento, junto al cuarzo se presentan también en el concreto del talud de Guayabal, clastos volcánicos vítreos que comparten el mismo potencial reactivo. En la Figura 61, y como ya se mencionó, la limonita es la alteración de minerales que contienen hierro; donde el proceso hidrotermal se genera al tener agua a una temperatura mayor que la ambiental.

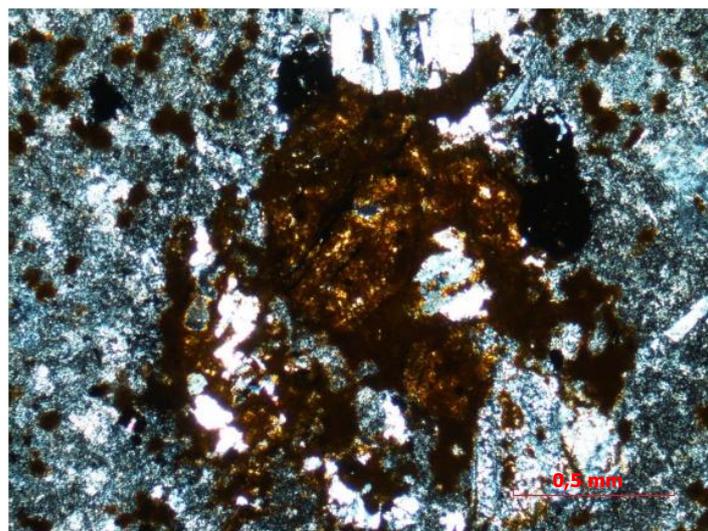


Figura 61. Óxidos/hidróxidos de hierro en el agregado bajo polarización cruzada
Fuente: Lücke (2021)

5.2.2 Ejecución de ensayos no destructivos

- **Esclerómetro**

Para ejecutar este ensayo se eligieron y lijaron tres puntos diferentes a lo largo de la superficie del concreto lanzado. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada sección.

Cuadro 28. Resultados obtenidos al utilizar el esclerómetro en tres secciones diferentes del talud

Rebote		
Sección 1	Sección 2	Sección 3
38	38	38
39	40	34
37	42	36
36	41	34
35	40	37
34	37	39
38	37	36
40	39	38
41	36	40
39	38	37
Promedio de Rebote		
38	39	37
Promedio de Rebote sin desviaciones		
38	39	37
Resistencia (kg/cm²)		
280	340	310

En la primera sección el ángulo utilizado para el impacto fue de 45°, mientras que para las dos secciones siguientes fue de 0°. Al comparar los valores anteriores con el obtenido del ensayo de compresión simple se determinaron desviaciones indicadas en el Cuadro 29. El error de la primera y tercera sección está por debajo del error que este equipo suele presentar, mientras que en la sección dos el error se iguala al límite superior usual del esclerómetro según la literatura.

Cuadro 29. Relación entre el esfuerzo a compresión obtenido por el esclerómetro y el obtenido por la falla a compresión

Sección	Relación	Error
Sección 1	1,19	19%
Sección 2	1,45	45%
Sección 3	1,32	32%

- **Carbonatación por medio de fenolftaleína**

En el primer núcleo se encontró una carbonatación de alrededor de 17 mm en la parte más profunda, y de 5 mm en la menos profunda. Fue posible determinar que la carbonatación se encuentra a alrededor de 45 mm de la malla electrosoldada. Para el caso del segundo núcleo se determinó una profundidad de carbonatación de 34 mm en la parte más profunda, y de 13 mm en la menos profunda. La carbonatación mayor, tal y como se observa en la Figura 62, es un frente singular de profundidad. La malla electrosoldada se encuentra a unos 17 mm desde la zona más profunda de carbonatación. Por último, el núcleo tres demostró que su carbonatación llega ya a los 24 mm desde la superficie, siendo la menor profundidad de 12 mm. En este último testigo, la malla electrosoldada se encuentra a alrededor de 30 mm desde la zona más profunda de carbonatación. En la Figura 62 se puede observar la coloración morada en los tres núcleos de concreto.

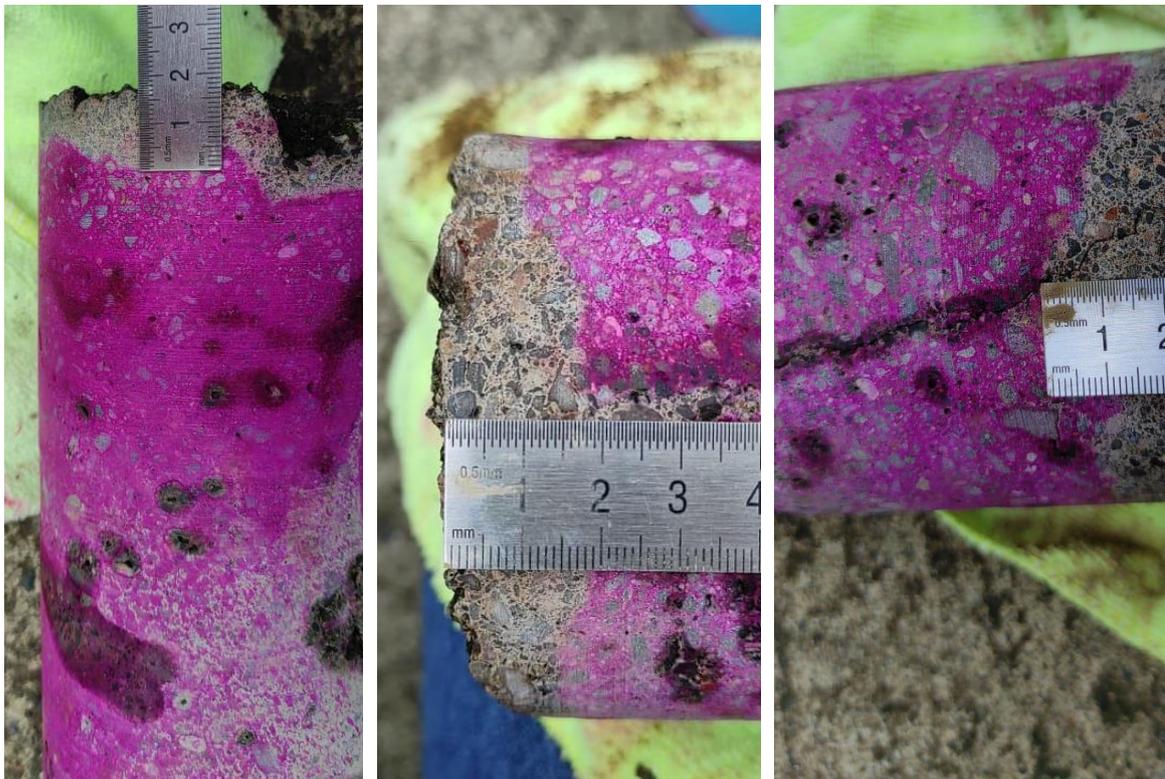


Figura 62. Reacción de la fenolftaleína en el primer, segundo y tercer núcleo extraído, respectivamente

En el Cuadro 30 se resume la información que se utilizó para conocer el tiempo aproximado en el que la carbonatación avanzará de tal forma que alcanzará la malla electrosoldada. Se determina que esta situación, en la zona donde se obtuvo el segundo núcleo, está a cerca de dos años de suceder, por lo que será con esta información que se ejemplifique el procedimiento seguido para obtener este tiempo.

Cuadro 30. Información requerida, por espécimen, para determinar el tiempo aproximado en el que la carbonatación llegará al acero

Especímenes	X_{CO2} (mm)	V_{CO2} (mm/año^{1/2})	X_{recubrimiento} (mm)	T (años)	Espesor afectado (%)
Espécimen 1	17	6,43	45	49	27,4
Espécimen 2	34	12,85	17	1,77	66,7
Espécimen 3	24	9,07	30	11	44,4

Datos: $X_{CO_2} = 34 \text{ mm}$, $T = 7 \text{ años}$

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

$$34 \text{ mm} = V_{CO_2} \sqrt{7 \text{ años}}$$

$$V_{CO_2} = 12,85 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Al conocer que faltan 17 mm para que la carbonatación llegue hasta donde se encuentra el acero, es necesario determinar cuántos años le tomará a la carbonatación llegar hasta él, de la siguiente manera:

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

$$17 \text{ mm} = 12,85 \text{ mm/año}^{1/2} \sqrt{T}$$

$$T \approx 1,77 \text{ años}$$

Para este núcleo se determina que la carbonatación ha avanzado un 66,7 % del recubrimiento que protege el acero. Como ya se mencionó, la ecuación concluye que la velocidad de carbonatación es tan alta que en menos de 2 años la patología podría cubrir toda la protección del acero, lo que sería perjudicial para la estructura.

- **Control de fisuras**

Este talud no presenta fisuras en su estructura, pero sí se observa una separación entre el concreto y el suelo de donde está creciendo materia orgánica, esto se muestra en la Figura 63. De la misma forma que para el talud de Tarbaca, este lavado del suelo puede ser la consecuencia de un mal manejo de las aguas. El suelo no debe quedar expuesto, y para ello se debió ejecutar una excavación hacia lo interno del terreno, que de igual forma sería rellenado con concreto lanzado, para confinar la estructura y así para evitar esta situación.



Figura 63. Suelo lavado en un extremo del talud

La situación que se presenta en la estructura del concreto, Figura 64, se observó en los núcleos extraídos. Cerca del centro de los testigos tomados se observa una disgregación del material, esto podría estar asociado a algún lavado de la pasta por parte de excesos de agua o humedad o inclusive por problemas en el control de calidad a la hora de lanzar diferentes capas de concreto.



Figura 64. Problemas en el interior del concreto

5.3 Talud 3: LANAMME

En la Figura 65 se tiene una descripción visual de la condición actual del talud de LANAMME, donde se procedió a ejecutar la extracción de los núcleos de concreto. En él se observa el crecimiento de materia orgánica proveniente de la corona pero que baja por la superficie de concreto.



Figura 65. Talud a ensayar localizado en el LANAMME

En el Cuadro 31 siguiente se resumen los resultados obtenidos después de ejecutar los ensayos destructivos y no destructivos, que caracterizan el concreto del talud analizado.

Cuadro 31. Resumen de resultados obtenidos junto con sus respectivos valores a cumplir

Aspectos del concreto	Resultados obtenidos	Valores a cumplir	Error (%)
Espesor de capa encontrada (mm)	mín 63,73 máx 99,13	120	mín 46,9 máx 17,4
Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)	159,3	210	24,1
Absorción (%)	5,4	6 a 9	10
Densidad (Mg/m³)	2,2	2,23 a 2,39	1,3
Vacíos (%)	11,9	14 a 17	15
Avance de carbonatación (%)	12,7	0	12,7

5.3.1 Ejecución de ensayos destructivos

El proceso mencionado se volvió a repetir para el caso de este tercer talud, el cual implicó iniciar con la extracción de núcleos de concreto, continuar con su falla, y terminar con la determinación de la densidad, porosidad y vacíos de la muestra junto con su análisis petrográfico.

- **Extracción de núcleos**

Tal y como sucedió para los dos taludes anteriores, se colocó la extractora en posición horizontal a la superficie, siendo en la Figura 64 donde se puede observar este paso; nuevamente se seleccionaron tres zonas de donde se extrajeron los núcleos del concreto lanzado, requerido para analizar, estos tres agujeros se pueden apreciar en la Figura 67. Por último y de suma importancia, se finalizó con el sellado de los orificios (Figura 68) haciendo uso de un mortero autonivelante que permitiera dejar la menor seña de intervención en la estructura.



Figura 66. Proceso de extracción de los núcleos



Figura 67. Primer núcleo extraído a 1,00 metros de la base a 5,00 metros desde el punto 0+000 m, Segundo núcleo extraído a 1,50 metros de la base a 11,46 metros desde el punto 0+000 m y Tercer núcleo extraído a 1,35 metros de la base a 17,70 metros desde el punto 0+000 m

Para este talud se esperaba encontrar un espesor de capa de concreto de 120 mm, sin embargo, resultó ser mucho menor según los núcleos extraídos de los cuales se observan sus dimensiones en el Cuadro 32.

Cuadro 32. Dimensiones de los tres núcleos extraídos

Núcleo	Diámetro	Altura
<i>Primer Núcleo</i>	69,70 mm	min 85,37 mm/máx 97,50 mm
<i>Segundo Núcleo</i>	69,70 mm	min 63,73 mm/máx 78,08 mm
<i>Tercer Núcleo</i>	69,70 mm	99,13 mm

Las condiciones del talud una vez sellados los agujeros se puede observar en la Figura 68.
Sellado de los núcleos extraídos



Figura 68. Sellado de los núcleos extraídos

- **Compresión uniaxial**

Para este ensayo se utilizó el tercer núcleo extraído ya que era el de mayor longitud. Después de su extracción, se procedió a cortar los extremos del núcleo para cumplir con la planicidad requerida según las normas. Antes de ser fallado se tomaron dos mediciones de diámetro y dos de altura después del corte. Esto y el resto de información general del núcleo fallado se observan en el Cuadro 33.

Cuadro 33. Información del núcleo utilizado para el ensayo de compresión uniaxial

Fecha de extracción	7 de julio de 2021
Fecha de corte	9 de julio de 2021
Fecha de falla	19 de julio de 2021
Diámetro 1 (mm)	69,62
Diámetro 2 (mm)	69,72
Altura 1 (mm)	93,40
Altura 2 (mm)	92,36
Carga de Falla (kN)	63,5
Carga de Falla Corregida (kN)	59,7
Carga de Falla Corregida (kg/cm²)	159,3
Tipo de Falla	Figura 69

Cuadro 34. Información requerida para la obtención de la carga de falla corregida

Diámetro Promedio (mm)	Altura Promedio (mm)	Relación L/D	Factor de Corrección	Carga de Falla Corregida (kN)
69,67	92,88	1,33	0,94	59,7



Figura 69. Núcleo colocado en la máquina de compresión, junto con su modo de falla

- **Densidad, absorción de agua y vacíos en el concreto**

Para este ensayo no fue posible dividir ninguno de los núcleos extraídos, ni fue capaz de lograrse el peso mínimo de 800 g como dicta la norma ASTM C642-13, dado que por el espesor de la capa lanzada se debió utilizar una broca de 3 pulgadas, disminuyendo el tamaño y peso del testigo, pero a pesar de ello el núcleo cumple con el volumen mínimo requerido por la norma de 350 cm³. En el Cuadro 35 se presentan los resultados de la única

fracción ensayada, mientras que la obtención del volumen mínimo requerido se observa a continuación.

$$Volumen\ del\ cilindro = \pi * r^2 * h = \pi * 3,48^2 * 9,29 = 353,27\ cm^3$$

Cuadro 35. Resultados del ensayo de la porción de concreto

Masa de muestra inicial, g:	795,6
Masa de muestra seca al horno, al aire (A), g:	757,6
Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión (B), g:	797,9
Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición (C), g:	798,8
Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición (D), g:	453,8
Absorción después de inmersión, %:	5,3
Absorción después de inmersión y ebullición, %:	5,4
Densidad seca bruta, Mg/m³:	2,2
Densidad bruta después de inmersión, Mg/m³:	2,3
Densidad bruta después de inmersión y ebullición, Mg/m³:	2,3
Densidad aparente, Mg/m³:	2,5
Volumen de vacíos, %:	11,9

- **Análisis petrográfico**

Según el informe del análisis petrográfico se tienen los siguientes hallazgos:

- No se observan patologías en los contactos agregado-pasta, ni tampoco bordes birrefringentes ni presencia de geles isótropos.
- Presenta clastos de material potencialmente reactivo, cerca de un 5%, en forma de cuarzo microcristalino (sílice cristalizada) y clastos volcánicos vítreos (participantes en la reacción álcali-sílice) como se observa en la Figura 71.
- El agregado está compuesto principalmente por clastos andesíticos, 49 %, (composición intermedia en contenido de sílice) con matrices con vidrio y basálticos (composición baja en contenido de sílice) holocristalinas.
- Se observan factores que podrían desarrollar patologías relacionadas con el deterioro del agregado; esto a manera de óxidos/hidróxidos de hierro (limonita: comúnmente Goethita y hematita).

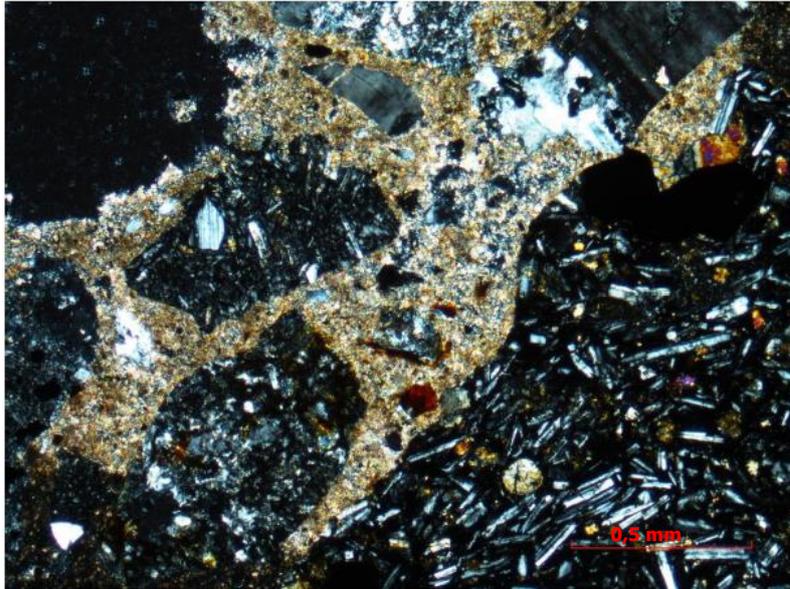


Figura 70. Detalle de agregado y pasta bajo polarización cruzada
Fuente: Lücke (2021)

De la misma manera que para el caso del talud de Guayabal, en este matriz se presentaron cuarzo microcristalino, junto con clastos volcánicos vítreos que, según Lozano (2005) y la norma ASTM C295/C295M (2019), comparten potencial reactivo para activar una reacción álcali-sílice. Para este caso, según el informe de la ECG-CR, se presenta también calcedonia, mineral de origen hidrotermal que Lozano (2005) enlista como reactivo. Nuevamente, como en el caso del talud de Guayabal, hay presencia de limonita, alteración de minerales que contienen hierro. Esta similitud puede responder al hecho de que ambos taludes fueron construidos por la misma empresa geotecnista.

