

Universidad Latina de Costa Rica
Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Información
Escuela de Ingeniería Civil

*Propuesta de trabajo final de graduación para optar por el grado
académico de Licenciado en Ingeniería Civil*

Modalidad Tesis

**Estudio de patologías del concreto hidráulico, derivados de la
degradación de los agregados a largo plazo en puentes: análisis en Costa Rica.**

Proponente:

Natalia Gutiérrez Villarreal

San Pedro, Montes de Oca

Mayo, 2021

“Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Gutiérrez Villarreal Natalia

De la Carrera / Programa:

autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

INGENIERÍA CIVIL -TÍTULO: Estudio de patologías del concreto hidráulico, derivados de la degradación de los agregados a largo plazo en puentes: análisis en Costa Rica.

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página Web institucional, así como medios electrónicos en general, Internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de la misma.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) **Martes, 27** del mes **Abril** de año **2021** a las **7:00 am**. Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores

Según orden de mención al inicio de ésta carta:



Tabla de contenidos

Antecedentes	1
Planteamiento del problema	5
Justificación.....	6
Pregunta de investigación.....	6
Objetivos	7
Objetivo General	7
Objetivos específicos.....	7
Alcances	7
Limitaciones	7
Delimitación	8
1. Propiedades del concreto hidráulico	10
1.1. Consideraciones ambientales	12
2. Norma de propiedades y calidad de los agregados	17
3. Pruebas al agregado.....	18
3.1. Gravedad específica y absorción.....	18
3.2. Contenido de finos	18
3.3. Desgaste de los Ángeles.....	19
3.4. Sanidad del sulfato de sodio.....	20
3.5. Equivalente de arena	20
3.6. Impurezas orgánicas.....	21
3.7. Muestreo de agregados.....	22
4. Análisis de concreto y prueba para la detección de patologías	22
4.1. Análisis petrográfico	27
5. Mineralogía y propiedades de los minerales	28

5.1.	Propiedades físicas de los minerales	28
5.2.	Propiedades ópticas de los minerales	28
5.3.	Mineralogía química	29
5.4.	Propiedades químicas del agregado	32
5.5.	Propiedades mecánicas del agregado	32
5.6.	Propiedades físicas del agregado.....	32
6.	Nomenclatura descriptiva para los constituyentes de agregados de concreto.....	33
7.	Rocas ígneas.....	35
8.	Rocas sedimentarias	39
9.	Características físicas de las rocas ígneas y sedimentarias	44
10.	Zona de interfase cemento-agregado.....	47
11.	Fuentes del álcali.....	49
12.	Reacciones de álcali-agregado	49
12.1.	Reacción álcali- sílice.....	50
12.1.1.	Granulometría.....	52
12.1.2.	Tipos de sílice reactivo.....	52
12.1.3.	Síntomas de la reacción álcali-sílice	54
12.2.	Reacción álcali-carbonato.....	57
12.2.1.	Química de la reacción álcali- carbonato	58
13.	Definición del enfoque y método de investigación.....	63
14.	Sujetos y fuentes de información	63
15.	Definición de variables.....	64
16.	Instrumentos y técnicas utilizados en la recolección de datos	66
17.	Sustentación de la confiabilidad y validez de los instrumentos utilizados	66
18.	Organización del análisis	69

19. Puente Río San Lázaro	76
20. Puente Río Potrero	103
21. Ponderación de los resultados de los puentes con agregado de origen sedimentario	123
22. Puente Río Poás.....	126
23. Puente Río Piedras	146
24. Ponderación de los resultados y análisis comparativo	166
Conclusiones	173
Recomendaciones.....	175
Referencias bibliográficas.....	177
Anexos	193

Índice de tablas

Tabla 1	10
Tabla 2	11
Tabla 3	24
Tabla 4	27
Tabla 5	29
Tabla 6	30
Tabla 7	30
Tabla 8	31
Tabla 9	32
Tabla 10	33
Tabla 11	44
Tabla 12	46
Tabla 13	52
Tabla 14	64
Tabla 15	64
Tabla 16	70
Tabla 17	72
Tabla 18	74
Tabla 19	76
Tabla 20	80
Tabla 21	83
Tabla 22	88
Tabla 23	92
Tabla 24	94
Tabla 25	100
Tabla 26	103
Tabla 27	107
Tabla 28	111
Tabla 29	115
Tabla 30	121

Tabla 31	123
Tabla 32	125
Tabla 33	126
Tabla 34	132
Tabla 35	136
Tabla 36	138
Tabla 37	144
Tabla 38	146
Tabla 39	151
Tabla 40	155
Tabla 41	158
Tabla 42	164
Tabla 43	168
Tabla 44	170

Índice de figuras

Figura 1	13
Figura 2	14
Figura 3	14
Figura 4	15
Figura 5	16
Figura 6	16
Figura 7	17
Figura 8	19
Figura 9	20
Figura 10	21
Figura 11	22
Figura 12	23
Figura 13	25
Figura 14	26

Figura 15	31
Figura 16	36
Figura 17	36
Figura 18	37
Figura 19	38
Figura 20	40
Figura 21	40
Figura 22	41
Figura 23	41
Figura 24	42
Figura 25	42
Figura 26	43
Figura 27	43
Figura 28	48
Figura 29	52
Figura 30	55
Figura 31	55
Figura 32	56
Figura 33	57
Figura 34	57
Figura 35	61
Figura 36	71
Figura 37	76
Figura 38	77
Figura 39	77
Figura 40	78
Figura 41	78
Figura 42	79
Figura 43	81
Figura 44	81
Figura 45	84

Figura 46	85
Figura 47	86
Figura 48	87
Figura 49	88
Figura 50	90
Figura 51	91
Figura 52	92
Figura 53	95
Figura 54	96
Figura 55	97
Figura 56	98
Figura 57	99
Figura 58	101
Figura 59	102
Figura 60	103
Figura 61	104
Figura 62	104
Figura 63	105
Figura 64	106
Figura 65	107
Figura 66	108
Figura 67	109
Figura 68	110
Figura 69	112
Figura 70	113
Figura 71	114
Figura 72	116
Figura 73	117
Figura 74	118
Figura 75	119
Figura 76	120