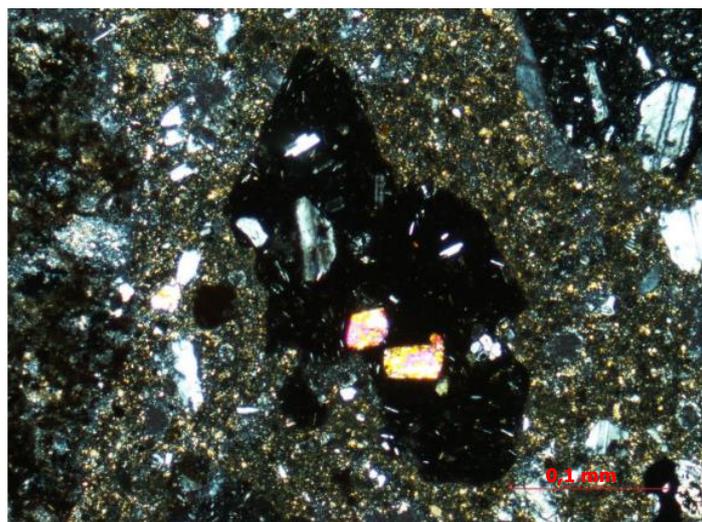


Figura 71. Clasto hipocristalino bajo polarización cruzada
Fuente: Lücke (2021)

5.3.2 Ejecución de ensayos no destructivos

- **Esclerómetro**

Nuevamente, se decidió realizar el ensayo en tres puntos diferentes del talud, estos fueron realizados cerca de cada uno de los puntos donde se extrajo un núcleo. En el Cuadro 36 se presentan los resultados obtenidos para cada sección.

Cuadro 36. Resultados obtenidos al utilizar el esclerómetro en tres secciones diferentes del talud

Rebote		
Sección 1	Sección 2	Sección 3
42	36	44
46	36	38
40	38	44
38	44	45
36	38	42
40	36	42
42	40	40
44	34	40
40	34	42
40	44	42
Promedio de Rebote		
41	38	42
Promedio de Rebote sin desviaciones		
41	38	42
Resistencia (kg/cm²)		
330	280	345

En las tres secciones se hizo uso el martillo en una posición de 45°. Al comparar los valores del esclerómetro contra el obtenido del ensayo de compresión simple se registran desviaciones observables en el Cuadro 37. Los tres porcentajes de error calculados sobrepasan en gran medida los valores usuales de error del equipo, se esperaba máximo un error de 45 %, sin embargo, estos llegaron hasta casi un 120 %. Este gran error podría deberse al esclerómetro en sí, a la preparación de la zona de ensayo, a la forma de aplicar el rebote, o inclusive podría existir el problema en el núcleo extraído que se falló por compresión simple, donde este podría no ser representativo del resto de la estructura, o pudo haber afectado el no utilizar retenedores de almohadillas del tamaño exacto del núcleo, ya que solo se contaba con retenedores de 4 pulgadas (101,6 mm).

Cuadro 37. Relación entre el esfuerzo a compresión obtenido por el esclerómetro y el obtenido por la falla a compresión

Sección	Relación	Error
Sección 1	2,07	107%
Sección 2	1,76	76%
Sección 3	2,17	117%

- **Carbonatación por medio de fenolftaleína**

Para este talud se pudo observar que la carbonatación está poco desarrollada. En el primer núcleo se encontró una carbonatación de alrededor de 7 mm en la parte más profunda, y de 2 mm en la zona menos profunda. La malla electrosoldada se encuentra a unos 48 mm desde la zona más profunda de carbonatación. Para el caso del segundo núcleo se determinó una profundidad de carbonatación de apenas 2 mm en la parte más profunda, e inclusive se observaron zonas donde del todo no existe. Alrededor de 46 mm son los que separan la malla electrosoldada de la zona más profunda de carbonatación. Nuevamente como el caso anterior, el núcleo tres demostró que su carbonatación máxima llega a unos 4 mm desde la superficie, y existen otras zonas donde ésta todavía no se ha presentado. La malla electrosoldada está a alrededor de 54 mm desde la zona de carbonatación más profunda. De la misma manera que para los casos anteriores, en la figura siguiente se puede observar la coloración morada en los tres núcleos de concreto.



Figura 72. Reacción de la fenolftaleína en el primer, segundo y tercer núcleo extraído, respectivamente

La información resumida que se utilizó para conocer el tiempo aproximado en el que la carbonatación alcanzará la malla electrosoldada se presenta en el Cuadro 38.

Cuadro 38. Información requerida, por espécimen, para determinar el tiempo aproximado en el que la carbonatación llegará al acero

Especímenes	X_{CO2} (mm)	V_{CO2} (mm/año^{1/2})	X_{recubrimiento} (mm)	T (años)	Espesor afectado (%)
Espécimen 1	7	2,21	48	471	12,7
Espécimen 2	2	0,63	46	5000	4,17
Espécimen 3	4	1,26	54	1800	6,90

Para este caso, la formula indica que ninguno de los núcleos está en peligro de tener problemas de carbonatación a futuro ya que debido a su avance tan lento podrían pasar casi 500 años en que la patología alcance el acero. Se utilizará la información del primer núcleo extraído para mostrar como se calculó estas edades. Para este mismo núcleo la carbonatación ha alcanzado un 12,7 % del espesor del núcleo antes de llegar al acero.

Datos: $X_{CO_2} = 7 \text{ mm}$, $T = 10 \text{ años}$

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

$$7 \text{ mm} = V_{CO_2} \sqrt{10}$$

$$V_{CO_2} = 2,21 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Al conocer que faltan 48 mm para que la carbonatación llegue hasta donde se encuentra el acero, es necesario determinar cuántos años le tomará a la carbonatación llegar hasta él, de la siguiente manera:

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

$$48 \text{ mm} = 2,21 \sqrt{T}$$

$$T \approx 471 \text{ años}$$

Igualmente es importante recordar que la formula considera que la velocidad de carbonatación se mantendrá siempre igual, que no habrá cambios significativos en el ambiente o en la estructura que podrían acelerar la patología. Es por ello que se debe mantener un control de los cambios que puedan ocurrir y darle un buen mantenimiento al talud para que la condición continúe como hasta ahora.

- **Control de fisuras**

En el cuerpo del talud no se observan fisuras, pero si se logra apreciar desprendimiento de material y resquebrajamiento en los bordes del mismo. Tanto en la Figura 73 como en la Figura 74 se aprecia claramente que la pantalla de concreto, que debería cumplir con el espesor de diseño de 12 cm, es sumamente delgada, dando a entender que se hizo una degradación de la capa en el momento del lanzamiento; nuevamente esto es un reflejo de una mala práctica constructiva y se debió haber procedido con un confinamiento tal y como se mencionó en la Figura 63 para el talud de Guayabal. Aunado a ello, en la primera imagen se aprecia claramente la presencia de un problema con la vegetación, ya que las raíces presentes están generando un daño excesivo en la estructura al serle fácil penetrar el espesor del concreto, problema que requiere de control.

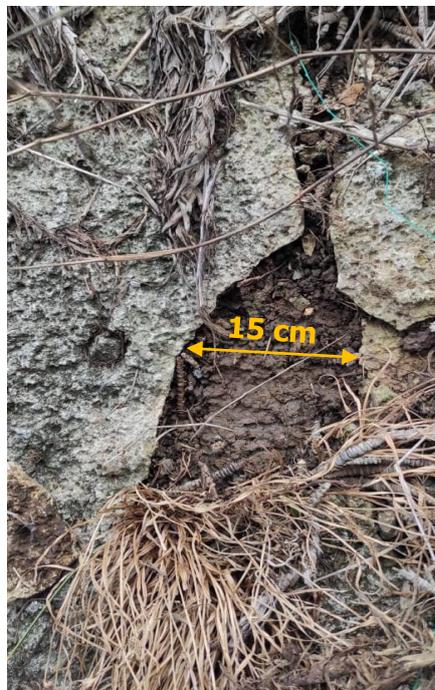


Figura 73. Desprendimiento de concreto y presencia de materia orgánica



Figura 74. Desprendimiento de material en la base del talud

5.4 Resultados generales

De los ensayos ejecutados anteriormente también fue posible obtener resultados que se observan de mejor manera en forma general como se presenta a continuación.

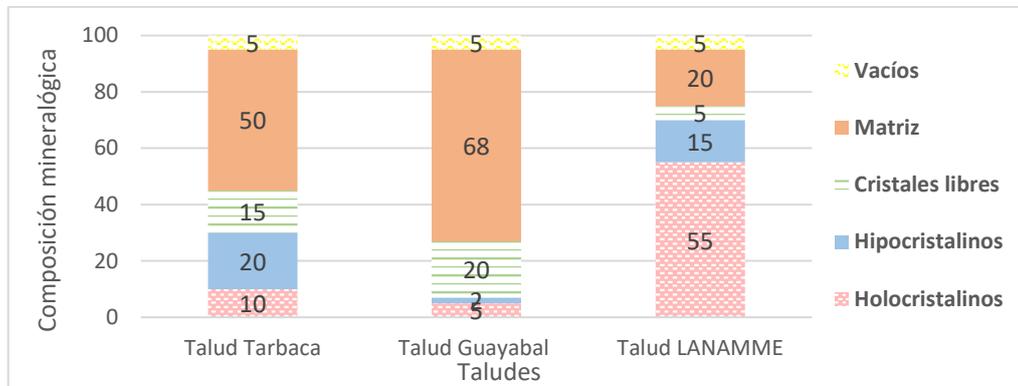


Figura 75. Composición mineralógica de las láminas delgadas para los taludes de estudio
Fuente: Elaboración propia con datos de Lücke (2021)

Al analizar la información representando en la Figura 75 se puede concluir que no es posible correlacionar los porcentajes de vacíos presentes en las láminas delgadas, con los porcentajes de vacíos obtenidos por medio del ensayo estándar para la densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido; ya que para el primer caso los vacíos se obtienen después de un análisis microscópico, mientras que en el segundo caso es a nivel macroscópico. Sin embargo, para el caso del talud de Guayabal, sí es posible correlacionar su cumplimiento de esfuerzo a la compresión, según diseño, con el gran porcentaje de pasta de cemento que conforma la lámina; y para el caso del talud de LANAMME se puede determinar que el bajo resultado de su resistencia a la compresión está relacionado con el poco porcentaje de matriz que conforma la lámina.

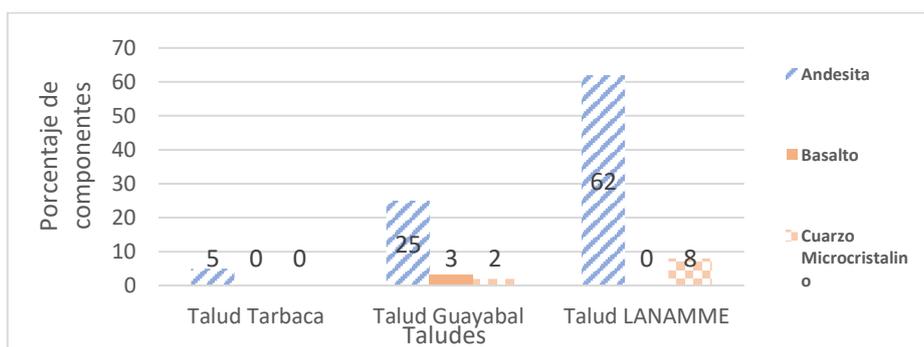


Figura 76. Porcentaje de componentes mineralógicos en las láminas delgadas para los taludes de estudio
Fuente: Elaboración propia con datos de Lücke (2021)

Según Calvo (2008) se requiere al menos un 73 % de Silicio en el agregado para que este sea considerado reactivo, situación que, al observar la Figura 76, se confirma que no se cumple para ninguno de los taludes estudiados.

6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS TALUDES ESTUDIADOS

Para realizar la evaluación de desempeño de los tres taludes se va a proceder con una evaluación multicriterio, para la que es necesario elegir variables explicativas de las que se haya obtenido información, en este caso, cuantitativa, que representen su condición actual. Para cada variable elegida, aplicando el método de la Ordenación Simple (Aznar y Guijarro, 2012), se debe distribuir una puntuación, del 1 al 100 que complete en total los 100 puntos (pts) máximos a alcanzar por talud, según su nivel de importancia en el desempeño del concreto; esto con ayuda y criterio de expertos. Según análisis proveniente de criterio experto en el tema de taludes, el potencial reactivo es el factor más determinante en la calidad de un concreto ya que este afecta directamente su capacidad estructural, seguido por la resistencia a la compresión que deba cumplir el concreto; el resto de variables, según su pericia, tienen un peso muy similar entre ellos en cuanto a su repercusión en los daños que se puedan generar en una obra.

Las variables y sus puntuaciones son las siguientes:

- Espesor de capa (5 pts)
- Resistencia a la compresión (20 pts)
- Absorción del concreto (10 pts)
- Densidad del concreto (15 pts)
- Vacíos del concreto (10 pts)
- Potencial Reactivo (30 pts)
- Carbonatación (10 pts)

A cada variable anterior, según los datos propios de cada talud, se le asigna un peso elegido según el criterio que mejor se adapte a la información y datos recopilados (Cuadro 39). Estos pesos asignados dependen del porcentaje de error que haya entre el resultado obtenido de los ensayos contra el valor a cumplir según diseño o normativa.

Cuadro 39. Puntaje a otorgar a cada criterio según su porcentaje de error

Porcentaje de error	Pesos
0% - 20%	5
21% - 40%	4
41% - 60%	3
61% - 80%	2
81% - 100%	1
Mayor a 100%	0

En el Cuadro 40 se presenta una matriz donde ya fue asignado el peso según los porcentajes de error que se pueden observar en el Cuadro 15 para el talud de Tarbaca, en el Cuadro 23 para el talud de Guayabal y en el Cuadro 31 para el talud de LANAMME. En la Figura 77, Figura 78 y Figura 79 se puede observar gráficamente el comportamiento de cada talud según los pesos que reflejan su rango de porcentaje de error.

Cuadro 40. Pesos asignados a cada criterio según los porcentajes de error de los resultados de ensayo obtenidos en cada talud

Variables	Espesor de capa	Resistencia a la compresión	Absorción	Densidad	Vacíos	Potencial Reactivo	Carbonatación
Talud Tarbaca	4	4	4	5	4	4	3
Talud Guayabal	5	5	4	5	4	4	2
Talud LANAMME	3	4	5	5	5	4	5



Figura 77. Comparación de los pesos según variables, Talud de Tarbaca



Figura 78. Comparación de los pesos según variables, Talud de Guayabal

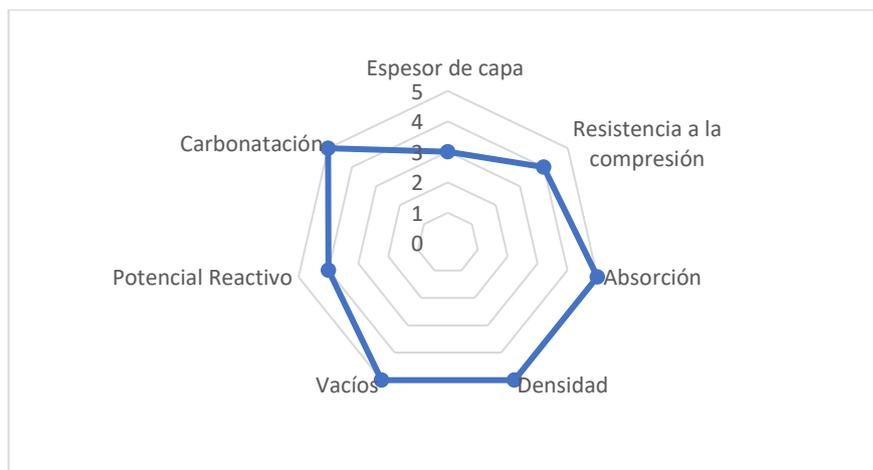


Figura 79. Comparación de los pesos según variables, Talud de LANAMME

Si se observa la Figura 77, la Figura 78 y la Figura 79 se ha utilizado gráficos de araña que resumen los pesos ya asignados en el Cuadro 40, para su mejor entendimiento. Se observa entonces que, el talud de Tarbaca se ha deteriorado de una manera muy gradual, con excepción de la carbonatación que lo ha hecho más velozmente. En el caso del talud de Guayabal se encuentra en muy buenas condiciones a excepción de su carbonatación, la cual ha avanzado muy fuertemente hasta alcanzar porcentajes de error mayor al 61 %. Caso contrario, el talud de Lanamme cuenta con peso perfecto para la carbonatación y tres variables más, pero es el caso de espesor de capa el que afectó su evaluación de desempeño.

Se decidió dar un peso de 4, porcentajes de error de entre 21 % a 40 %, en los tres taludes para la variable potencial reactivo, ya que no existe presencia de reacciones entre el agregado y la pasta de cemento, para ningún caso, pero se castiga el hecho de que existe la posibilidad de que se llegue a dar al contener materiales propensos a ello. En el Cuadro 41 se observa como se procedió a realizar una normalización para asegurar la buena distribución de los pesos.

Cuadro 41. Normalización de los pesos asignados por criterio a cada talud

Variables	Espesor de capa	Resistencia a la compresión	Absorción	Densidad	Vacíos	Potencial Reactivo	Carbonatación
Talud Tarbaca	0,30	0,33	0,30	0,33	0,30	0,33	0,33
Talud Guayabal	0,40	0,33	0,30	0,33	0,30	0,33	0,22
Talud LANAMME	0,30	0,33	0,40	0,33	0,40	0,33	0,44
Suma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Después de indicar el peso de cada resultado para cada variable, donde 5 es el peso máximo que representan porcentajes de error muy bajos y 0 el peso mínimo que castiga los porcentajes de error muy elevados, se debe proceder a ponderar la valoración dada inicialmente según cada peso, estas ponderaciones se observan en el Cuadro 42, donde se tiene que, si a una variable se le da un peso de 5, esta obtendrá el puntaje total de la valoración.