Figura 77	122
Figura 78	124
Figura 79	125
Figura 80	127
Figura 81	128
Figura 82	129
Figura 83	129
Figura 84	130
Figura 85	131
Figura 86	132
Figura 87	133
Figura 88	134
Figura 89	135
Figura 90	137
Figura 91	139
Figura 92	140
Figura 93	141
Figura 94	141
Figura 95	143
Figura 96	145
Figura 97	147
Figura 98	148
Figura 99	148
Figura 100	149
Figura 101	150
Figura 102	152
Figura 103	153
Figura 104	154
Figura 105	154
Figura 106	155
Figura 107	156

Figura 108.....	157
Figura 109.....	159
Figura 110.....	160
Figura 111.....	161
Figura 112.....	162
Figura 113.....	163
Figura 114.....	165
Figura 115.....	167
Figura 116.....	169
Figura 117.....	170
Figura 118.....	171

CAPÍTULO I

PROBLEMA Y PROPÓSITO

Antecedentes

El concreto es uno de los materiales de más alto consumo para construcciones en el mundo, pues con él se realizan grandes obras en estructuras como: carreteras, puentes de tránsito peatonal, carreteras, puentes a desnivel, estructuras de uso privado (apartamentos, casas, comercios, fabricas, etc.) y de uso público (hospitales, edificio de oficina, aeropuertos, etc.); así como estructuras para el tránsito de aguas, por ejemplo: vados, alcantarillas y caños.

Este material es un conglomerado que en el 100% de su vida útil está en contacto con el medio ambiente. Debido a esto, tanto en su proceso de elaboración como en varias etapas de su vida útil, se encuentra propenso a sufrir daños en su estructura interna. Estas complicaciones tienen su origen en la génesis mineralógica del concreto, así como en las reacciones fisicoquímicas con el medio ambiente, que pueden llegar a causar un nivel de deterioro significativo en su ciclo de vida.

Durante la operación de las estructuras de los puentes y dependiendo de la situación de la estructura, los ingenieros deben realizar varios tipos de inspecciones; con el fin brindar una mayor durabilidad al viaducto y así proveer mayor vida útil, seguridad y comodidad a la estructura. En el caso particular de Costa Rica, lamentablemente hay una política preventiva deficiente en aspectos de mantenimiento, además de esto, no se realizan las inspecciones necesarias. Aunado a lo anterior, es importante tomar cuenta que existen algunas patologías que no pueden ser detectadas con una inspección visual. Todos estos factores pueden derivar en complicaciones estructurales, por ejemplo: el colapso de un puente, en caso de que no se detectara a tiempo su deterioro.

A continuación, se mostrarán algunos análisis realizados al respecto, estas fuentes se presentarán ordenadas de forma cronológica:

En primer lugar, se encuentra una tesis para optar por el grado de licenciatura realizada por Panqueva, en la que realiza un análisis de patologías físicas en puentes vehiculares en concreto en la localidad de Chapinero. Panqueva (2015), menciona en su tesis que las patologías pueden presentarse en el proceso constructivo, en alguna etapa de la vida útil, o bien, pueden

generarse por consecuencia de accidentes. Como parte de su análisis, el autor por lo que tomó como variables de estudio 20 puentes vehiculares.

Al realizar las inspecciones correspondientes, Panqueva (2015) determinó una serie de agentes que son causantes de las patologías: la orina humana o animal, filtraciones de agua en el concreto y un mal manejo del desagüe que provocaba la presencia de humedad, y que, a su vez, causaba la oxidación del acero de refuerzo del concreto. También notó que las estructuras presentaban musgos y hongos generados por la contaminación del ambiente, por el tránsito y por la fauna que causaba micro fisuras en la estructura. Entre los agentes mencionados anteriormente y algunos otros encontrados en las inspecciones realizadas, Panqueva (2015) realizó una estadística utilizando gráficos circulares para determinar qué porcentaje de puentes los presentan y cuáles no.

El autor llega a la conclusión de que un 80% de los puentes inspeccionados presentan humedad. También concluyó que las sales presentes en la orina originan reacciones álcali – agregado, comprometiendo a la estructura mediante fisuramientos en el concreto. Además, recomienda un mantenimiento periódico para prevenir la aparición de patologías físicas en el viaducto.

En segundo lugar, está una tesis realizada por Peñuela y Sossa en el 2015 para optar por el grado de licenciatura en la Universidad Católica de Colombia. El tema de estudio se centra en las patologías mecánicas presentes en los puentes vehiculares, específicamente en la localidad de Fontibón. Se seleccionó esta zona pues para la construcción de algunos puentes dentro de ella, no se utilizó alguna norma con requisitos mínimos, ya que, en el momento de su construcción, no había ninguna normativa aprobada. Por otra parte, los puentes de esta localidad están sometidos constantemente a cargas de impacto que afectan a la estructura, por lo que, conforme pasa el tiempo llegan a producirse daños hasta llegar al colapso, por lo tanto, requieren de un constante mantenimiento.

Los objetivos por cumplir en este proyecto de graduación fueron: realizar un levantamiento de patologías mecánicas en puentes determinados para indicar las causas probables de las patologías y así llegar a evaluar el estado de las estructuras de concreto con respecto a los deterioros mecánicos. De acuerdo con los objetivos anteriores, Peñuela y Sossa (2015) realizaron una base de datos en donde anotaron, primeramente, la identificación del

puente, las características estructurales (tanto en la superestructura como en la subestructura) y la descripción de la calidad y estado del puente (cuya calificación se determinó de la siguiente manera: bajo 1-3, medio: 4-6 y alto: 7-9). Adicionalmente, se anotaron las características de los fisuramientos, las observaciones a raíz de la patología y el tipo de investigación utilizada para la detección del deterioro. La conclusión que más destacó de este proyecto fue que la mayoría de los fisuramientos en las vigas son provocados por los impactos que recibe la estructura, presentando desprendimiento del concreto exponiendo el acero de refuerzo.

En tercer lugar, se encuentra un estudio elaborado por Matarrita en el 2017, en el que evalúa y clasifica las patologías que influyen en la vida útil de las losas de concreto en puentes. En este estudio, Matarrita (2017), contempló ciertos métodos para estimar la vida útil de las losas del concreto, el tipo de evidencias de daños presente en las losas de la estructura y el grado del daño (que fue determinado por el Manual de Inspecciones del MOPT). En este trabajo se estudiaron veintinueve puentes de concreto alrededor de las siete provincias del país.