Cuadro 42. Distribución de la valoración de cada criterio según el peso asignado

Variables	Valoración (pts)	Pesos					
		0	1	2	3	4	5
Espesor de capa	5	0	1	2	3	4	5
Resistencia a la compresión	20	0	4	8	12	16	20
Absorción	10	0	2	4	6	8	10
Densidad	15	0	3	6	9	12	15
Vacíos	10	0	2	4	6	8	10
Potencial Reactivo	30	0	6	12	18	24	30
Carbonatación	10	0	2	4	6	8	10
Sumatoria	100 pts	-	-	-	-	-	-

Haciendo uso de las ponderaciones del cuadro anterior y de los pesos ya asignados en el Cuadro 40 se logra llegar a la valoración de cada talud según los porcentajes de error de sus resultados y según la importancia de cada variable. En el Cuadro 43 se observan las valoraciones y es solo necesario sumarlas para obtener con ello la nota final de cada talud, siendo el valor máximo posible de obtener un 100 y el valor mínimo de 0.

Cuadro 43. Valoración asignada a cada criterio

Variables	Espesor de capa	Resistencia a la compresión	Absorción	Densidad	Vacíos	Potencial Reactivo	Carbonatación
Talud Tarbaca	3	16	8	15	8	24	6
Talud Guayabal	5	20	8	15	8	24	4
Talud LANAMME	3	16	10	15	10	24	10

Al sumar las valoraciones de cada criterio para los tres taludes se obtiene la nota final asignada a ellos, tal y como se observa a continuación:

Cuadro 44. Nota obtenida por cada talud al sumar sus valoraciones asignadas según la condición de cada criterio evaluado

Taludes	NOTA FINAL
Talud Tarbaca	80
Talud Guayabal	84
Talud LANAMME	88

En la figura siguiente se puede observar de mejor manera la sumatoria de puntajes que permitieron que cada talud obtuviera una nota final; en ella se puede distinguir los factores que aumentaron o disminuyeron este valor.

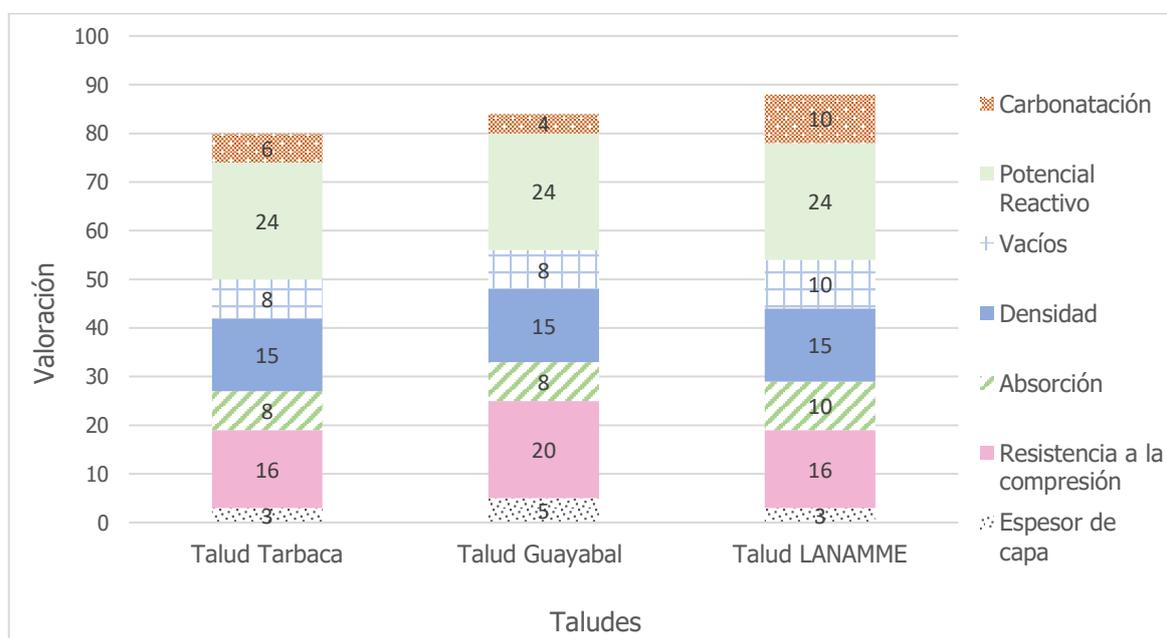


Figura 80. Valoración de cada Talud en análisis según las variables consideradas

Al analizar los resultados obtenidos de la evaluación multicriterio se observa que el talud de Tarbaca tiene una condición muy homogénea en cuanto sus variables, ya que cinco de las siete variables obtuvieron porcentajes de error dentro del rango de 21 % a 40 %. Es solo el caso de la carbonatación que obtuvo un porcentaje de error un tanto mayor, llegando a ser de alrededor de 43 %, siendo esta la variable que genera un declive en la calificación final dada al talud.

La zona donde se ubica no tiene ni fuerte flujo vehicular ni industrias, por lo que se podría suponer que la presencia de CO₂ no es uno de las razones de la carbonatación. La humedad relativa suele ser de 92 % por lo que los poros se bloquean y evitan que el CO₂

circundante entre en ellos. Esto implica que, de no ser por la alta absorción del concreto y el alto porcentaje de vacíos en el talud, el avance de la carbonatación sería más lento.

Haciendo uso de la ley de Fick de la difusión y los resultados encontrados después de ejecutar los ensayos, este podría sufrir daños en el acero en aproximadamente 22 años. Esto implica que el avance en la carbonatación no ha sido tan acelerado ya que de esto darse, la vida útil promedio de un talud de 50 años disminuiría para esta situación a 37 años. De aplicarse medidas correctivas que ralenticen esta patología se podría aumentar el tiempo de servicio de la obra.

Después de analizar el ensayo petrográfico, se encontraron, en el talud de Tarbaca, componentes reactivos álcali-sílice tales como calcedonia, andesitas y sílice, esto según los minerales que enlistan Chao et al. (2017) y el ensayo ASTM C295/C295M (2019). El que no exista hasta ahora indicios de reacción álcali-agregado implica un impacto positivo en la estabilidad físico química y en la durabilidad del concreto; esto igual para las pantallas de concreto de los otros dos taludes (LANAMME y Guayabal).

Se tienen porcentajes de error, para los tres taludes, de entre 0 % a 24 % al comparar sus resistencias a la compresión determinadas por ensayo contra su diseño original; esto significa que esta variable influye positivamente sobre la resistencia de estos concretos.

Por otra parte, al analizar el talud de Guayabal se tiene que de las siete variables es la carbonatación que arroja peores resultados. El fuerte avance de esta patología puede ser consecuencia de la ubicación del talud. Se encuentra cerca del centro de ciudad de Heredia, en una zona con gran cantidad de tránsito vehicular, implicando esto una fuerte acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera dado los gases expulsados por los mismos. Aunado a lo anterior, el alto porcentaje de vacíos dentro de la masa de concreto (cerca de 22 %) y el que la humedad relativa en Heredia sea en ocasiones de 65 %, son factores que propician el avance de la carbonatación.

En este caso, al utilizar la ley de Fick, el talud podría sufrir daños en el acero en aproximadamente 2 años, situación importante a tomar en cuenta a la hora de intervenir el talud para evitar generar un debilitamiento de la estructura. Si esto llegara a suceder la vida útil promedio de un talud de 50 años disminuiría para esta situación a 12 años. Esta situación genera un impacto negativo en la durabilidad del concreto, al disminuir el pH del concreto y permitir un posible daño en el acero, esto según Moreno et al. (2000). Es importante recalcar que fue un frente singular el que presenta esta profundidad de

carbonatación, y que inclusive de carbonatarse esta zona en los próximos 2 años, no implica un daño inmediato o inminente en el acero de refuerzo.

Según el ensayo petrográfico para este talud existe presencia de oxidación en los agregados, la cual no ha generado efecto o daños en la pasta de cemento. Esta situación sugiere una alteración en la fuente de agregados utilizada. Para este talud también se encontraron componentes reactivos álcali-sílice tales como cuarzo microcristalino, vidrios volcánicos, andesitas y sílice, nuevamente según los minerales enlistados por Chao et al. (2017) y en el ensayo ASTM C295/C295M (2019).

De las siete variables evaluadas del talud de LANAMME, cinco de ellas presentan porcentajes de error bastante bajos, y dos de ellos apenas llegan a presentar cerca de un 25 % de error. El factor clave que disminuyó la puntuación final obtenida por el talud fue el espesor de capa, ya que uno de los núcleos extraídos presentaba una forma irregular, teniendo un espesor mucho menor en una zona específica.

Esta disminución de espesor con relación al diseño original puede tener deferentes atribuciones, primeramente, pudo haber sido un problema en la colocación y en el mal control de calidad, pero también podría darse por la abrasión atribuida al efecto del viento cargado de partículas sólidas sobre la superficie, al desgaste dado por el flujo de agua sobre la superficie o inclusive por un alto contenido de CO₂ en el ambiente. La situación del desgaste no significa un problema estructural, pero si puede producir vulnerabilidad en las estructuras ante el ataque otros agentes como agresión química, lixiviación, corrosión, etc; todo esto según Barrera (2017).

Contrario a los otros taludes, este presenta un avance lento de carbonatación en la capa de concreto, lo que puede deberse a el alto contenido de humedad en la zona (alrededor de 88 %) y al bajo porcentaje de vacíos presentes dentro de la mezcla (11,9 %).

Por último, para este talud, después del análisis petrográfico se encontraron componentes reactivos álcali-sílice tales como calcedonia, cuarzo microcristalino, vidrios volcánicos, andesitas y sílice, igualmente según lo enumerado por Chao et al. (2017) y el ensayo ASTM C295/C295M (2019).

De forma general, se observa que para el caso de la variable densidad, los tres taludes obtuvieron la calificación máxima en este rubro, implicando que el desfase que hay entre el valor real y el que debería cumplir según normativa es relativamente bajo.

Por otro lado, la porosidad es uno de los principales factores que propician la carbonatación en el concreto. Tanto el talud de Tarbaca como el Talud de Heredia presentan vacíos de entre 22 % y 23 %, pudiendo ser este una de las razones del fuerte avance de esta patología sobre su superficie de concreto ya que los poros funcionan como un camino para el avance del CO₂.

Adicionalmente, la humedad relativa en Tarbaca y en San Pedro suelen ser mayores a 70 %, lo que colabora a que los poros del concreto se bloqueen y no se permita el ingreso del CO₂; caso contrario se da en algunas épocas del año en Guayabal, donde la humedad puede ser de 65 %, y en este caso el porcentaje propicia el rápido avance de la carbonatación.

Según los resultados obtenidos, no es posible correlacionar el avance de carbonatación con los resultados de compresión uniaxial, ya que, para este talud en específico, se obtuvo un 24 % menos de resistencia de la esperada; teniendo un avance de carbonatación de apenas 7 mm en su zona más afectada.

Después de este análisis fue posible conocer el desempeño que ha tenido cada capa de concreto lanzado sobre los taludes; se logró conocer cuál es su condición actual, los problemas que se les están presentando, situaciones futuras e inclusive, evaluarlo por medio de porcentajes de error y de una nota final.

En la Figura 81, mostrada a continuación, se presenta una infografía de la metodología propuesta a replicar en otros taludes a nivel nacional.

Evaluación del desempeño del concreto lanzado ya colocado en taludes, mediante ensayos destructivos y no destructivos



Figura 81. Propuesta de metodología de evaluación del desempeño para aplicar en taludes de concreto lanzado

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el proceso y una vez terminado el proyecto, fue posible encontrar una serie de conclusiones y recomendaciones para aporte del mismo, las cuales se presentan a continuación.

7.1 Conclusiones

Con base en los análisis de resultados de los ensayos realizados al concreto lanzado de los taludes evaluados en el presente proyecto, se desprenden las siguientes conclusiones:

- La metodología de evaluación utilizada es capaz de ser replicada en el resto de taludes de Costa Rica, logrando con ello dar una herramienta a la necesidad del monitoreo del concreto en obras de retención después de un tiempo de su colocación. Esto se logró después de haber realizado una exhaustiva revisión bibliográfica, con la que se eligió los ensayos más eficientes a aplicar que dieron los resultados necesarios para la evaluación del concreto lanzado ya colocado en los taludes, y con la que se eligió una cantidad mínima de ensayos apropiada a efectuar para obtener datos suficientes. Todo esto fue probado en campo para su debida comprobación y corrección.
- Después de ejecutar la evaluación del desempeño se concluye que, de forma general, los tres taludes han mantenido su funcionalidad en los años de servicio, sin embargo, es requerido analizar las variables individualmente para contrarrestar posibles situaciones negativas en la resistencia, durabilidad y estabilidad físico química a futuro; caso de la carbonatación para el talud de Tarbaca y de Guayabal, y el caso de la materia orgánica en el talud de LANAMME que afecta la capa de concreto de poco espesor.
- De un 100% de los taludes estudiados, solo un 33,3% cumple a cabalidad el valor esperado de esfuerzo a la compresión y el espesor de pantalla requerido. En el caso de talud de Tarbaca un 28,6 % de las variables estudiadas presentan porcentajes de error menores a 20 %, sin embargo, el 71,4 % restante no sobrepasa el 50 % de error. Por su parte, un 57 % de las variables estudiadas para el talud de Guayabal presentan porcentajes de error menores al 6 % y solo 14,3 % sobrepasa el 65 % de error, caso de la carbonatación. Por último, en el caso del talud de LANAMME, un 85,7 % de las variables se mantienen en menos de un 25 % de error, pero es la variable del espesor

de capa de concreto lanzado la que castiga el desempeño del mismo con un error de más del 45 %.

- Un 66,6 % de los taludes estudiados requieren intervención para disminuir el avance de la carbonatación en su capa de concreto; mientras que el 100 % de ellos precisan un mantenimiento que retire toda la capa vegetal y las raíces ya presentes.
- Todo profesional debe tener en cuenta que las estructuras de concreto interactúan con el medio ambiente circundante, por lo que su diseño no solo debe considerar aspectos de resistencia estructural, sino también las acciones químicas, físicas, mecánicas y biológicas que las pueden afectar.
- Tanto el diseño del concreto como la construcción de la obra son los factores que más pueden generar problemas a futuro en la durabilidad de una construcción, esto según Chao et al. (2017); lo que implica que la elección de agregados, de relación agua/cemento y el control de calidad que haya tenido cada talud durante su lanzamiento están repercutiendo en el desempeño del concreto actual. El poco control de calidad en los métodos y procedimientos constructivos utilizados, junto con la falta de diagnósticos oportunos y un inadecuado mantenimiento son los que general el gran avance de las patologías en el concreto, llegando incluso al punto de tener estructuras ineficientes e inseguras, respaldado por Avendaño (2006).
- En Costa Rica el mantenimiento preventivo es deficiente en la mayoría de las obras de infraestructura tanto civil como industrial. Cuando se aplica mantenimiento este suele ser del tipo correctivo, lo que trae repercusiones económicas negativas. Esta falta de mantenimiento de las obras propicia el deterioro y no permite conservar las condiciones originales de desempeño, evidenciado por la gran cantidad de materia orgánica en la superficie y bordes del concreto lanzado de los tres taludes estudiados.
- Las patologías del concreto no tienen su origen solamente en la etapa de operación, estas pueden generarse o iniciar desde la etapa de diseño, inclusive con la elección de los agregados, y construcción de la obra. Lo que implica que las patologías ya encontradas seguirán avanzando e incluso podrían aparecer nuevas.

- El deterioro del concreto, según Chao et al. (2017), se ve afectado por factores como la humedad, la temperatura, y el viento. La humedad en la atmósfera incide al presentarse ciclos de humedecimiento y secado en el concreto; la temperatura contribuye en la velocidad de las reacciones químicas, ya que se dobla la velocidad de la reacción a cada aumento de 10 °C; y los vientos generan erosión dadas las partículas que arrastran. Estos tres factores se presentan en mayor o menor medida en las tres zonas de estudio, requiriendo tomarlas en consideración si se decide intervenirlos.
- La presencia de organismos en los tres taludes, en este caso vegetal, sobre la superficie de una estructura de concreto, afecta no solo su estética, sino que produce daños físicos, mecánicos, químicos (producen sustancias como ácidos húmicos y sales producto de la descomposición vegetal) y biológicos, ya que retienen y generan humedad. De igual forma las raíces pueden penetrar y crecer dentro de los poros del concreto causando grietas por las fuerzas internas de expansión; todo esto según Avendaño (2006).

7.2 Recomendaciones

A continuación, se enlistan las recomendaciones obtenidas con la ejecución del proyecto y seguido de ellas las obtenidas de la literatura:

- Aplicar una metodología sistemática, como la propuesta en el presente proyecto, para detectar y tratar patologías cuando el proyecto se encuentra en operación; recordando que ningún ensayo es capaz de proporcionar una solución definitiva de las patologías presentes en una estructura, por lo que se debe siempre combinar métodos para generar un diagnóstico más completo, teniendo siempre en cuenta el alcance y las limitaciones de cada uno.
- Contemplar, en estudios futuros, el realizar un análisis económico para conocer el presupuesto que podría ser requerido por una empresa que quisiera implementar la metodología aquí propuesta en un talud de su posesión.
- Analizar taludes en áreas secas, con humedades relativas menores a las ya consideradas para estudiar su comportamiento y conocer si se podrían obtener resultados diferentes a los obtenidos en zonas de alta humedad.

- Brindar mantenimiento periódico a los taludes, implementado desde la construcción, realizando desde tareas simples como la limpieza de drenajes y superficies, hasta tareas más complejas como la impermeabilización y la protección de los elementos de concreto y acero. En el caso de que se requiera implementar reparaciones se recomienda generar un diagnóstico que deje en claro la condición y las necesidades de la estructura, dejar detallado el alcance, y especificar los requerimientos de los materiales, las consideraciones de aplicación, los elementos de protección temporal, las pruebas y ensayos para evaluar el desempeño y calidad.
- Ejecutar un estricto control de calidad de los materiales y de los métodos constructivos, llevando siempre un registro del control de calidad de la colocación del concreto lanzado, que logre disminuir o eliminar por completo malas prácticas constructivas que puedan significar problemas a futuro en la obra.
- Dado que en Costa Rica la composición común de los agregados a utilizar en el diseño de concreto presenta una matriz de vidrio, se recomienda ejecutar ensayos petrográficos para aceptar o rechazar fuentes de agregados según el uso que requiera dárseles. Dado este gran aporte al conocimiento y a la evaluación del desempeño se recomienda en gran medida seguir haciendo uso de este servicio por parte de la ECG - UCR y con él mejorar parte de las decisiones que se deben tomar a la hora de hacer diseños de concreto.
- De igual manera, se recomienda realizar más investigaciones y análisis sobre las propiedades a cumplir por parte del concreto endurecido, ya que a lo largo del tiempo se ha hecho mucho énfasis en las condiciones del concreto recién mezclado, pero no en su condición a futuro estando ya endurecido y en funcionamiento.
- Puede contemplarse la opción de incluir en los contenidos de los cursos de concreto y de materiales de construcción los conceptos de diseño por durabilidad, para que el estudiante conozca las patologías del concreto y metodologías básicas para la detección, tratamiento y prevención de las mismas.
- Los núcleos extraídos solo son capaces de proveer información de la zona exacta de donde fueron obtenidos, por lo que para lograr un dictamen confiable de la condición

de toda la estructura se recomienda implementar métodos que sean capaces de registrar información tanto del exterior como del interior del concreto.

- Aplicar el ensayo de método de prueba estándar para la densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido durante el control de calidad inicial que se da al lanzar el concreto sobre la superficie del talud, asegurando que cumpla desde un inicio esta condición; aunado a ello ejecutar ensayos a base de ondas electromagnéticas para detectar defectos dentro del concreto recién colocado.
- En cuanto a la evaluación del desempeño, se recomienda variar los rangos de porcentajes de error, disminuyendo el rango asignado a cada peso, y la valoración asignada a cada variable para sensibilizar los resultados finales de cada talud.
- Si se requiere encontrar más defectos estructurales en el concreto se puede hacer uso del método de Georadar, a base de ondas electromagnéticas, aplicar ondas de esfuerzo o de sonido, emplear la radiografía, ya que permite obtener imágenes del acero y defectos del concreto. Aplicar, de igual manera, ensayos de permeabilidad y porosidad en el concreto endurecido para valorar patologías asociadas a ellos.
- Dentro del planeamiento de diseño y el proceso constructivo de toda obra se debe prestar especial atención a los efectos generados por deformaciones del terreno no previstas activadas por mecanismos de presiones del agua y por actividad sísmica, o sus combinaciones. Al tomar esto en cuenta se deben considerar secciones de concreto reforzado lo suficientemente robustas para soportar estos cambios diferenciales que se pueden dar en determinado momento, evitando fisuraciones que puedan generar no solo el inicio de daños estructurales de la masa general, sino también daños puntuales en el concreto e inclusive reactivación de patologías.
- Para disminuir en gran medida el encogimiento y las grietas en diseños nuevos o para intervenciones, hacer uso de aditivos superplastificantes en el diseño de la mezcla del concreto, aumentar el tamaño máximo del agregado grueso, hacer uso de relaciones A/C máximas (0,50) y resistencias a la compresión mínimas (24 MPa) (Sánchez de Guzmán, 2002).

- El número de muestras, los lugares de muestreo y los procedimientos a utilizar en la superficie del concreto deben ser establecidos dependiendo de la uniformidad del material colocado y las necesidades de revisión que se tenga, todo esto determinado por un profesional (ACI 318S, 2014); sin embargo se recomienda hacer uso de la norma ASTM D3665 para el muestreo aleatorio, esto en caso de querer hacer una revisión general, teniendo en cuenta que una muestra de concreto puede representar la instalación de entre 8 m³ y 40 m³ (Barrera, 2017).
- Es requerido trabajar en diseños de mezcla por durabilidad y no solo por resistencia, considerando esta la exposición a la que va a estar sometida, características específicas de las estructuras, permeabilidad, recubrimiento y protección del acero de refuerzo. Al utilizar cemento que presente productos como cenizas volantes, escorias y microsílica se pueden mejorar ambas, ya que se tiene como resultado mezclas menos porosas y de mayor resistencia al ataque de cloruros y sulfatos siendo incluso una posible solución en los casos donde se ha detectado ASR (Chao et al.,2017). Para este último caso y reacciones álcali en general se recomienda impermeabilizar las superficies de concreto para atenuar la expansión cuando se dan sus primeras manifestaciones, esto según Avendaño (2006).
- Para subsanar las zonas de concreto lanzado donde hay fisuras o desprendimiento de material, e inclusive carbonatación, se recomienda picar el concreto que ya no esté en contacto con el suelo, colocar nueva malla electrosoldada que funcione como una llave entre las zonas de concreto antiguo todavía en funcionamiento utilizando pernos epóxicos (Martínez, 2011) y ya con ello ejecutado, lanzar una nueva pantalla de concreto en la zona. Después de la reparación, se debe continuar con la aplicación de recubrimientos anticarbonatación, los cuales están específicamente diseñados para detener el ingreso del dióxido de carbono (Davies y Rothwell, 1989).
- Debido a que los suelos no poseen buen drenaje y a que las estructuras de concreto no suelen encontrarse bien selladas, se llegan a tener graves problemas de filtración de agua. Para afrontar la situación se recomienda, primeramente, reparar las grietas mayores con cemento hidráulico y rellenar los poros y agujeros con masilla epoxi. De igual manera existen las opciones de utilizar aditivos con la capacidad de sellar estructuras, aplicar alquitrán en las zonas de mayor filtración o inclusive emplear pintura selladora para prevenir eventos futuros (Barrera, 2017).

- Según Do Lago (1997), se recomienda el uso de barnices incoloros de protección adecuados para superficies expuestas al intemperismo, siendo estos revestimientos hidrófugos que repelen electrostáticamente el agua, y los revestimientos impermeabilizantes con formación de película; también se puede aplicar inyecciones de lechadas impermeabilizantes en las zonas agrietadas, instalar membranas impermeables y trabajar en el redireccionamiento del flujo de agua. Con ello se puede disminuir el efecto del agua en la propagación de la carbonatación, mantener la estética del concreto, conseguir resistencia ante la foto-degradación dada la incidencia de rayos ultravioleta, y el evitar el desarrollo de hongos y bacterias en su superficie.
- Ubicar medidores de profundidad, con ayuda de un topógrafo, antes de iniciar el proceso del lanzado de concreto, esto para asegurarse que el espesor de capa diseñado se cumple en toda la superficie del talud. Se deben colocar en cuadros de 2 metros, tanto longitudinal como transversalmente, esto según dicta el MOPT (2017).
- Según se señala en la literatura consultada, Avendaño (2006), la temperatura entre 20 °C y 35 °C y la humedad relativa superior al 80 % favorecen el desarrollo de bacterias, dado que estas situaciones no son posibles de evitar se recomienda utilizar agentes biocidas como las sales de amonio, los fenoles y algunos compuestos de mercurio y estaño sobre la superficie de concreto para mitigar esta problemática.
- Dado que el talud de Tarbaca y de Guayabal presenta un problema de carbonatación, se recomienda aplicar el ensayo de impulso-respuesta, que según Chao et al. (2017), permite localizar zonas débiles y zonas de menor espesor, logrando así encontrar las zonas donde la superficie del concreto se encuentra más cercano al acero, y con ello determinar si requieren o no intervención. Mientras que para estructuras de concreto en servicio con problemas de carbonatación se recomienda, una vez realizada la reparación del concreto, colocar barreras impermeables que paralicen el ingreso de la humedad (Avendaño, 2006).

8. REFERENCIAS

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. (2015). *Soil Nail Walls Reference Manual* (7.a ed.). Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi14007.pdf>
- Ambriz, A. (2016). *Técnicas para el análisis petrográfico de agregados y concreto endurecido*. Tesis de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Geología. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México
- American Concrete Institute; ACI 116R. (2000). *Cement and Concrete Terminology*.
- American Concrete Institute; ACI 201.2R-01. (2000). *Guía para la Durabilidad del Hormigón*.
- American Concrete Institute; ACI 224. (2001). *Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón*.
- American Concrete Institute; ACI 224.1R. (1993). *Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón*.
- American Concrete Institute; ACI 318S-14. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.
- American Concrete Institute; ACI 506.2-13. (2013). *Specification for Shotcrete*.
- American Concrete Institute; ACI 506R-05. (2005). *Guide to Shotcrete*.
- American Concrete Institute; ACI 515.1R-79. (1986). *A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete*.
- Araúz, M. (s. f.). Laboratorio de Láminas Delgadas. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de <https://fgp.epn.edu.ec/index.php/lab-geo/186-laboratorio-de-laminas-delgadas>
- Asociación Costarricense de Geotecnia, (2015). *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTL)*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- ASTM C39/C39M – 20. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

- ASTM C150/C150M – 21. (2021). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C227 – 10. (2010). *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C295/C295M – 19 (2019). *Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C597-16. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C642. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C856/C856M – 20. (2020). *Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C1059/C1059M – 21. (2021). *Standard Specification for Latex Agents for Bonding Fresh to Hardened Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM C1604/C1604M – 05. (2019). *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- AVENDAÑO, E. (2006). DETECCIÓN, *Tratamiento Y Prevención De Patologías En Sistemas De Concreto Estructural Utilizados En Infraestructura Industrial*. (Licenciatura). Universidad de Costa Rica.
- Ayala, J. (2006). *Manual de Ingeniería de Taludes (Guías y Manuales)*. Instituto Geológico Y Minero De España. España.
- Aznar, J., y Guijarro, F. (2012). *Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Barrera, A. (2017). *Construcción y Tecnología en Concreto*. Revista CYT, 6(12). Recuperado de <https://www.imcyc.com/revistacyt/MARZO%202017/MARZO17.pdf>
- Barrientos, V. (2012-2013). Geología, 1º Curso, UNIDAD: III Petrología. Universidad de A Coruña. España.

- Bier, A. (1987). *Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste*. Materials Research Society Symposium, 85, pp.385 -392.
- BOE. Agencia estatal boletín oficial del Estado. (1987). *Boletín Oficial Del Estado* núm.163. Recuperado de <https://www.boe.es/boe/dias/1987/07/09/pdfs/A20911-20919.pdf>
- Bracamontes, R. (2014). *Concreto lanzado: en la industria minera*. Recuperado de <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/portada/141-concreto-lanzado-en-la-industria-minera>
- Calvo, O. (2008). *Influencia de la mineralogía de los agregados pétreos en las características de concreto*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestro en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería geotécnica, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Campos, A., Fajardo, G., y Mendoza, J. (2016, agosto). *Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado*. Distrito Federal, México: Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo.
- Canmet (Canada Centre for Mineral and Energy Technology). (1977). *Pit Slope Manual*. Minister of Supply and Services, Canada.
- Cárdenas, J. (2005). *Calidad de aguas para estudiantes de ciencias ambientales*. Bogotá D.C., Colombia. Fondo de publicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Castro, P. (1998). *Corrosión en estructuras de concreto armado*. Instituto Mexicano del Cemento y del concreto. México, D.F.
- Chao, E., González, J., Ochoa, R., y Valdés, A. (2017). *Construcción y Tecnología en Concreto*. Revista CYT, 6(12). Recuperado de <https://www.imcyc.com/revistacyt/MARZO%202017/MARZO17.pdf>
- Clará, P., Montes, R., y Morales, J. (2006). *Concreto Lanzado: Diseño De Mezcla Y Propuesta De Metodología Para El Control De Calidad* (Licenciatura). Universidad de El Salvador.

- Comisión Nacional de Emergencias. (s. f.). *Amenazas de Origen Natural Cantón de Heredia*. Recuperado julio de 2021, de https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/heredia.aspx
- Condor Projects. (2021, junio). *An Introduction to Soil Nailing*. Recuperado noviembre de 2021, de <https://www.condorprojects.co.uk/guides/soil-nailing/>
- Cordero, D. (2011). *Importancia de la Geotecnia Vial (11)*. PITRA (Programa de Ingeniería en infraestructura del transporte). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/360/11.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cozar, P. (2016). *Auscultación del hormigón lanzado como sistema de protección de taludes mediante ensayos destructivos y no destructivos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.
- Davies, H. y G.W. Rothwell, "The Effectiveness of Surface Coatings in Reducing Carbonation of Reinforced Concrete", BRE Information Paper, mayo de 1989.
- De Matteis, A. (2003). *Geología y Geotecnia: Estabilidad de taludes*. Universidad Nacional de Rosario Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
- Denyer, P. y Arias, O. (1991). *Estratigrafía de la región central de Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 12.
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2020). Perfil de mercado de la dolomita. Secretaria de Economía. México.
- Do Lago, P. (1997). *Manual de reparación, refuerzo, y protección de las estructuras de concreto*. México. Recuperado de <https://pdfcoffee.com/manual-de-reparacion-refuerzo-y-proteccion-de-las-estructuras-de-concreto-2-pdf-free.htm>
- Echandi, E. (1981). *Unidades volcánicas de la vertiente norte del río Virilla*. Licenciatura. Universidad de Costa Rica, San José.
- EUCLID GROUP TOXEMENT. (2017). *Instalación de Anclajes Adhesivos*. Colombia. Recuperado de https://www.toxement.com.co/media/3404/anclajes_adhesivos.pdf

FIB (fédération internationale du béton). (2005). *El hormigón estructural y el transcurso del tiempo*. Volumen 1 y 2. Memorias del Simposio FIB La Plata, Argentina.

Figueirôa J. P., Andrade T. (2007). *O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto. A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife*, 1ª ed., Editora Universitária UFPE, Recife, Brasil.

Folgueras, P. (s. f.). *Medidas de Dispersión*. Recuperado de <http://www.educaguia.com/apuntesde/matematicas/ESTADISTICAYPROBABILIDAD/MEDIDASDEDISPERSION.pdf>

Galán, I. (2011). *Carbonatación Del Hormigón: Combinación De CO2 Con Las Fases Hidratadas Del Cemento Y Frente De Cambio De pH*. Doctorado. Universidad Complutense De Madrid.

Geocisa, G. y. (2002). *Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura*. Madrid, España.

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).

Google (s.f.). [Vista satelital de la ubicación del talud en Guayabal, Heredia]. Recuperado el 30 de julio de 2021 de <https://www.google.com/maps/place/C.+El+Guayabal,+Heredia/@9.9913079,-84.1177268,734m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8fa0fadb7beeb7e1:0xa1501b895b9c7821!8m2!3d9.9913026!4d-84.1155381>

Google (s.f.). [Vista satelital ampliada de la ubicación del talud en Guayabal, Heredia]. Recuperado el 30 de julio de 2021 de <https://www.google.com/maps/place/C.+El+Guayabal,+Heredia/@9.9913079,-84.1177268,734m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8fa0fadb7beeb7e1:0xa1501b895b9c7821!8m2!3d9.9913026!4d-84.1155381>
<https://goo.gl/maps/4KPVMRhQxDYN9t229>

Google (s.f.). [Vista satelital de la ubicación del talud en LANAMME, San Pedro]. Recuperado el 08 de agosto de 2021 de

[https://www.google.com/maps/place/UCR,+Laboratorio+Nacional+de+Materiales+y+Modelos+Estructurales+\(LANAMME\)+-+Edificio+A/@9.9352052,-84.047445,734m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8fa0e38905fb9731:0xa0a071539d25c36f!8m2!3d9.935077!4d-84.0452589](https://www.google.com/maps/place/UCR,+Laboratorio+Nacional+de+Materiales+y+Modelos+Estructurales+(LANAMME)+-+Edificio+A/@9.9352052,-84.047445,734m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8fa0e38905fb9731:0xa0a071539d25c36f!8m2!3d9.935077!4d-84.0452589)

Google (s.f.). [Vista satelital ampliada de la ubicación del talud en LANAMME, San Pedro]. Recuperado el 08 de agosto de 2021 de [https://www.google.com/maps/place/UCR,+Laboratorio+Nacional+de+Materiales+y+Modelos+Estructurales+\(LANAMME\)+-+Edificio+A/@9.9352052,-84.047445,734m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8fa0e38905fb9731:0xa0a071539d25c36f!8m2!3d9.935077!4d-84.0452589](https://www.google.com/maps/place/UCR,+Laboratorio+Nacional+de+Materiales+y+Modelos+Estructurales+(LANAMME)+-+Edificio+A/@9.9352052,-84.047445,734m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8fa0e38905fb9731:0xa0a071539d25c36f!8m2!3d9.935077!4d-84.0452589)

Google (s.f.). [Vista satelital de la ubicación del talud en Tarbaca, San José]. Recuperado el 30 de marzo de 2021 de <https://goo.gl/maps/4KPVMRhQxDYN9t229>

Google (s.f.). [Vista satelital ampliada de la ubicación del talud en Tarbaca, San José]. Recuperado el 30 de marzo de 2021 de <https://goo.gl/maps/4KPVMRhQxDYN9t229>

Helene, P. y Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección. Ley de evolución de costos (Ley de Sitter)*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Bandeirantes Industria Gráfica. Guarulhos, Brasil.

Hernández, F. (2017). *Métodos Empleados en la Evaluación de la Calidad del Concreto Lanzado*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestro en Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma De México, México.

Herrera, W. y L.D. Gómez. (1993). *Mapa de Unidades Bióticas de Costa Rica*. Escala 1:685.000. US Fish and Wildlife Service – TNC – INCAFO – CBCCR - INBio – Fundación Gómez-Dueñas. San José.

Hofler, J. y Schlumpf, J. (2004). *Concreto Proyectado en la Construcción de Túneles: Introducción a la tecnología básica de Concreto Proyectado (2.a ed.)*. Frankfurt, Alemania: Putzmeister AG.

Houst, Y. y Wittmann F.H. (1994). *Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste*. Cement and Concrete Research.