En los resultados de esta investigación se mostraron porcentualmente: la cantidad de daños presentes por losa, cantidad de losas dañadas, los tipos de daños presentes en la losa, el grado de daño por grietas en una y dos direcciones, la ubicación de las grietas en una y dos direcciones. Estos últimos tres resultados se reiteraron ya no en grietas, sino con otros daños como en eflorescencia, descascaramiento, acero de refuerzo expuesto, hormigueros, agujeros. También se obtuvieron resultados mediante un listado en donde se anotaron los agentes que afectan la durabilidad en las losas de los puentes en estudio, un porcentaje de la cantidad de puentes afectados por el deterioro en las losas de concreto y por último el porcentaje de la cantidad de agentes que ocasionan los daños en cada losa de los puentes evaluados.

Matarrita (2015) concluye con este estudio que: en la mayoría de las estructuras se manifiestan al menos cuatro daños visibles en cada losa; el principal problema es la humedad y los esfuerzos por las cargas vivas y muertas; también, que el 57% de las losas se encuentran en un grado de daño 2, lo cual se considera como una condición buena. Con respecto a las grietas, sugiere implementar procedimientos para restablecer y aumentar la resistencia y rigidez, renovar el aspecto y durabilidad, y, por último, evitar el desarrollo de la corrosión en la estructura añadiendo, por ejemplo, algún recubrimiento.

Otro análisis relevante es elaborado por López y Agüero en el 2018, como parte de su tesis para optar por el grado de licenciatura en la Universidad de Costa Rica. Este trabajo tenía como fin elaborar un catálogo de deterioros en puentes para Costa Rica. El catálogo brindó una clasificación detallada de los deterioros sufridos por los puentes, las patologías que los afectan y los componentes de los puentes a evaluar. El catálogo realizado por López y Agüero (2018) es mucho más completo que el Manual de Inspección de Puentes del MOPT, que es el que se utiliza oficialmente para realizar las inspecciones respectivas. Sin embargo, dicho manual, presenta ciertas limitaciones que afectan el resultado de las inspecciones para la identificación de los daños y sobre inspecciones rutinarias.

López y Agüero (2018) compararon el Manual de Inspección de Puentes del MOPT con otros internacionales, verificaron cuáles deterioros y componentes del puente faltaban en el manual oficial de Costa Rica, y los agregaron en el nuevo catálogo. Además, el catálogo elaborado por López y Agüero (2018) se realizó por medio de inspecciones visuales, mediante las que se categorizaron de materiales y los componentes del puente, y se realizaron evaluaciones por medio de los siguientes criterios: tipo de daño, severidad (se refiere a la ubicación, su tipología y la intensidad del deterioro), extensión (es la cuantificación del deterioro) y el grado de daño (en esta se evalúa por medio de una escala, con un parámetro de uno a cuatro, caracterizando su peligrosidad del daño y su caracterización de la magnitud).

Con lo anterior se permitió obtener una información más detallada para obtener un informe de la condición del puente más apropiada. Este catálogo contó también con imágenes de referencia. Como conclusión de este proyecto, López y Agüero (2018) expresan que este catálogo implica una mejoría en la evaluación de puentes, ya que se evalúa una mayor cantidad de deterioros, y se organizan de manera alfabética los componentes, los materiales y los deterioros. Además, menciona que comparativamente con el manual del MOPT, el nuevo catálogo presenta en mayor extensión los deterioros, así como una evaluación más detallada de los mismos, y también contiene casos prácticos de aplicación e imágenes que muestran la patología.

Finalmente, se encuentra un artículo elaborado en el 2020 por IDVIA Ingeniería sobre el caso del puente Morandi, en Italia. Este puente fue construido en 1967 y su estructura colapsó en el 2018. El puente contaba con 1102 metros de longitud y una altura máxima de 56 metros, 11 vanos con 210 metros cada uno, 12 pilas, un tablero con ancho de 18 metros, y con un sistema de tirantes de acero pretensado. El colapso se efectuó en los cables atirantados, en uno de los tres vanos principales para atravesar el Río Polcevera, el parque ferroviario y otras zonas importantes de la ciudad.

La raíz de la caída del puente Morandi fue la corrosión, específicamente a causa de los agentes atmosféricos y el medio marino. Este deterioro proporcionó daños a nivel mecánico, ya que perdió resistencia hasta generar el colapso, el cual no pudo ser prevenido, debido a la falta de inspecciones visuales recurrentes y ensayos puntuales (IDVIA Ingeniería, 2020).

Planteamiento del problema

De acuerdo con los antecedentes, se han realizado investigaciones en años anteriores tanto dentro del país como fuera, sobre patologías en el concreto hidráulico en puentes. Esos estudios realizados sobre las patologías han tomado en cuenta el concreto aglomerado, basándose bajo sus propias normas establecidas, y leyes que rigen en su país.

Cada trabajo investigativo ha tenido diferentes enfoques, y también han identificado el tipo de daño, han evaluado el efecto producido y lo han clasificado, además, han brindado consejos para su prevención a largo plazo; e incluso, algunos han presentado cálculos estadísticos para identificar y cuantificar la presencia de la patología en los puentes.

Sin embargo, actualmente no se ha realizado un proyecto investigativo en el que se estudien los agregados presentes en el concreto en puentes, un proyecto que incluya el estudio de patologías en los agregados de origen ígneo y sedimentario, que tomen en cuenta el desempeño de las enfermedades como el álcali-sílice, álcali-agregado, álcali-silicato y álcali-carbonato. En este sentido, el valor de este proyecto reside en intentar subsanar dicho vacío temático.

Para la elaboración de este proyecto se han tomado en cuenta los siguientes documentos: las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), el Manual de inspecciones del

MOPT (2007), ACI (American Concrete Institute), SAEP (Sistema de Administración de Estructuras de Puentes) e INTECO.

Justificación

Este proyecto será de gran importancia para la rama estructural de la ingeniería civil, pues trata sobre el estudio del desempeño de la estructura cuando ocurre una reacción química que se origina desde el interior del concreto debido a la composición mineralógica de los agregados. Los efectos generados por esta reacción química podrían disminuir la calidad de vida de la estructura si no se detectan con anticipación. En un puente con un estado de deterioro muy avanzado podría implicar un colapso en la estructura, lo cual llegaría a interferir en la comunicación de ciudades y complicaría el desarrollo económico de la zona.

En Costa Rica, no se cuenta con registros de estudio sobre los efectos generados por el álcali – agregado en puentes carreteras de concreto hidráulico, por lo tanto, no hay concientización sobre la combinación de algún tipo de agregado y el tipo de cemento, ni tampoco las consecuencias que implican, ni las posibles soluciones del álcali – agregados presentes en la estructura.

Este proyecto despertará el interés de ingenieros y otras personas involucradas en la construcción, en la temática de las diferentes patologías del álcali - agregado que pueden afectar las estructuras en el componente del concreto.

Pregunta de investigación

Una vez realizada una síntesis de las investigaciones relacionadas con el tema seleccionado en los antecedentes y el enunciado del problema, este proyecto busca responder la siguiente interrogante:

¿Cuáles serán los efectos de la patología del concreto hidráulico en puentes carreteras de rutas nacionales a largo plazo, cuando se usan agregados de origen sedimentario e ígneo?

Objetivos

Objetivo General

Analizar los efectos a largo plazo de la patología álcali-agregado del concreto hidráulico en estructuras puentes carreteros cuando se emplean agregados de origen ígneo y sedimentario.

Objetivos específicos

1. Analizar los efectos del concreto hidráulico endurecido derivado de la patología álcali – agregado.
2. Indicar técnicas remediales para los problemas patológicos.
3. Calificar los efectos de álcali-agregado sobre el concreto hidráulico endurecido, empleando una matriz de ponderación que establezca niveles de impacto de puentes.

Alcances

El presente trabajo tiene los siguientes alcances:

1. Se abordará la propuesta de este trabajo en puentes carreteras.
2. Se analizarán las patologías en cuatro puentes de concreto.
3. Los puentes tomados en cuenta deberán tener los agregados de origen ígneo y sedimentario.
4. Se tomarán en cuenta los puentes que tengan una antigüedad mayor de 15 años.
5. Este proyecto se basará en inspecciones visuales y análisis cualitativo de las estructuras a estudiar, por lo que no se podrán obtener las resistencias aproximadas de la compresión a concreto.
6. Se generará una propuesta de evaluación por medio de una matriz que permita identificar potenciales patológicos en el viaducto.

Limitaciones

El presente trabajo tiene las siguientes limitaciones:

1. En este proyecto de investigación no se realizarán pruebas destructivas a los puentes seleccionados.
2. No se cuenta con dispositivos drones para las inspecciones de los puentes.

3. Este proyecto no cuenta con equipos móviles para las inspecciones de las variables a estudiar.
4. No se logró inspeccionar por completo los elementos de los puentes, debido a la complejidad de acceso.

Delimitación

Los puentes escogidos para la realización de este trabajo se encuentran en territorio costarricense, específicamente en zonas de las provincias de Guanacaste, San José y Alajuela. Respecto a la delimitación temporal del trabajo, para la elaboración y conclusión de este proyecto se cuenta únicamente con 12 meses.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1. Propiedades del concreto hidráulico

Tabla 1

Propiedades del concreto endurecido

Propiedad	Descripción
Durabilidad	Capacidad de soportar la reacción de meteorización, abrasión, ataques químicos o cualquier otro deterioro. Además, un concreto durable mantiene su calidad, forma y serviciabilidad al estar expuesto con el medio ambiente.
Resistencia a la flexión	Propiedad que define la resistencia a flexión de los especímenes de concreto, empleando una carga puntual en el centro de una viga de concreto. Para esa propiedad se observa la norma ASTM C293, que se explicará más adelante.
Resistencia a la compresión	Esta propiedad se refiere a la resistencia a compresión por medio de probetas cilíndricas, aplicando cargas axiales en las caras del cilindro. Las normas ASTM C31 y ASTM C39 explican sobre la resistencia a la compresión en campo y mediante cilindros.

Nota. Tabla de elaboración propia con base en las normas ASTM y ACI 201.2R.

2. Causas y consecuencias del deterioro del concreto hidráulico

Tabla 2

Principales causas del deterioro del concreto hidráulico

Causas del deterioro	Descripción
Exposición a agentes químicos agresivos	<p>Para producir un ataque significativo en el concreto, los químicos agresivos deben estar en solución y debe presentarse en concentraciones mayores a las mínimas. Entre estos ataques químicos se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ataques de sulfato • Ataque físico por sales (sales del agua que contienen sulfato de sodio, carbonato de sodio y cloruro de sodio, que reaccionan químicamente con el concreto con humedad presente en contacto con el suelo, produciendo en la superficie escamas superficiales) • Exposición al agua de mar (la concentración de sales genera saturación y cristalización en poros del concreto, provocando ataque de sulfatos o corrosión del acero) • Ataque por ácidos (causa lixiviación; y carbonatación, es una reacción acompañada con la contracción del concreto y corrosión del acero de refuerzo debido a que el concreto reacciona con el dióxido de carbono)
Abrasión	Capacidad de la superficie para resistir el desgaste por fricción y frotamiento.
Corrosión de los metales y otros materiales embebidos en concreto	Proceso electroquímico en donde se produce la oxidación. Esto ocurre gracias al agua o cloruro y oxígeno, que se mantiene en contacto con el acero y genera reacción química.
Reacciones químicas de los agregados	Están: reacción álcali – sílice, reacción álcali – carbonato, oxidación o hidratación de ciertos sulfatos, óxidos o sulfuros inestables.

Nota. Tabla de elaboración propia con base en las normas ACI 201.2R.

2.1.Consideraciones ambientales

- **Ataques químicos:** Afectan la pasta del cemento, al agregado grueso o al acero de refuerzo. Usualmente este ataque inicia en la superficie del elemento estructural e ingresa al interior del elemento por medio de grietas y fisuras, o debido a la exposición prolongada. De manera prolongada, los resultados de este tipo de ataque pueden ir desde daños cosméticos hasta la pérdida de algún fragmento del elemento de la estructura.
- **Lixiviación:** La lixiviación es un deterioro producido por aguas que contienen pocos o nulos iones de calcio, o bien, agua subterránea ácida presente en forma de gas de dióxido de carbono disuelto, bicarbonato o ácido carbónico, que suelen hidrolizar o disolver los óxidos alcalinos y los productos que poseen calcio, por lo tanto, aumentan la permeabilidad. La cantidad de lixiviación depende de la temperatura, la tasa de permeabilización del fluido se determina por medio de la pasta de cemento y la cantidad de sales disueltas en el fluido de percolación.
- **Formación retardada de etringita:** La etringita se crea por medio de la hidratación temprana del cemento hidráulico de Portland. También, se puede observar en los cementos que poseen contenidos de sulfatos, en donde el sulfato tiene baja solubilidad. La etringita se produce por la reacción química de iones de sulfato, agua y aluminatos de calcio, por lo que forma un desarrollo masivo de pasta de cristales en forma de aguja, generando presiones en el concreto hasta obtener como resultado el agrietamiento.