- IMNSA Ingenieros Consultores S.A. (2013). *Contratación De Servicios De Ingeniería En Talud Calle Guayabal De Heredia* (2012CD-000296-01). San José, Costa Rica
- Inder. (2015). *PLAN DE DESARROLLO RURAL TERRITORIAL OSA-GOLFITO-CORREDORES 2015-2020*.
- Ingeotec, S.A (2010). *Diseño y construcción de las obras de estabilización del talud norte del LANAMME*. Universidad de Costa Rica (UCR)
- Ingeotec, S.A (2011). *LANAMME UCR*. Recuperado 2021, de <https://ingeotec-cr.com/project/lanamme-ucr/>
- Ingeotec, S.A (2014). *Municipalidad de Heredia -Obras de estabilización de talud en Calle Guayabal. Escala 1:200*. Diseño y construcción de obra para estabilización de talud de Calle Guayabal de Heredia.
- Ingeotec, S.A. (2014). *Suelo Cosido – Calle Guayabal*. Recuperado 2021, de <https://ingeotec-cr.com/project/suelo-cosido-calle-guayabal/>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021, 3 noviembre). *Condiciones Actuales del Tiempo en Cerro Burío, Aserrí*. Recuperado 3 de noviembre de 2021, de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionBurio.html>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021, 3 noviembre). *Condiciones Actuales del Tiempo en Ciudad Judicial, San Joaquín de Flores*. Recuperado 3 de noviembre de 2021, de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionJudicial.html>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021, 3 noviembre). *Condiciones Actuales del Tiempo en Montes de Oca, San José*. Recuperado 3 de noviembre de 2021, de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionCigefi.html>
- INTE C39. (2020). *Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto. Patrones esquemáticos de fracturas típicas*. Sexta Edición. INTECO. Costa Rica.
- INTE C64. (2017). *Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso pequeño, utilizando la máquina de Los Ángeles*. Método de ensayo. Primera Edición. INTECO. Costa Rica.

- INTE C68. (2016). *Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso*. Tercera Edición. INTECO. Costa Rica.
- INTE C69. (2016). *Determinación de la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino*. Tercera Edición. INTECO. Costa Rica.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1987). *MANUAL DE TALUDES*. 1° Ed. España: Editorial. No. 291.
- Instituto Nacional De Innovación Y Transferencia En Tecnología Agropecuaria (INTA-COSTA RICA). (2014). *Suelos De Costa Rica Orden Ultisol*. Recuperado de <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/07/00517-boletin-suelos-de-cr.pdf>
- Instituto Nacional De Innovación Y Transferencia En Tecnología Agropecuaria (INTA-COSTA RICA). (2015). *Suelos De Costa Rica Orden Andisol*. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1828.PDF>
- Instituto Nacional De Innovación Y Transferencia En Tecnología Agropecuaria (INTA-COSTA RICA). (2015). *Suelos De Costa Rica Orden Inceptisol*. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1825.PDF>
- Johnson, M. (1965). *Deterioration, Maintenance and Repair of Structures*. McGraw-Hill Book Co., Nueva York
- Julio, D. y Morales, L. (2018). *Influencia de la calidad del agua lluvia en la resistencia a compresión de morteros hidráulicos*. (Licenciatura). Universidad de la Costa.
- Khunthongkeaw, J., S. Tangtermsirikul y T. Leelawat. (2006). *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 20, pp. 744-753.
- Lee, J. y Weber, D. (1982). *Effects of Sulfuric Acid Rain on Major Cation and Sulfate Concentrations of Water Percolating Through Two Model Hardwood Forests* *Journal of Environmental Quality*. Vol 11, No 1.
- León, A. y Andueza, F. (2014). *Análisis fisicoquímico y microbiológico del agua*. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela.

- Lozano, J. (2005). *La petrografía, una herramienta de control de calidad y diagnóstico de lesiones en la industria de la construcción*. Escuela de Arquitectura y urbanismo. Universidad Nacional de Colombia.
- Lücke, O. (2021). *Descripción Petrográfica Semicuantitativa*. Laboratorio de Petrografía. Escuela Centroamericana de Geología.
- Malami, C., Kaloidas, V., Batis, G. y Kouloumbi, N. (1994). *Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures*. Cement and Concrete Research. p. 1444- 1454.
- Mehta, K. y Monteiro, P. (1993). *Concrete, microstructure, properties and materials*. Editorial McGraw-Hill Company. New York.
- Martínez, J. (2011). *Análisis del concreto lanzado como revestimiento definitivo para túneles*. (Licenciatura). Pontificia Universidad Javeriana.
- Mather, B. (1968). *Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete*. Proceedings of the Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. (2020, octubre). *Datos Generales De La Agencia De Extensión Agropecuaria De Aserrí*. Recuperado de http://www.mag.go.cr/regiones/central_sur/Caracterizacion-AEA-Aserrí.pdf
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). CR2010: *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2017). Repositorio Sección 566. *Concreto Lanzado*. Recuperado de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3629/Secci%C3%B3n%20566.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mixto Listo. (s.f.). *Concreto Lanzado*. Recuperado de <https://www.mixtolisto.com/concreto-lanzado/>
- Montani, R., (2000). *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, diciembre, México.

- Montemor M.F., M. P. Cunha, M. G. Ferreira y A. M. Simoes, (2002). *Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides*. Cement and Concrete Composites, Vol. 24, No. 1, pp. 45-53.
- Morales, R. (2015). *Muros, Taludes y Terraplenes de Suelo Reforzado: Control de erosión*. México.
- Moreno, E. (2000). *La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto*. Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 4, No. 2, pp. 43-48.
- Moreno, E. I., Domínguez, G., Cob, E., y Duarte, F. (2004). *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración*. Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 8, No. 2, pp. 117-130.
- Moreno, J.M. (1996): *Metodología Multicriterio en el Plan Nacional de Regadíos (privado)*.
- Municipalidad de San Pablo de Heredia Alcaldía Municipal. (2014). *Caracterización General del Cantón de San Pablo de Heredia*. Recuperado de <https://www.sanpablo.go.cr/wp-content/uploads/2019/10/Caracterizacion-del-Canton.pdf>
- Muñoz, F., y Mendoza, C. (2012). *La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto*. Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, 4(1). Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=361233551004>
- Neville, A. M., (2007). *Tecnología del concreto, Cemento Portland*. IMCYC, Cuarta edición, México.
- Ochoa, R. (2014). *Concreto lanzado para túneles y taludes*. Recuperado de <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/febrero2014/especial.pdf>
- Pacheco, J., y Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos (58)*. Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/35914-manual-metodologico-evaluacion-multicriterio-programas-proyectos>

- Parrot, L. J., (1987). *A Review of Carbonation in Reinforced Concrete, Cement and Concrete Association*. Building Research Establishment
- Pérez, W. (2000). *Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 M.a.) del Valle Central de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis Lic.]
- Price, W. H., (1947). *Erosion of Concrete by Cavitation and Solids in Flowing Water*. ACI Journal, Proceedings V. 43, No. 9, Mayo, pp. 1009-1023.
- Price, W.H., (1982). *Control of Cracking During Construction*. Concrete International: Design and Construction, V. 4, No. 1.
- PSI Concreto. (2020, 13 octubre). *Concreto Lanzado: guía general de conceptos, características y proyectos innovadores*. Recuperado de <https://psiconcreto.com/concreto-lanzado-guia-general/>
- Porras, H., Cascante, M., Granados, R. y Alvarado G.E., (2012). *Volcano-estratigrafía y tectónica del Valle Central Occidental y las estribaciones de los Montes del Aguacate a lo largo de la Ruta 27*. Costa Rica. - Rev. Geol. América Central
- Rodríguez, F. (1998). *Rehabilitación de estructuras de hormigón: técnicas y sistemas*. Revista de Edificación, 28, 39–47. Recuperado de <https://dadun.unav.edu/handle/10171/17435>
- Rojas, G. (2008). *Evaluación de estructuras de concreto por corrosión*. Tecnología en Marcha, Vol. 21, N.º 4, 71.
- Rudeli, N., y Santilli, A. (2017). *Medición de resistencia a tempranas edades del hormigón: método que mejor se ajusta para la determinación de tiempos mínimos de desencofrado de elementos verticales de hormigón (22)*. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n22/0718-2805-oyp-22-0006.pdf>
- Sánchez De Guzmán, D. (2002). *Durabilidad y patología del concreto*. Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Colombia.
- Segarra, J. (2005). *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099.1/3315>

- Serrano, D. y Moreno, E. (2006). *Películas barreras: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado*. Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 10, No. 2, pp. 37-45.
- Sibaja, J. (2014). *Diagnóstico Minero 2013-2014 Región Brunca*. MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA Dirección de Geología y Minas.
- Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Primera edición: Editoriales de la U. Medellín, Colombia.
- Soto, R. y V. Jiménez. 1992. *Evaluación Ecológica Rápida, Península de Osa, Costa Rica*. Programa BOSCOA. Fundación Neotrópica – WWF. 252 pp
- Suárez, C. (2017). *Metodología para la caracterización del efecto del drenaje ácido en las rocas y en el concreto lanzado en los taludes de la Ruta Nacional No. 27 (San José – Caldera)*. Tesis de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Geología, Escuela Centroamericana de Geología, San José, Costa Rica.
- Tencio, R. (2013, marzo). *Información General de la Región Central Oriental. REGION CENTRAL ORIENTAL*. Recuperado de <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Informacion%20General%20Region%20C%20Oriental%202013.pdf>
- Terzaghi, R. D. (1949). *Concrete Deterioration Due to Carbonic Acid*. Boston Society of Civil Engineers, V. 36.
- Trejos, J. (2020). *Diseño de cuatro soluciones geotécnicas: mejoramiento de un terreno licuable mediante columnas de grava compactadas, estabilización de un talud mediante suelo cosido, diseño de pilotes apoyados en rocas blandas y mejoramiento de un terreno licuable mediante compactación dinámica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestría en Ingeniería Geotécnica, Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.
- Tuutti, K., (1982). *Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute*. Suecia.
- Ubaldo, R. (2016). *Selección del tipo de revestimiento en túneles carreteros*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Maestro en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Ugalde, K. (2015). *Alternativas para la estabilización de taludes en el cantón de León Cortés*. (Licenciatura). Instituto Tecnológico De Costa Rica.
- UNE 112011, N. E. (2011). *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. España.
- Verbeck, G. (1968). *Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete. Performance of concrete resistance of concrete to sulfate and other environmental conditions*. Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto.
- Vidaud, E. (2013). *Concreto lanzado: prospectiva*. Recuperado de <http://www.imcyc.com/revistacyt/index.php/tecnologia/87-concreto-lanzado-prospectiva>

9. APÉNDICE

Apéndice A. Informe del análisis petrográfico realizado por el Dr. Oscar H. Lücke de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA SEMICUANTITATIVA

Escuela Centroamericana de Geología

Laboratorio de Petrografía

Escuela Centroamericana de Geología Petrografía realizada por: Dr. Oscar H. Lücke

Código: Heredia 1

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura					
General	Clástica				
Matriz	Pasta de cemento				
Composición					
Componentes	Descripción cualitativa	Tamaño máximo [mm]	Tamaño promedio [mm]	% modal*	
Litoclastos (30%)	Holocristalinos	Composición basáltica con fenocristales de plagioclasa y olivino (serpentinizado) en una matriz intergranular de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos.	4,98 x 3,02	2,43 x 1,79	3%
		Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en matriz pilotaxítica de plagioclasa y opacos	2,50 x 2,30	1,52 x 0,82	5%
		Cuarzo microcristalino con inclusiones de opacos (magnetita, alterada).	2,33 x 1,36	1,32 x 0,81	2%
	Hipocristalinos	Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos en una matriz intersertal de vidrio, plagioclasa, clinopiroxeno y opacos	13,7 x 8,74	2,83 x 1,50	20%
		Escoriáceo de composición andesítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en una matriz hialopílica de vidrio y plagioclasa	2,01 x 1,05	---	<1%
Cristales libres (15%)	Plagioclasa hipidiomórfica con textura cribosa, retrabajada. Clinopiroxenos y opacos hipidiomórficos	1,16 x 0,76	0,87 x 0,44	15%	
Matriz (50%)	Cemento	Pasta con birrefringencia (0,0065) contrastante en el límite externo del núcleo	---	<0,004	5%
Vacíos (5%)		---	5,16 x 1,48	1,22 x 0,83	5%

*Porcentaje del área visual a partir de estimado semi-cuantitativo.

PASTA, CONTACTOS Y PATOLOGÍAS

La pasta muestra en la sección delgada, una zona de 9 mm de espesor con mayor birrefringencia (0,0065; amarillo del primer orden) con la parte restante de 25 mm con menor birrefringencia (0,004). Los contactos son flotantes (figura 2) tanto en los clastos como en los cristales libres. No se observan patologías en los contactos agregado-pasta, no se observan bordes birrefringentes ni presencia de geles isótropos.

MATERIALES PERJUDICIALES

Presenta clastos de material potencialmente reactivo en forma de cuarzo microcristalino (figura 3) y clastos volcánicos vítreos (matriz hialopilítica, figura 4) así como clastos con otras texturas hipocristalinas (matriz intersertal) con menor porcentaje de vidrio. El agregado está compuesto principalmente por clastos andesíticos (composición intermedia en contenido de sílice) con matrices con vidrio y basálticos (composición baja en contenido de sílice) holocristalinas. No se observan indicios de minerales en el agregado que indiquen composiciones ricas en álcalis (sanidina, piroxenos alcalinos o anfíboles alcalinos, micas).

OBSERVACIONES

La composición de los agregados es común para la región de Costa Rica con predominio de clastos de origen volcánico de composición intermedia. Estos agregados comúnmente presentan matrices con vidrio, considerado como material perjudicial. Sin embargo, no se observan indicios de reacción con la pasta. Se observan factores que potencialmente podrían desarrollar patologías relacionadas con el deterioro propiamente del agregado. Esto a manera de filosilicatos (serpentina) producto de la alteración de minerales máficos como el olivino, presente como fenocristal en los clastos basálticos (Fig. 6). Además, se observa la presencia de óxidos/hidróxidos de hierro (limonita: comúnmente Goethita y hematita; Fig. 6) producto de la alteración de opacos en clastos con indicios de alteración hidrotermal. Este tipo de alteración es consistente con la presencia de cuarzo microcristalino que sugiere un proceso de alteración en la fuente del agregado.

MICROFOTOGRAFÍAS



Figura 1.1: Textura general y componentes de la muestra Heredia-1 bajo polarización paralela.

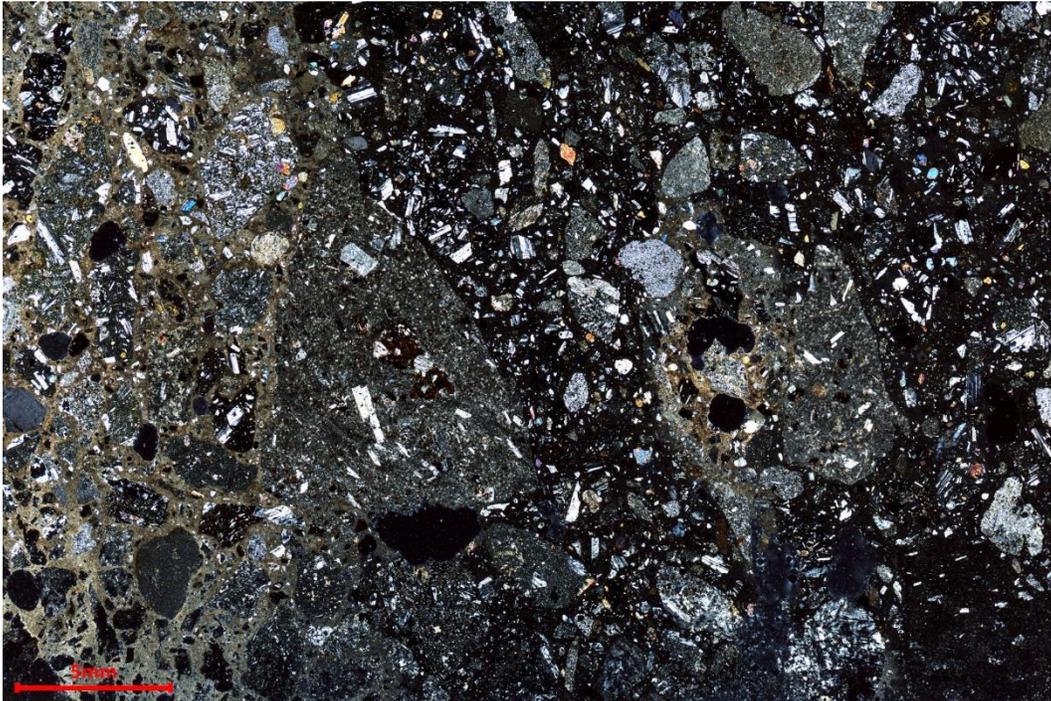


Figura 1.2: Textura general y componentes de la muestra Heredia-1 bajo polarización cruzada.