El producto de estas reacciones forma expansiones de letreas en los concretos, y con ello, una disminución en la resistencia por la expansión de los aluminatos de calcio hidratados (ACI 365.1R, p.5). Sin embargo, la prueba real de la presencia de este ataque debe obtenerse mediante un análisis petrográfico y químicos (ACI 201.2R, p.13).

La agresividad de este ataque depende de la concentración de sulfatos, saturación del suelo, movimiento del agua, humedad, y temperatura y humedad del ambiente (ACI 201-2R, p.13).

Figura 1*Etringita en concreto*

Nota. Figura tomada de la página *Notas de concreto* (s.f.)

- **Ataque de sulfato:** Los sulfatos se encuentran presentes en los agregados y suelos, en el agua de mar o subterránea. Aquellos que provienen de fuentes externas como el suelo y agua, contienen sulfato de sodio, potasio, calcio o magnesio (ACI 201-2R, p.12). Estos sulfatos reaccionan con el hidróxido de calcio y el aluminato tricálcico hidratado para formar yeso y etringita. La etringita corresponde al aumento de volumen sólido, generando expansión y fisuración, mientras que el yeso ablanda el concreto y causa una pérdida de resistencia del concreto (ACI 201-2R, p.13).
- **Ataque ácido y base:** Los ácidos se combinan con los compuestos de calcio de la pasta de cemento que forman compuestos solubles que se lixivian del concreto para aumentar la permeabilidad y la porosidad. Los elementos principales que permiten la extensión de este ataque son el pH, el tipo de ácido y su concentración.
- **Reacciones álcali-agregado:** Para esta reacción son necesarios tres requisitos: presencia de álcali, presencia de sílice, silicato o carbonato en el agregado y presencia de humedad. Posteriormente se produce una reacción química de iones

álcali del cemento Portland, algunos componentes silíceos de los agregados y también iones de calcio e hidroxilo. Estos provocan expansión y el agrietamiento en la estructura.

Figura 2

Reacción álcali-agregado



Nota. Figura tomada de la página Hess (s.f.)

- **Corrosión del acero de repuesto:** Para que se presente la corrosión del acero, es necesario la presencia de oxígeno y agua. Aunque al acero de refuerzo se le adicione alguna cobertura adecuada para evitar este daño, la carbonatación y la presencia de iones de cloruro pueden destruir la película protectora. También, la corrosión se produce debido a la penetración de dióxido de carbono del medio ambiente, este altera el pH del concreto conforme los hidróxidos de calcio y álcali se convierten en carbonatos. Este tipo de daño se acelera en la estructura cuando hay presencia de fisuras o a causa de la porosidad del concreto.

Figura 3

Acero corroído



Nota. Figura de elaboración propia (2020)

Figura 4

Corrosión de acero de refuerzo



Nota. Figura de elaboración propia (2020)

- **Corrosión del acero pretensado:** Este puede degradarse a causa a la fatiga por corrosión, la fragilización por hidrógeno y el agrietamiento por corrosión bajo tensión. La fragilización por hidrógeno ocurre cuando los átomos de hidrógeno se incorporan al acero de refuerzo y reducen su ductilidad.
- **Ataques físicos:** Este tipo de ataque se manifiesta por medio del desgaste superficial y agrietamiento, causado por influencias ambientales como mencionan Mehta y Gerwick (1982).

Figura 5

Desgaste en el concreto



Nota. Figura tomada de la cuenta de JP Ingeniería (2018)

- **Cristalización de la sal:** Produce presión en los poros del concreto debido al crecimiento de cristales de sal almacenados. Donde existe mayor acumulación de sal es en aguas subterráneas o ciclos de aumentos de agua, ya que contienen sales disueltas, por ejemplo: sulfato de calcio, cloruro de sodio y sulfato de calcio.

Figura 6

Cristalización de concreto



Nota. Figura tomada la página 123RF (s.f)

- **Abrasión, erosión y cavitación:** Este deterioro implica una pérdida progresiva del concreto en la estructura. La diferencia entre ellas es la siguiente: la abrasión es un desgaste en seco; la erosión implica la presencia de un fluido; y la cavitación es el desgaste provocado por burbujas de vapor.
- **Eflorescencia:** Según la norma ACI 116, se define como un depósito de sales, formado en la superficie del concreto, comúnmente de color blanco, que se forma cuando la sustancia en solución sobresale del interior del concreto o mampostería y luego se precipita por reacción, como lo es la evaporación o carbonatación.

Figura 7*Eflorescencia*

Nota. Figura tomada de *Portal Ondac* (2016)

3. Norma de propiedades y calidad de los agregados

- **Especificación estándar para agregados de concreto:** Esta norma se refiere a la calidad y los requisitos de clasificación del agregado fino y del agregado grueso para obras civiles. En esta clasificación se definen, mediante una tabla, los límites para sustancias nocivas y los requisitos de propiedad física del agregado grueso para concreto. Sobre el agregado grueso se menciona que, primeramente, se debe clasificar su tamaño por medio de granulometría, para después determinar las sustancias deletéreas mediante límites determinados en la norma.

En el caso del agregado fino, se utiliza un análisis granulométrico para determinar su tamaño. Posteriormente, se detectan las sustancias deletéreas presentes en el agregado, por ejemplo: las impurezas orgánicas. Este tipo de sustancias se pueden apreciar cuando el agregado se torna de un color más oscuro que el color estándar establecido.

Finalmente, este agregado se induce a cinco ciclos de pruebas de solidez, en donde pierde alrededor de 10% cuando se emplea sulfato de sodio (ASTM C33)

4. Pruebas al agregado

Las pruebas que se pueden utilizar para analizar los agregados son las siguientes:

- **Método de prueba estándar para análisis por tamizado de agregados finos y gruesos:** Mediante un tamizado se determina la proporción de partícula con respecto a los tamaños de agregados finos y agregados gruesos, con el fin de ser empleados para obras de construcción. Esta norma brinda datos necesarios para el control de producción de diferentes tipos de agregados (ASTM C136/C136M).
- **Método de prueba estándar para densidad de masa (“peso unitario”) y vacíos en agregado:** Esta prueba se utiliza para determinar la densidad de masa del agregado cuando esta se encuentra suelta o compactada y calcula también los vacíos entre las partículas de agregado fino y grueso. Lo anterior se determina para la utilización de otros métodos de selección de proporciones para mezclas del concreto y relaciones de masa/volumen (ASTM C29M).

4.1. Gravedad específica y absorción

- **Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (o gravedad específica), y absorción del agregado grueso:** Este método de prueba se realiza en el agregado grueso, ya que se determina la densidad ponderada de una porción sin el cálculo del volumen de vacíos, la densidad relativa y la absorción de dicho agregado. Esto se ejecuta sumergiendo en agua el espécimen por 24 horas, para luego retirar la muestra y anotar sus pesos en estas condiciones: seca superficialmente y luego, completamente seca por el horno. Por medio de los datos tomados se calculan las densidades y su absorción (ASTM C127).
- **Método de ensayo normalizado para determinar densidad, densidad relativa y absorción de agregados finos:** Este ensayo, al igual que al anterior, determina un ponderado en una cantidad definida de agregado, así como: la densidad, la densidad relativa y la absorción del agregado. No en cuenta el volumen de vacíos, y es un método aplicado para el agregado fino (ASTM C128).

4.2. Contenido de finos

- **Método de ensayo normalizado para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm (o también N°200) de los agregados minerales por el método de lavado:** Según este método, se realiza un lavado con agua a una cantidad definida de agregado fino en el tamiz N°200, con el fin de determinar cuánta fue la masa de agregado fino perdida, mediante una comparación con la masa inicial de la muestra (ASTM C117).

Figura 8

Prueba ASTM C117



Nota. Figura tomada de ASTM C117

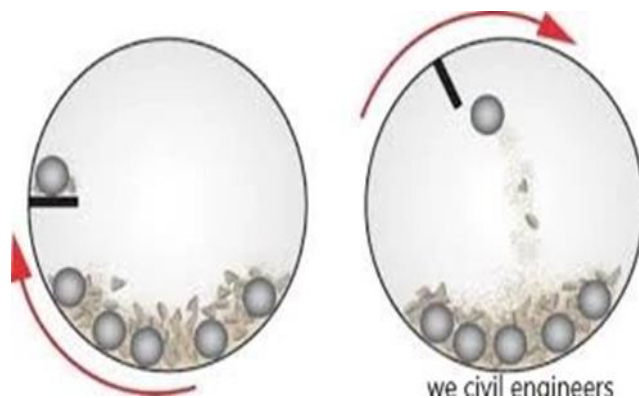
4.3. Desgaste de los Ángeles

- **Método de prueba estándar para resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles:** En esta prueba se realiza una degradación del agregado por medio de acciones como el desgaste, impacto y molienda que realiza un tambor que rueda con un número determinado de revoluciones, con una cantidad específica de esferas de acero. Lo anterior se genera de la siguiente manera: el tambor contiene una placa de estante que recoge la muestra de agregado y esferas, y la retira a medida que va

rotando el tambor, provocando las acciones mencionadas. Una vez culminado el proceso, se realiza un tamizaje, midiendo la degradación como porcentaje de pérdida (ASTM C131).

Figura 9

Prueba ASTM C131



Nota. Figura tomada de *Pavement Interactive* (s.f.)

4.4. Sanidad del sulfato de sodio

- **Método de prueba estándar para la solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio:** Esta prueba es utilizada para determinar la solidez de los agregados del concreto cuando están en la intemperie. Se realiza mediante la saturación de soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Posteriormente, se deshidrata la sal de los poros permeables colocando la muestra al horno. Esa sal depositada genera reacciones expansivas, simulando la expansión por congelación (ASTM C88).

4.5. Equivalente de arena

- **Método de prueba estándar para valor equivalente de arena de suelos y agregados finos:** Es una prueba de correlación, ya que indica las cantidades relativas de agregado fino que pasa por el tamiz N°4 y de polvos plásticos en suelos granulares. El proceso de correlación es el siguiente: una pequeña cantidad de agregado fino, o suelo, es saturado por una solución flocculante en un cilindro.

Luego, este mismo cilindro, es agitado para separar de la muestra los revestimientos arcillosos de las partículas de arena. Posteriormente, se adiciona una solución que obliga al material arcilloso a quedar en suspensión sobre la arena. Después de este proceso, se verifica la altura de arcilla floculada y la altura del agregado fino, para luego calcular el equivalente de arena relacionando dichas alturas multiplicadas por cien (ASTM D2419).

4.6. Impurezas orgánicas

- **Método de ensayo normalizado para determinar el contenido de impurezas orgánicas en los agregados pétreos finos para el concreto:** Este método de ensayo se ejecuta en agregados finos que serán utilizados en la mezcla del concreto. Se realizan dos procedimientos: en el primero se utiliza una solución de color estándar, y en el segundo, un vidrio de color estándar, para advertir la presencia de impurezas nocivas.

El método de la solución de color estándar se realiza de la siguiente manera: un frasco de vidrio se llena de la muestra de suelo, para luego depositar la solución de color estándar. A las 24 horas se compara y se anota el color de la solución estándar de la muestra con otra de otro frasco. Para la prueba del vidrio de color, se compara el líquido flotante de la muestra con vidrios de colores estándar determinados en la norma ASRM C40.

Figura 10

Prueba ASTM C40



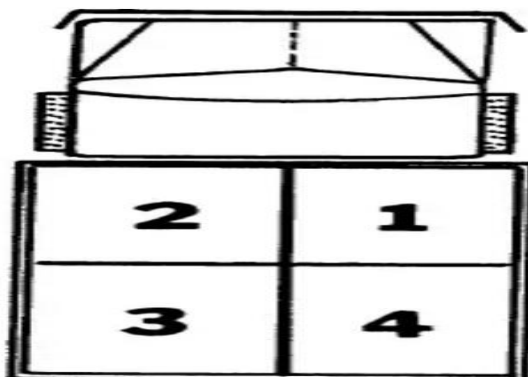
Nota. Figura tomada de UCA (s.f.)