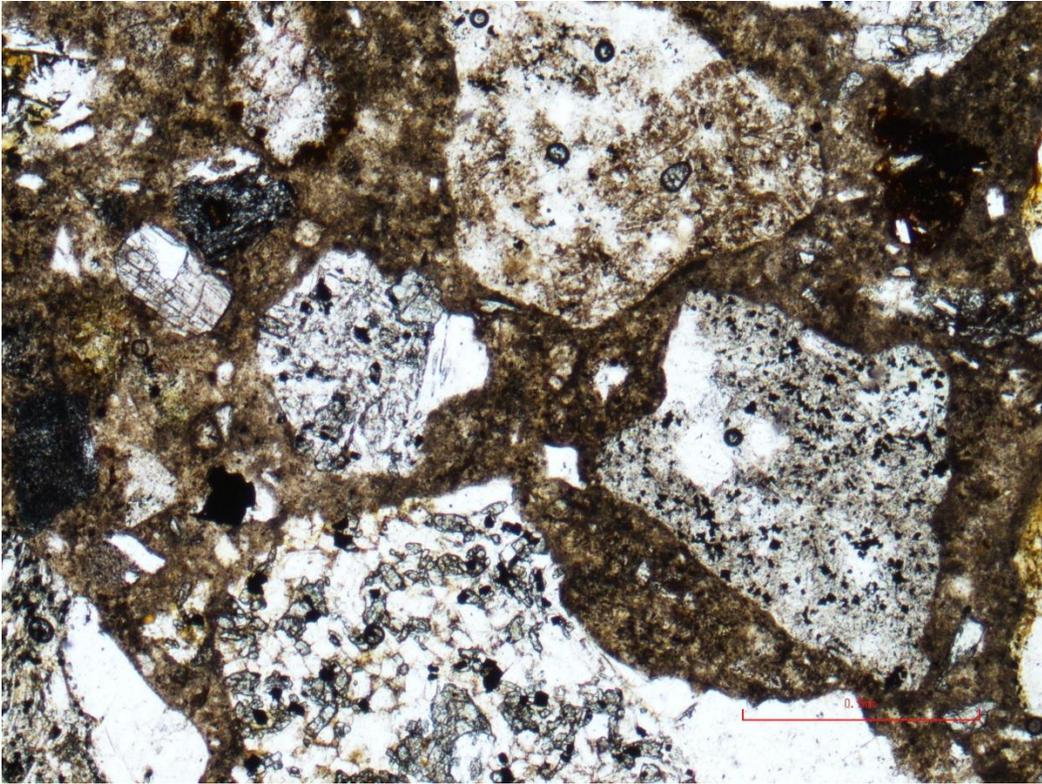


Figura 2.1: Detalle de agregado y pasta de la muestra Heredia-1 bajo polarización paralela.

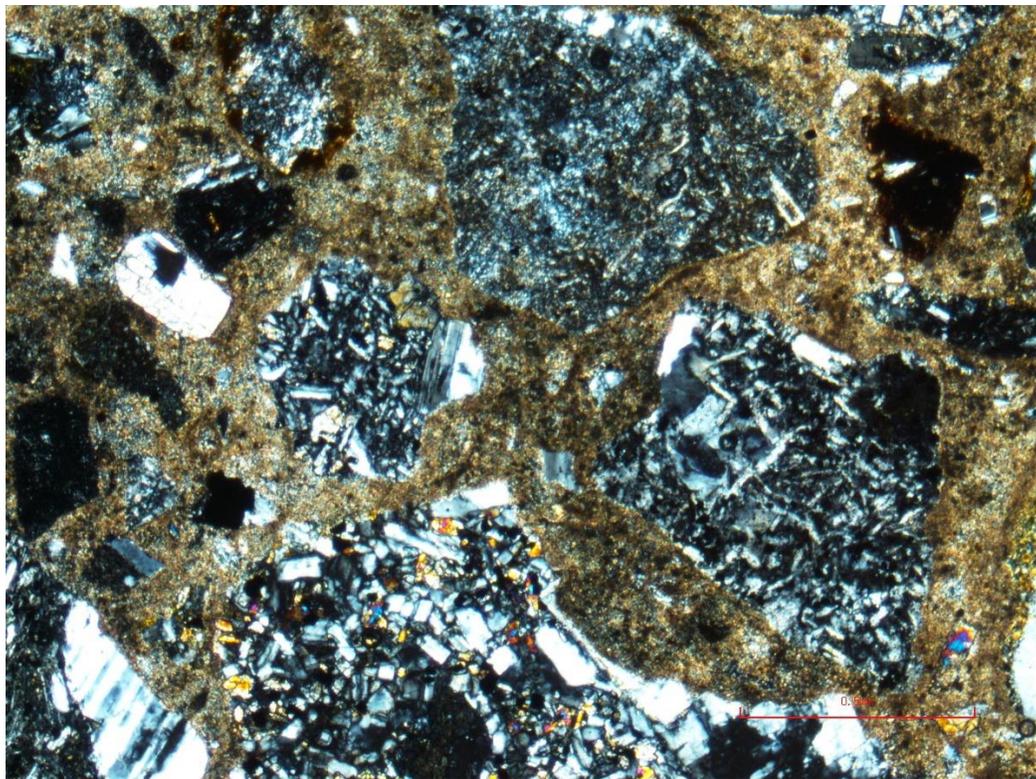


Figura 2.2: Detalle de agregado y pasta de la muestra Heredia-1 bajo polarización cruzada.

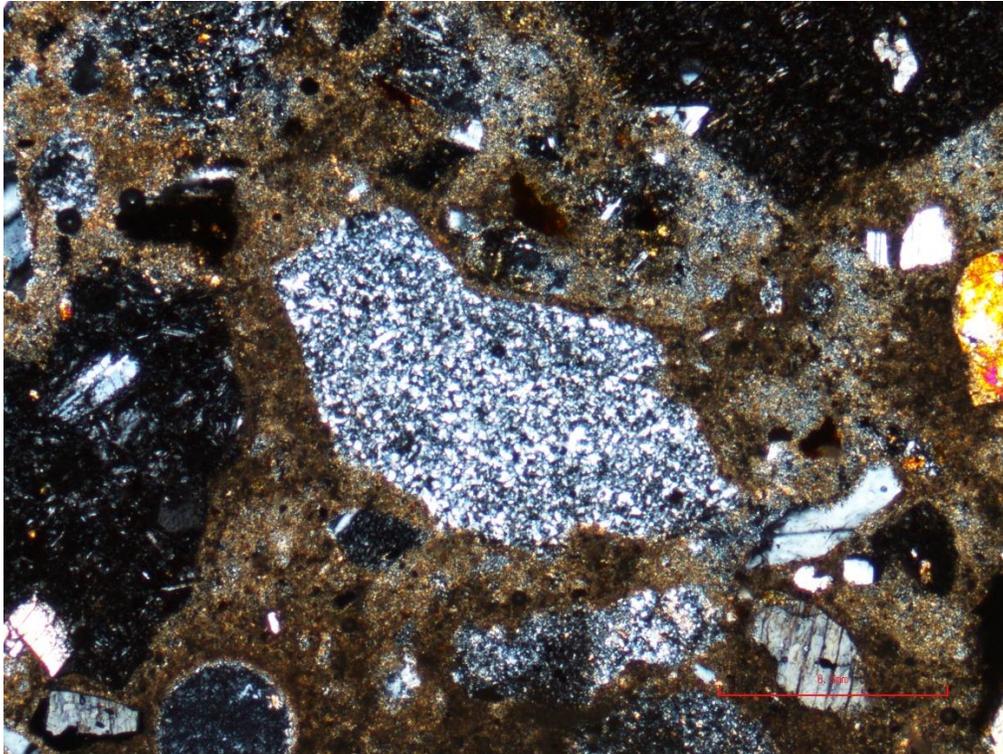


Figura 3: Clasto de cuarzo microcristalino en la muestra Heredia-1 bajo polarización cruzada.

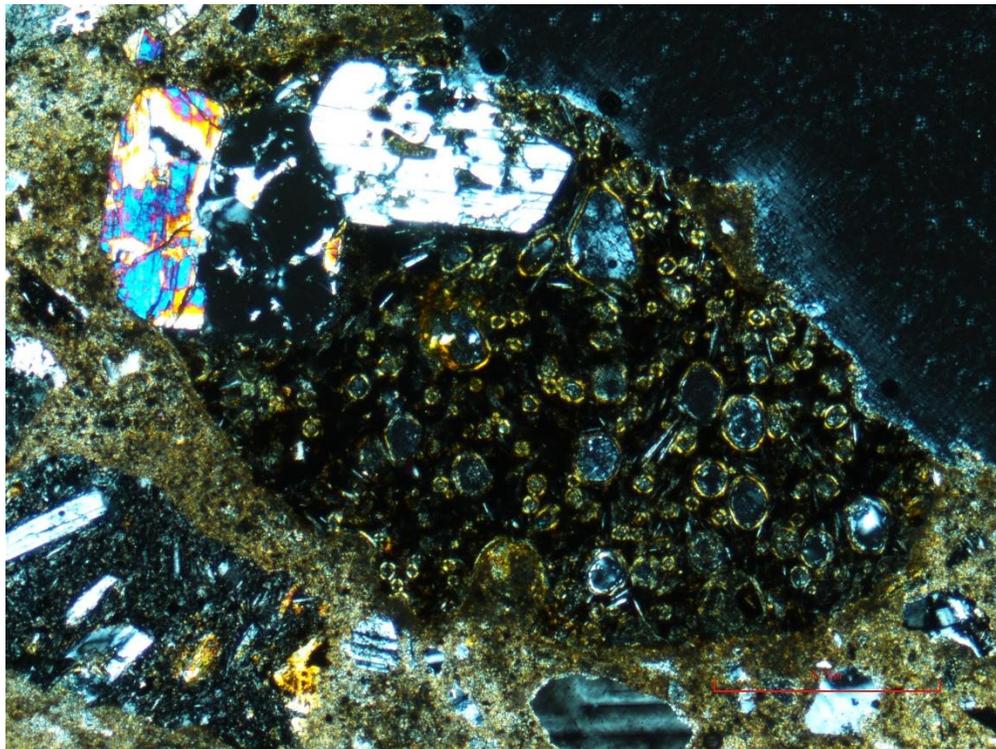


Figura 4: Clasto escoriáceo con matriz vítrea en la muestra Heredia-1 bajo polarización cruzada.

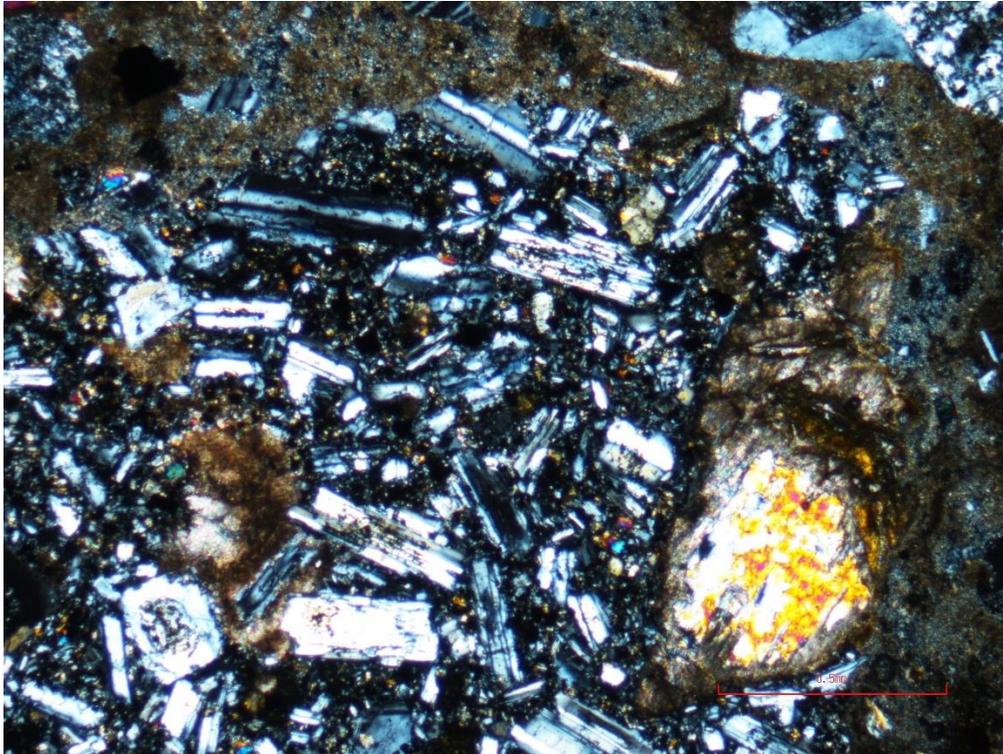


Figura 5: Olivino serpentizado en un fragmento basáltico de la muestra Heredia 1 bajo polarización cruzada.

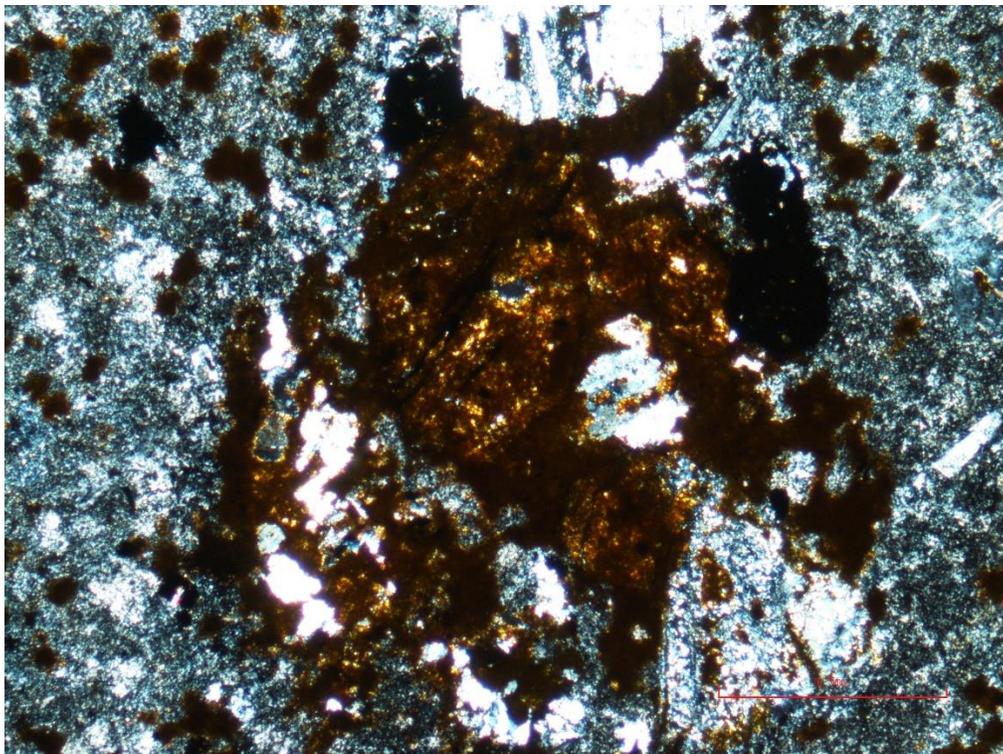


Figura 6: Óxidos/hidróxidos de hierro en el agregado de la muestra Heredia-1 bajo polarización cruzada.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA SEMICUANTITATIVA

Escuela Centroamericana de Geología

Laboratorio de Petrografía

Escuela Centroamericana de Geología Petrografía realizada por: Dr. Oscar H. Lücke

Código: 2

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura					
General	Clástica				
Matriz	Pasta de cemento				
Composición					
Componentes		Descripción cualitativa	Tamaño máximo [mm]	Tamaño promedio [mm]	% modal*
Litoclastos (7%)	Holocristalinos	Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en una matriz intergranular de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos.	5,83 x 3,78	1,87 x 0,83	3%
		Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en matriz pilotaxítica de plagioclasa y opacos	2,36 x 2,06	0,39 x 0,23	2%
	Hipocristalinos	Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos en una matriz intersertal de vidrio, plagioclasa, clinopiroxeno y opacos	2,33 x 1,23	1,16 x 0,62	2%
		Hialinos con vidrio desvitrificado en textura esferolítica. Presenta el borde isótropo por posible reacción con la pasta.	2,22 x 1,66	---	<1%
Cristales libres (20%)		Plagioclasa hipidiomórfica con textura cribosa, retrabajada. Clinopiroxenos, olivino alterado y opacos hipidiomórficos, cristaloclastos de calcita.	1,57 x 1,26	0,54 x 0,39	20%
Matriz (68%)	Cemento	Presenta una veta con birrefringencia amarilla del primer orden (0,0065) con un espesor medio de 1,54 mm	---	---	68%
Vacios (5%)		---	6,65 x 5,32	1,45 x 1,00	5%

*Porcentaje del área visual a partir de estimado semi-cuantitativo.

PASTA, CONTACTOS Y PATOLOGÍAS

La pasta muestra en la sección delgada, una veta de 1,54 mm de espesor medio con mayor birrefringencia (0,0065; amarillo del primer orden). Los contactos son flotantes (figura 7) tanto en los clastos como en los cristales libres. No se observan patologías en los contactos agregado-pasta, no se observan bordes birrefringentes ni presencia de geles isótropos.

MATERIALES PERJUDICIALES

Presenta clastos de material potencialmente reactivo en forma de clastos volcánicos con texturas hipocristalinas (matriz intersertal, Fig. 11). El agregado está compuesto principalmente por clastos andesíticos (composición intermedia en contenido de sílice) con matrices con vidrio. Predomina el contenido de cristales libres de plagioclasa y clinopiroxeno pero se observa presencia de cristaloclastos potencialmente perjudiciales como calcita y olivino alterado (Fig. 10). Algunos clastos presentan desarrollo de filosilicatos hidratados como serpentina y textura amigdaloida con relleno de calcedonia. Se observa un clasto de vidrio desvitrificado (Fig. 9) cuyo borde es color café oscuro y es isótropo. Sin embargo, se interpreta como alteración en el agregado y no es el desarrollo de un coloide isótropo por contacto con la pasta. No se observan indicios de minerales en el agregado que indiquen composiciones ricas en álcalis (sanidina, piroxenos alcalinos o anfíboles alcalinos, micas).

OBSERVACIONES

La composición de los agregados es común para la región de Costa Rica con predominio de clastos de origen volcánico de composición intermedia. Estos agregados comúnmente presentan matrices con vidrio, considerado como material perjudicial. Sin embargo, no se observan indicios de reacción con la pasta. Se observan factores que potencialmente podrían desarrollar patologías relacionadas con el deterioro propiamente del agregado como arcillitización en las matrices hipocristalinas, alteración de minerales máficos y presencia de cristaloclastos de calcita.

MICROFOTOGRAFÍAS



Figura 7.1: Textura general y componentes de la muestra 2 bajo polarización paralela.