4.7. Muestreo de agregados

- **Práctica estándar para muestreo aleatorio de materiales de construcción:** Esta práctica se refiere a la determinación de localizaciones aleatorias, o tiempos, en donde se toman muestras de materiales de construcción, para así evitar sesgos no intencionales de la persona que está tomando la prueba (ASTM D3665).

Figura 11

Prueba ASTM D3665



Nota. Figura tomada de ASTM D3665.

5. Análisis de concreto y prueba para la detección de patologías

Las pruebas que se pueden realizar para analizar elementos del concreto son las siguientes:

- **Método de prueba estándar para número de rebote de concreto endurecido:**
Método de prueba empleado para definir el número de rebote del concreto endurecido. En este método se utiliza un esclerómetro (martillo Schmidt) accionado por un resorte, y se impacta con una predeterminada cantidad de energía la superficie de concreto.
El procedimiento para ejecutar esta prueba es la siguiente: se sostiene firmemente la herramienta de manera perpendicular a la superficie, gradualmente se presiona el botón del instrumento para liberar el martillo. Posteriormente, de la misma manera

en la que se sostiene el aparato, se empuja hacia la superficie hasta escuchar un impacto ejercido por el artefacto, para luego bloquear el martillo con el mismo botón. Una vez bloqueado el martillo, se observa el valor dado en la escala. Se repite este proceso diez veces por área, y cada impacto debe darse con distanciamiento de 25 mm entre cada una. Para obtener el índice de rebote, se deben efectuar, aproximadamente diez impactos, si al menos dos lecturas difieren del promedio por 6 unidades, se debe volver a ejecutar la prueba.

Respecto a esta prueba, hay que tomar en cuenta que existen algunos factores que alteran el resultado del índice de rebote, estas son: el tipo de cemento, la edad de la superficie, el tipo de agregado y el tipo de superficie. Además, los resultados pueden variar si el concreto se encuentra seco, pues brinda resistencias más altas que las superficies húmedas. También, la carbonatación superficial en el concreto brinda resultados del índice de rebote más altos. En caso de una capa delgada de carbonato en el concreto, es necesario retirar la capa para la zona de prueba. Se debe considerar que, para comparar los resultados obtenidos, ambas pruebas deben ser realizadas utilizando la misma dirección de la herramienta, ya sea en dirección horizontal, vertical hacia arriba o vertical hacia abajo (ASTM C805).

Figura 12

Prueba ASTM C805



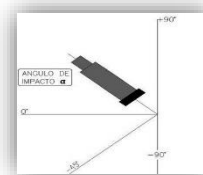
Nota. Figura tomada de *The Constructor* (s.f.)

Con la utilización del esclerómetro, y según la tabla de conversiones que se mostrará en la Tabla 3 se establecen las resistencias aproximadas tomadas en el campo.

Tabla 3

Tabla de conversiones resistencias tomadas en campo.

ANGULO DE IMPACTO α					
R	$\alpha-90^\circ$	$\alpha-45^\circ$	0°	$\alpha+45^\circ$	$\alpha+90^\circ$
20	125	115			
21	135	125			
22	145	135	110		
23	160	145	120		
24	170	160	130		
25	180	170	140	100	
26	198	185	158	115	
27	210	200	165	130	105
28	220	210	180	140	120
29	238	220	190	150	138
30	250	238	210	170	145
31	260	250	220	180	160
32	280	265	238	190	170
33	290	280	250	210	190
34	310	290	260	220	200
35	320	310	280	238	218
36	340	320	290	250	230
37	350	340	310	265	245
38	370	350	320	280	260
39	380	370	340	300	280
40	400	380	350	310	295
41	410	400	370	330	310
42	425	415	380	345	325
43	440	430	400	360	340
44	460	450	420	380	360
45	470	460	430	395	375
46	490	480	450	410	390
47	500	495	465	430	410
48	520	510	480	445	430
49	540	525	500	460	445
50	550	540	515	480	460



51	570	560	530	500	480
52	580	570	550	515	500
53	600	590	565	530	520
54	MÁS DE 600	MÁS DE 600	580	550	530
55	MÁS DE 600	MÁS DE 600	600	570	550

Nota. Tabla recuperada de Pdfslide (s.f)

- Practica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra:** En esta práctica se preparan cilindros y vigas de concreto fresco, que se pueden utilizar de dos maneras distintas en las pruebas. En caso de que las muestras se encuentren preparadas y curadas de la forma normalizada, se producen ensayos de aceptación para una resistencia especificada, control de idoneidad de dosificación de mezcla para resistencia y control de calidad. Ahora bien, si los especímenes están preparados y curados en obra, se producen ensayos para verificar si la estructura es apta para ser puesta en servicio. En estos ensayos, se comparan con los ensayos normalizados curados o con otros métodos realizados en campo, para verificar la idoneidad del curado y protección del concreto en la estructura, o también para revisar los requisitos del tiempo para retirar el encofrado (ASTM C31/C31M).

Figura 13

Prueba ASTM C31



Nota. Figura tomada de NPCA (s.f.)

- **Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto:** Consiste en la aplicación de cargas axiales a los especímenes cilíndricos a velocidades dentro de rangos determinados, hasta la aparición de la falla. El valor máximo de carga se divide entre el área de la sección transversal para la obtención de la resistencia a la compresión. Este último resultado se obtiene por varias razones: control de calidad en operaciones de dosificación, mezclado y colado del concreto; verificación del cumplimiento de las especificaciones; evaluación de la eficacia de los aditivos; entre otros usos (ASTM C39/C39M).

Figura 14

Prueba ASTM C39/C39M



Nota. Figura tomada de IMCYC (2006)

- **Especificación normalizada para cemento Portland:** En esta norma, se detallan los ocho tipos de cemento Portland, así como los requisitos físicos que los diferencian entre sí (ASTM C150).