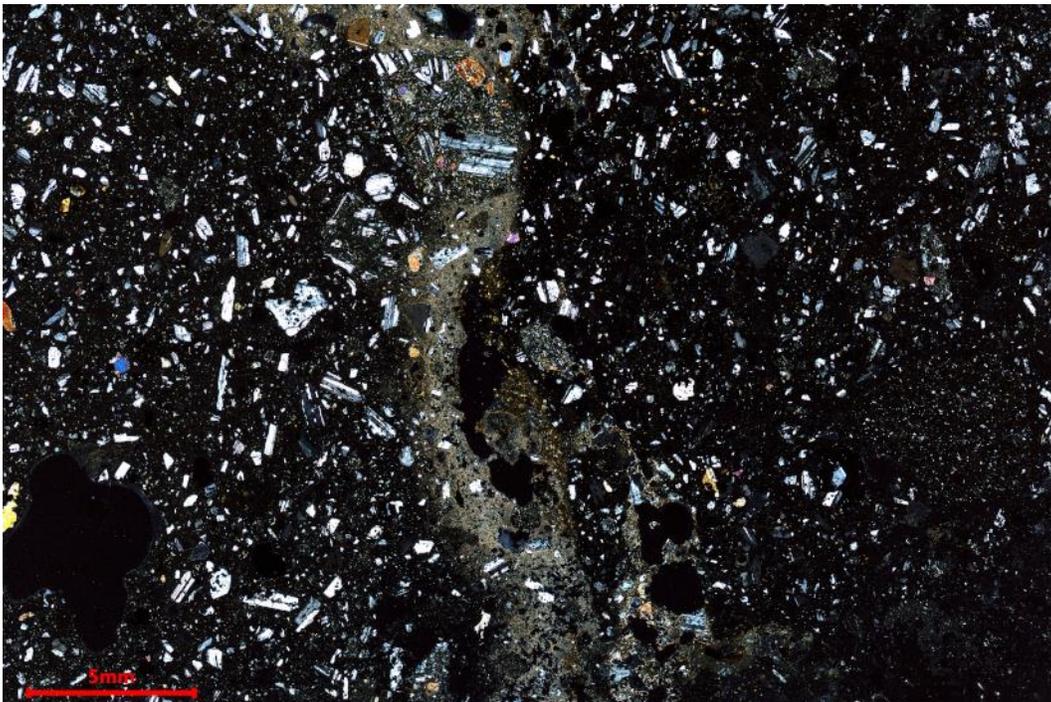


Figura 7.2: Textura general y componentes de la muestra 2 bajo polarización cruzada.

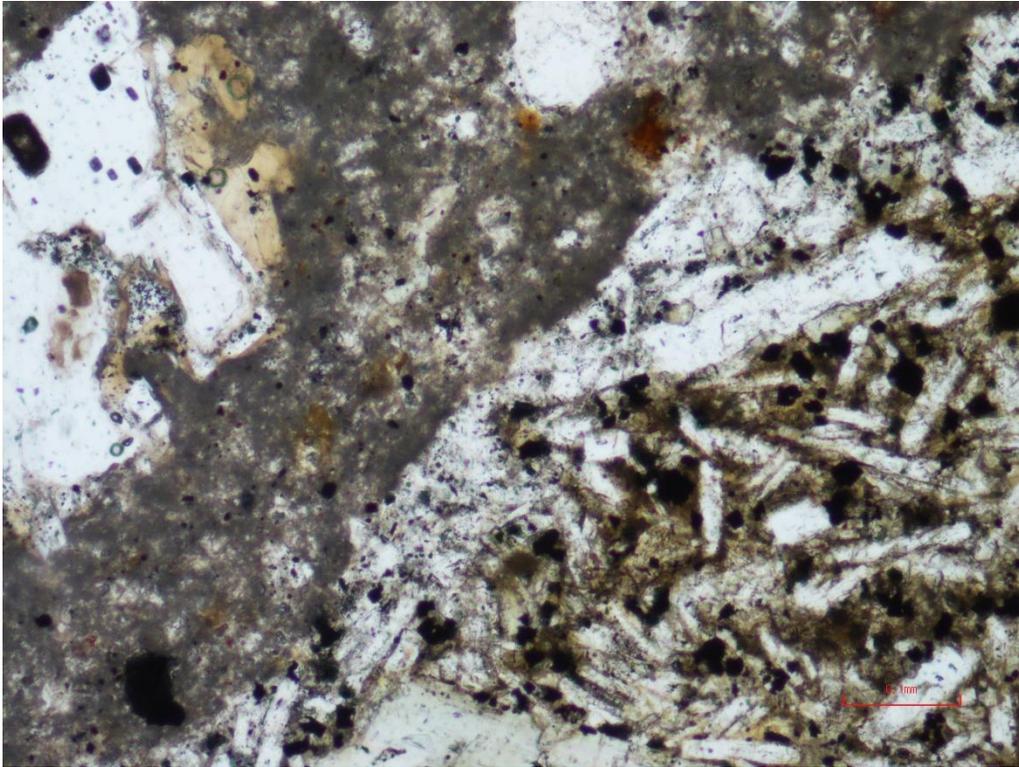


Figura 8.1: Detalle de agregado y pasta de la muestra 2 bajo polarización cruzada.

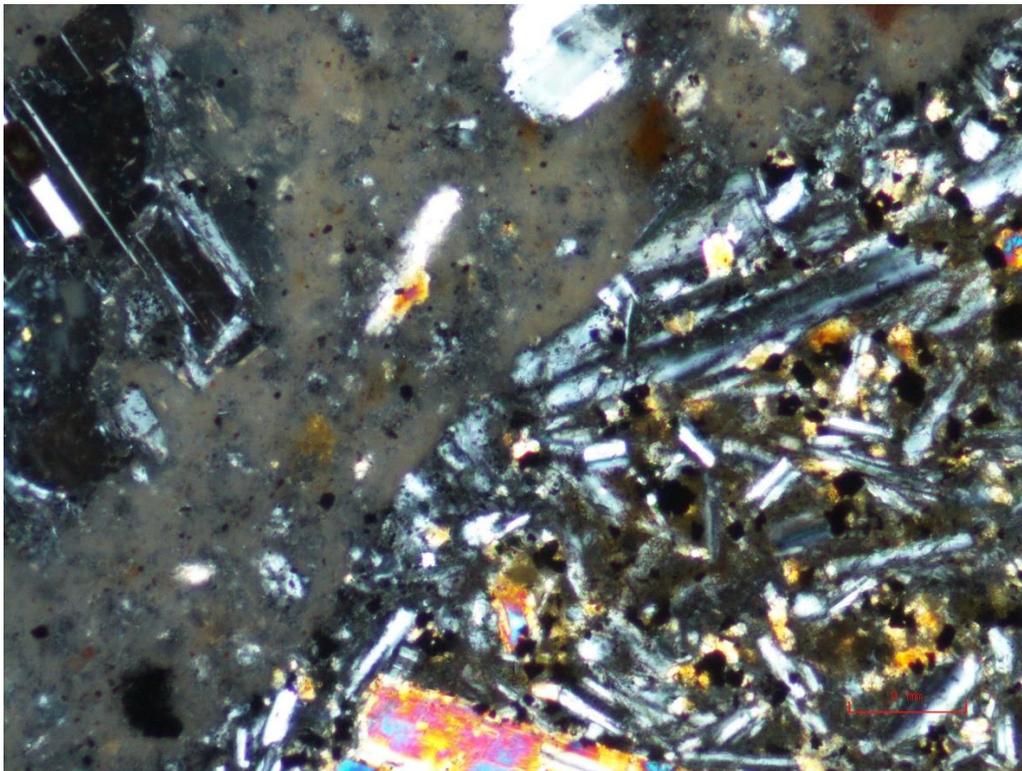


Figura 8.2: Detalle de agregado y pasta de la muestra 2 bajo polarización cruzada.

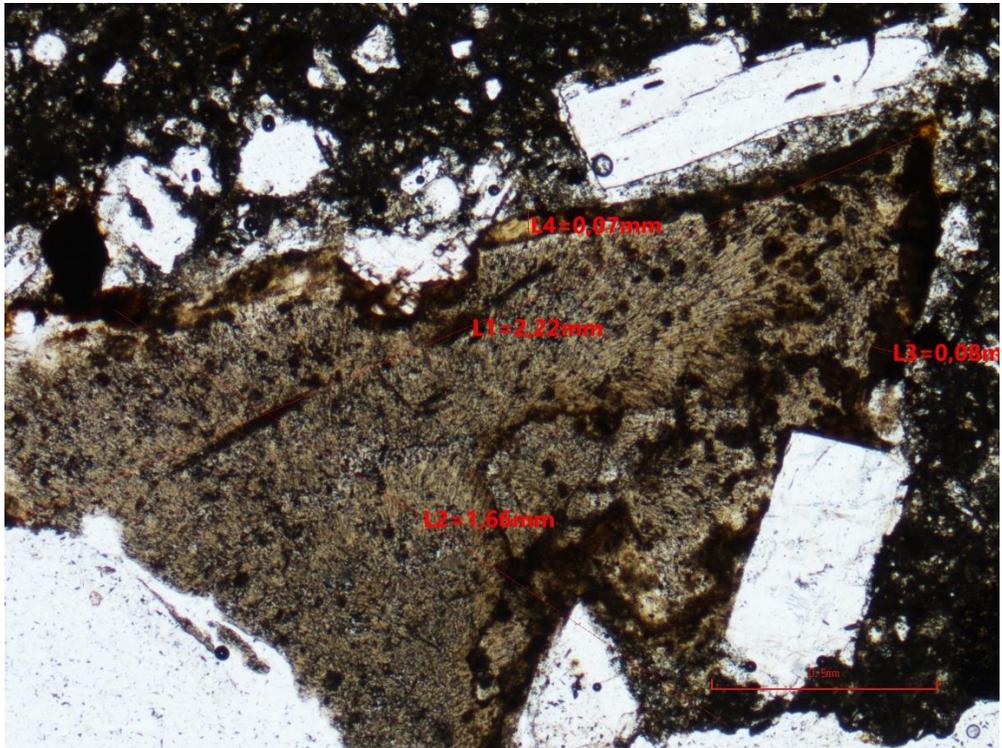


Figura 9.1: Clasto de vidrio desvitrificado en la muestra 2 bajo polarización paralela.

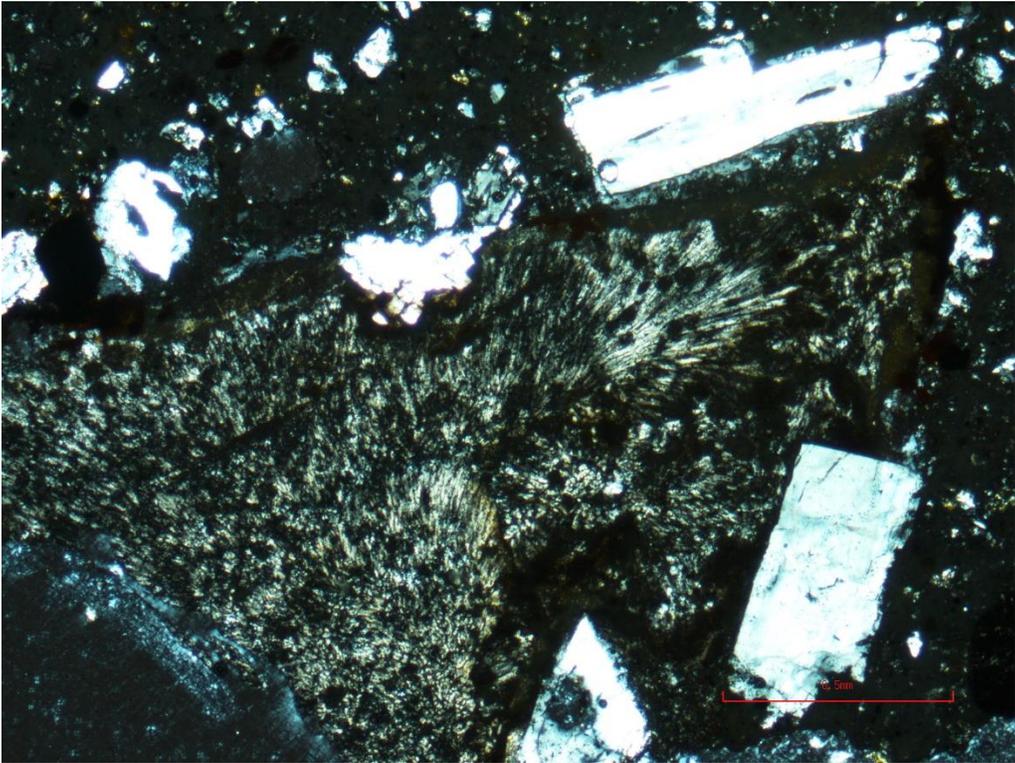


Figura 9.2: Clasto de vidrio desvitrificado en la muestra 2 bajo polarización cruzada.

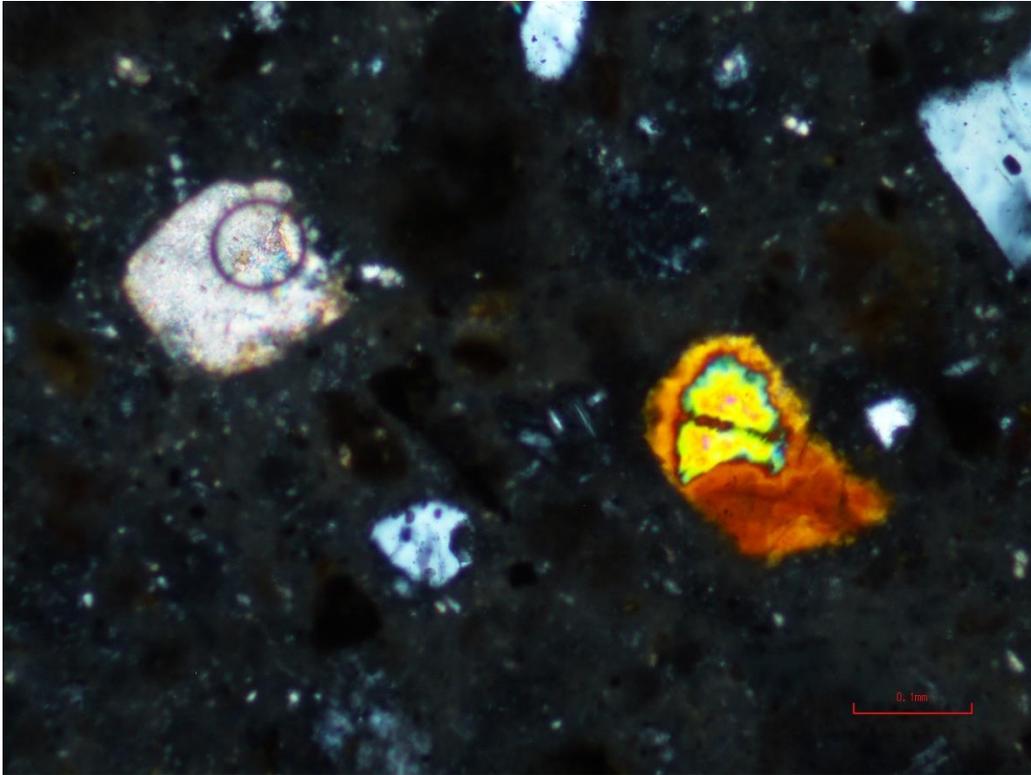


Figura 10: Cristales de calcita y olivino alterado en la muestra 2 bajo polarización cruzada.

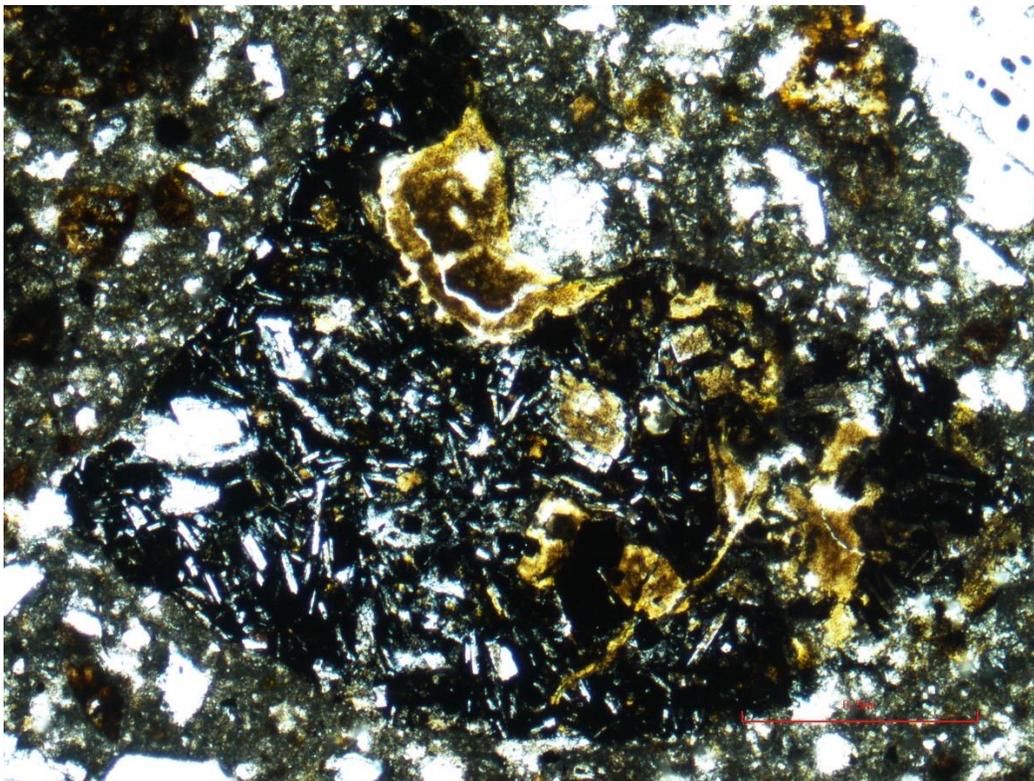


Figura 11: Clasto hipocristalino con calcedonia en textura amigdaloida presente en la muestra 2 bajo polarización paralela.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA SEMICUANTITATIVA

Escuela Centroamericana de Geología

Laboratorio de Petrografía

Escuela Centroamericana de Geología Petrografía realizada por: Dr. Oscar H. Lücke

Código: 3

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

Textura					
General	Clástica				
Matriz	Pasta de cemento				
Composición					
Componentes		Descripción cualitativa	Tamaño máximo [mm]	Tamaño promedio [mm]	% modal*
Litoclastos (70%)	Holocristalinos	Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en una matriz intergranular de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos.	1,38 x 0,72	0,71 x 0,60	49
		Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno en matriz pilotaxítica de plagioclasa y opacos	2,33 x 1,22	0,90 x 0,45	3
		Composición basáltica con fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa en matriz intergranular. Los clinopiroxenos están parcial o totalmente reemplazados por óxidos.	2,01 x 1,10	0,91 x 0,39	<1%
		Cuarzo microcristalino, con inclusiones de epidota y circón	2,52 x 1,10	0,73 x 0,65	3
	Hipocristalinos	Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos en una matriz intersertal de vidrio, plagioclasa, clinopiroxeno y opacos	4,58 x 2,95	1,05 x 0,86	10
		Composición andesítica con fenocristales de plagioclasa (pseudomorfos) reemplazados por calcita. Matriz recristalizada con cuarzo microcristalino y textura amigdaloida con relleno de calcedonia.	2,49 x 1,65	0,57 x 0,36	5
Cristales libres (5%)		Plagioclasa retrabajada. Clinopiroxenos y opacos hipidiomórficos	0,77 x 0,52	0,37 x 0,35	5
Matriz (20%)	Cemento		---	---	20
Vacíos (5%)		---	1,95 x 1,24	0,50 x 0,40	5

*Porcentaje del área visual a partir de estimado semi-cuantitativo.

PASTA, CONTACTOS Y PATOLOGÍAS

La pasta muestra en la sección delgada, zonas con mayor birrefringencia (0,0065; amarillo del primer orden) en las paredes de los vacíos (Fig. 12.2). Los contactos son flotantes (figura 13) tanto en los clastos como en los cristales libres. No se observan patologías en los contactos agregado-pasta, no se observan bordes birrefringentes ni presencia de geles isótropos.

MATERIALES PERJUDICIALES

Presenta clastos de material potencialmente reactivo en forma de cuarzo microcristalino (figura 15) y clastos volcánicos vítreos (matriz hialina 14) así como clastos con otras texturas hipocristalinas (matriz intersertal, Fig. 13) con menor porcentaje de vidrio. El agregado está compuesto principalmente por clastos andesíticos (composición intermedia en contenido de sílice) con matrices con vidrio y basálticos (composición baja en contenido de sílice) holocristalinas. No se observan indicios de minerales en el agregado que indiquen composiciones ricas en álcalis (sanidina, piroxenos alcalinos o anfíboles alcalinos, micas).

OBSERVACIONES

La composición de los agregados es común para la región de Costa Rica con predominio de clastos de origen volcánico de composición intermedia. Estos agregados comúnmente presentan matrices con vidrio, considerado como material perjudicial. Sin embargo, no se observan indicios de reacción con la pasta. Se observan factores que potencialmente podrían desarrollar patologías relacionadas con el deterioro propiamente del agregado. Esto a manera de óxidos/hidróxidos de hierro (limonita: comúnmente Goethita y hematita. Algunos clastos presentan textura amigdaloida con presencia de minerales de origen hidrotermal como calcedonia y epidota (Fig. 16). Este tipo de alteración es consistente con la presencia de cuarzo microcristalino que sugiere un proceso de alteración en la fuente del agregado.

MICROFOTOGRAFÍAS

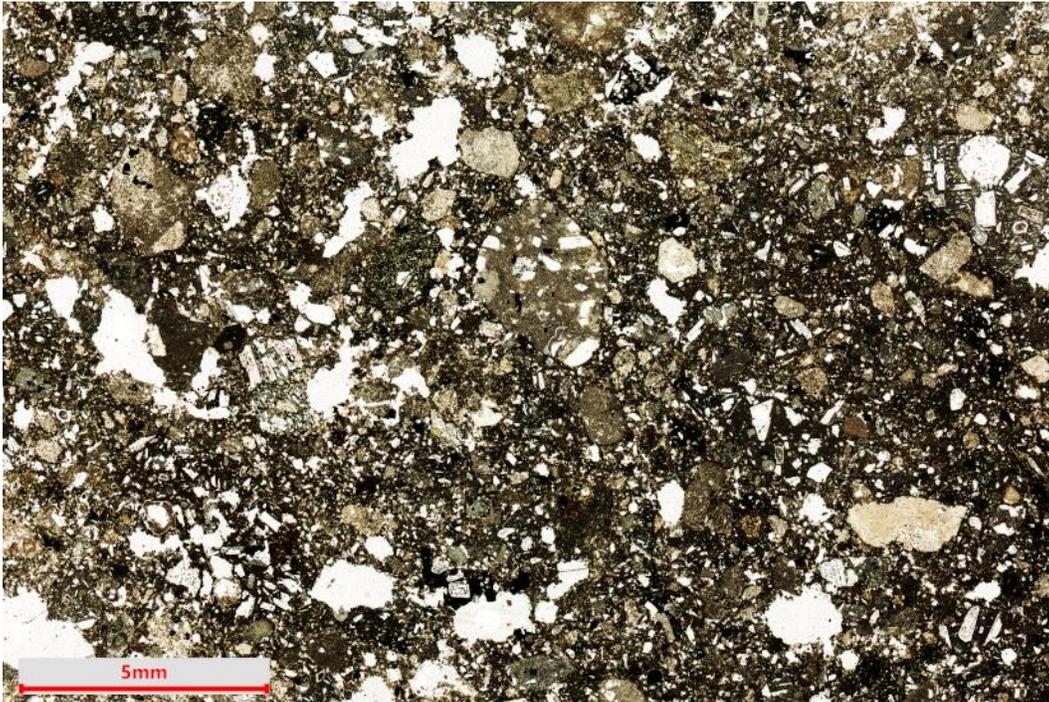


Figura 12.1: Textura general y componentes de la muestra 3 bajo polarización paralela.

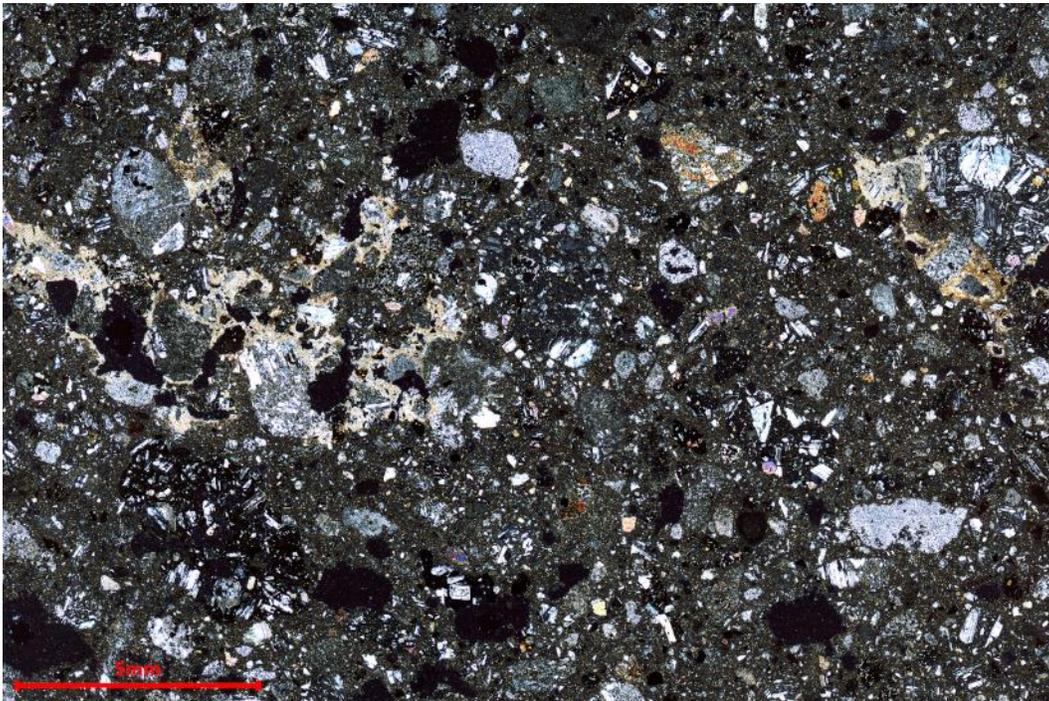


Figura 12.2: Textura general y componentes de la muestra 3 bajo polarización cruzada.

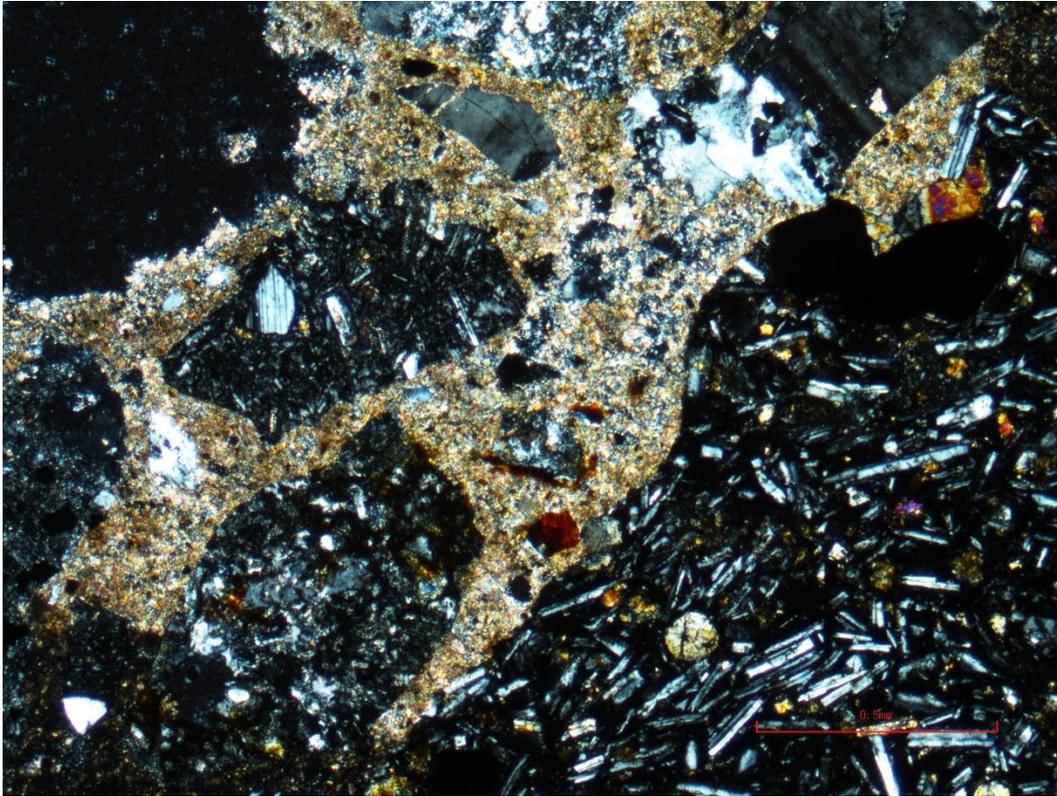


Figura 13: Detalle de agregado y pasta de la muestra 3 bajo polarización cruzada.

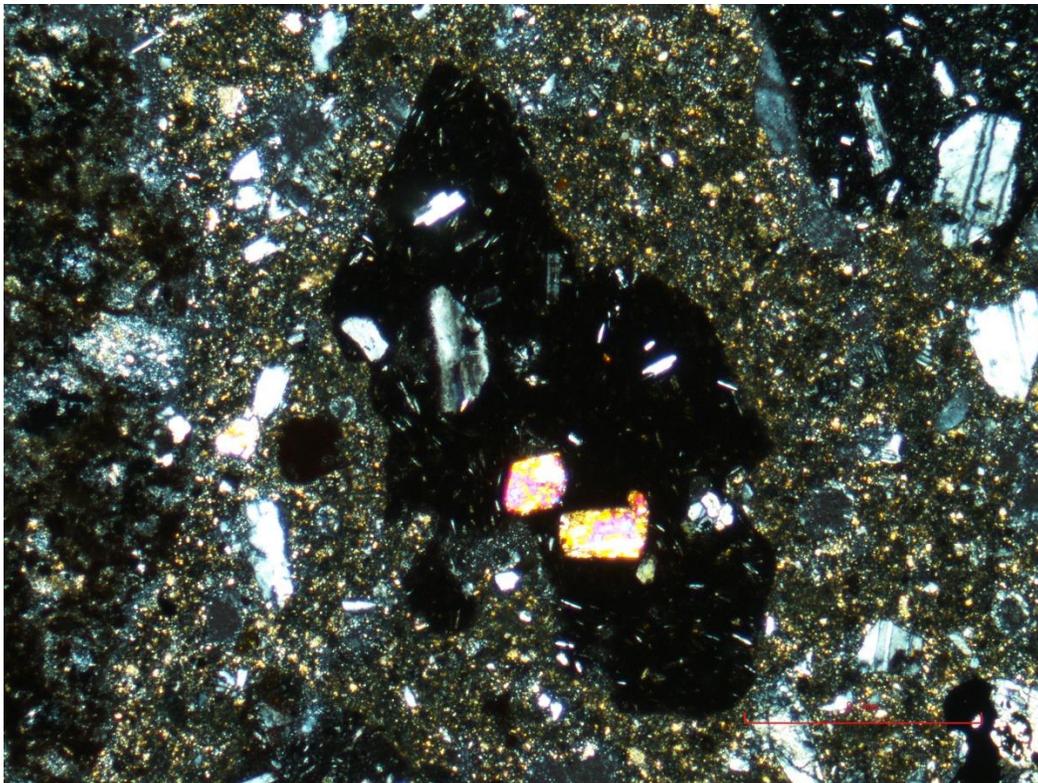


Figura 14: Clasto hipocristalino en la muestra 3 bajo polarización cruzada.

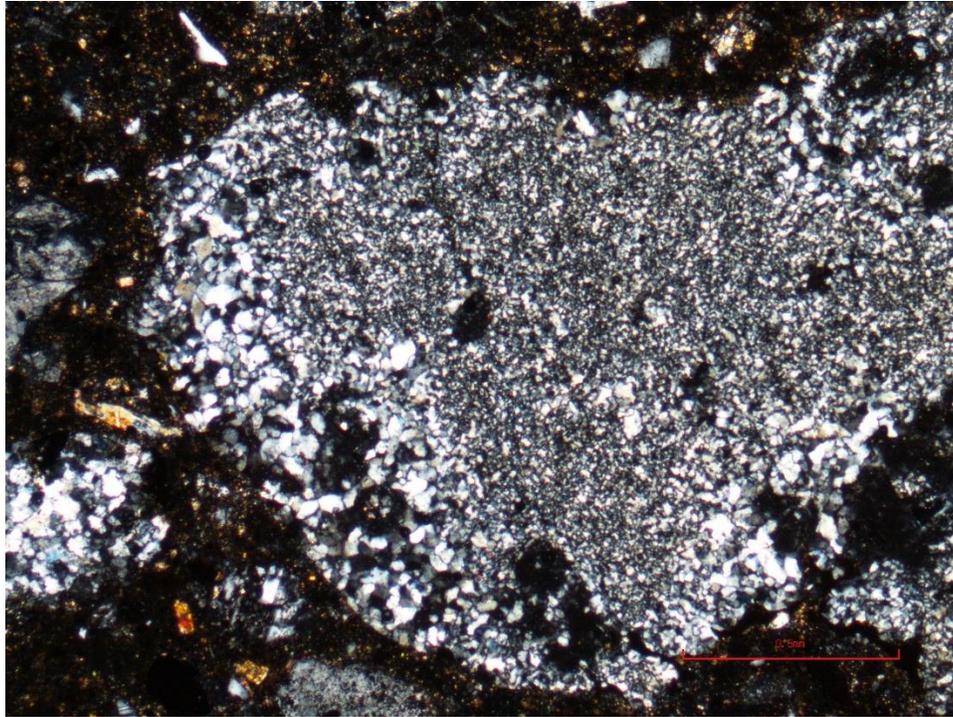


Figura 15: Cuarzo microcristalino en la muestra 3 bajo polarización cruzada.

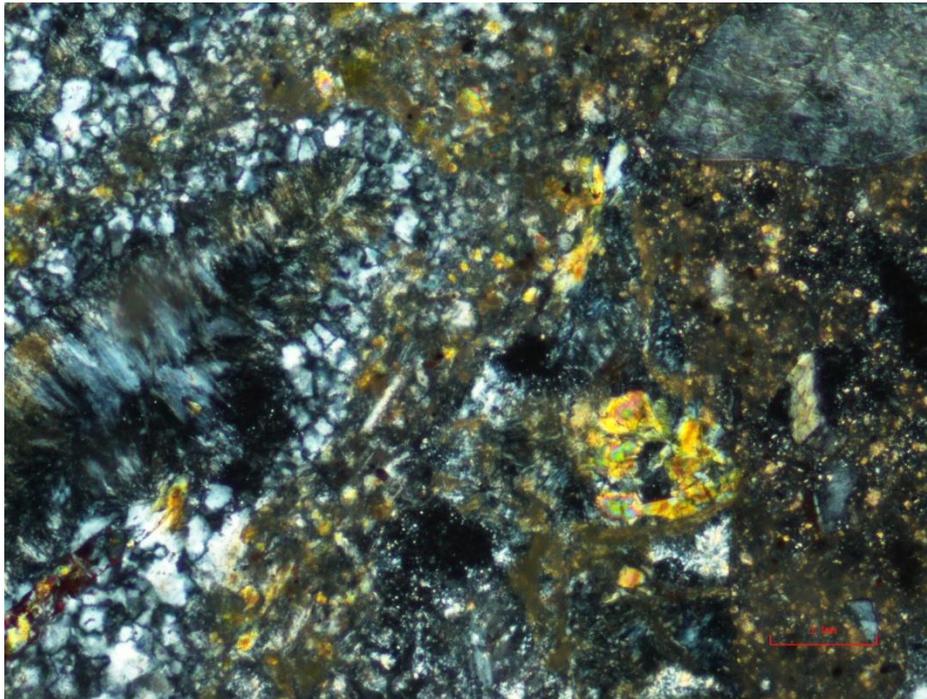


Figura 16: Amígdala con calcedonia y epidota en la muestra 3 bajo polarización cruzada