Los tipos de cemento Portland según la norma INTECO C147 (2018) son:

Tabla 4

Tipos de Cemento Portland

Tipos	Denominación	Tipo/ Grado de sustitución	Clinker	Escoria de Alto Horno	Humo de Sílice	Puzolanas	Caliza	Componentes minoritarios adicionales
Tipo 1	Cemento Portland Ordinario (CPO)	Tipo 1	95 – 100	-	-	-	-	0 – 5
Tipo MP	Cemento Hidráulico con; Puzolana, Ceniza volante, Esquisto	MP / A	80 – 94	-	-	06 - 20	-	0 – 5
		MP / B	65 – 79	-	-	21 – 35	-	0 – 5
		MP / C	45 – 64	-	-	36 - 55	-	0 – 5
		MP / D	20 – 44	-	-	56 - 80	-	0 – 5
Tipo MC	Cemento Hidráulico con Caliza	MC / A	80 – 94	-	-	-	06 - 20	0 – 5
		MC / B	65 – 79	-	-	-	21 – 35	0 – 5
		MC / C	45 – 64	-	-	-	36 - 55	0 – 5
Tipo MM	Cemento Hidráulico Modificado Mixto	MM / A	80 – 94	06 – 20				0 – 5
		MM / B	65 – 79	21 – 35				0 – 5
		MM / C	45 – 64	36 – 55				0 – 5
		MM / D	20 – 44	56 – 80				0 – 5
		MM / E	5 – 19	81 – 95				0 – 5
Tipo ME	Cemento Hidráulico con Escorial de Alto Horno	ME / A	80 – 94	06 – 20	-	-	-	0 – 5
		ME / B	65 – 79	21 – 35	-	-	-	0 – 5
		ME / C	45 – 64	36 – 55	-	-	-	0 – 5
		ME / D	20 – 44	56 – 80	-	-	-	0 – 5
		ME / E	5 – 19	81 - 95	-	-	-	0 – 5
Tipo MF	Cemento Hidráulico con Humo de Sílice	MF / A	90 – 94	-	06 - 10	-	-	0 – 5

Nota. Tabla elaborada con base en la norma INTECO C147 (2018)

5.1. Análisis petrográfico

Una de las pruebas que se puede realizar para detectar patologías en el cemento es la siguiente:

- Método de prueba estándar para reactividad potencial álcali – sílice de agregados (método químico):** Este método de prueba determina químicamente si existe reactividad potencial de componentes silíceos de un agregado con los álcalis del cemento Portland. Para esto, se hace uso de una solución de hidróxido de sodio y

un agregado triturado para ser tamizado en una de 300 μ m y retenido en un tamiz de 150 μ m. La solución y el agregado se unen y se dejan reposar en un baño líquido por un período de tiempo, para después enfriarlos y filtrar la solución del residuo agregado, decantándolo al máximo. Una vez culminado lo anterior, se diluye el filtrado con una cantidad determinada de agua, ya que con eso se determina la reducción de alcalinidad y la sílice, por medio del método gravimétrico o método fotométrico (ASTM C289).

6. Mineralogía y propiedades de los minerales

6.1. Propiedades físicas de los minerales

Los minerales poseen propiedades físicas generales como: la formación de cristales y su forma externa. Con respecto a las propiedades físicas específicas, Duque (2017) menciona que son:

- **Crucero o clivaje:** Por efectos de presión, el mineral suele dividirse con una geometría definida. Este se califica según su grado: perfecto, bueno o imperfecto.
- **Fractura:** Se refiere al carácter que posee la superficie de rompimiento que muestra un mineral que no presenta partición.
- **Dureza:** Es la capacidad del mineral que permite dejarse rayar por otros minerales u objetos. Esto depende de la estructura cristalina.
- **Tenacidad:** Se define como la resistencia cohesiva del mineral a diversos tipos de esfuerzos. Se clasifica como frágil (si rompe), maleable (si se observan láminas), séctil (si es posible rebanarlo), dúctil (si posee hilos), flexible (si permite doblarse) y elástica (si es capaz de recuperar su forma inicial ante un esfuerzo realizado).
- **Peso específico:** También se le denomina gravedad específica. Corresponde al peso de la muestra al sumergirla en agua a 4 °C, utilizando un mismo volumen para ambos.

6.2. Propiedades ópticas de los minerales

De acuerdo con Duque (2017), los minerales cuentan con las siguientes propiedades ópticas:

- **Diafanidad:** Esta propiedad depende de la capacidad refractante del mineral. Si es coherente, el espécimen será transparente, pero si es incoherente la muestra será translúcida.
- **Brillo:** Corresponde al grado de reflexión de luz que perciben los elementos opacos. Si la reflexión es coherente, su brillo será máximo, es decir, metálico. No obstante, si la reflexión es incoherente, el brillo será nulo o mate.
- **Color:** El color de un mineral depende de la longitud de onda de la luz que ingrese al ojo humano, por lo que varían de claros a oscuros, en tonos de azul al rojo.
- **Espectro:** Se refiere a las diversas maneras en que se descompone la luz que se refracta oblicuamente, por lo que cada onda ingresa al mineral con diferente dirección.
- **Raya o huella:** Se relaciona con el color del polvo que desprende la muestra al ser rayada o triturada, sin mucha presión, con un elemento de porcelana áspera de color blanco.

6.3. Mineralogía química

Según Duque (2017), según su composición química, los minerales se agrupan de la siguiente manera:

- **Silicatos**

Tabla 5

Ejemplos de silicatos

Mineral	Composición	Características
Cuarzo	SiO ₂	Romboédrico o hexagonal, dureza 7
Anortita	Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	Miembro extremo Ca de las plagioclasas
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Miembro extremo Na en las plagioclasas

Nota. Tabla elaborada con base en Duque (2017)

- **Sulfuros**

Tabla 6
Ejemplos de sulfuros

Mineral	Composición	Características
Pirita	FeS ₂	Color amarillo de latón. Dureza 6,0 a 6,5.
Galena	PbS	Peso específico 7,4 – 7,6, y muy buena exfoliación.
Esfarelita	ZnS	Es el mineral de zinc más importante (blenda)

Nota. Tabla elaborada con base en Duque (2017)

- **Carbonatos**

Tabla 7
Ejemplos de carbonatos

Mineral	Composición	Características
Calcita	CaCO ₃	Dureza 3 y peso específico 2,6 – 2,8.
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	Un carbonato de calcio y magnesio.
Malaquita	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	Color verdoso y fractura concoidea.

Nota. Tabla elaborada con base en Duque (2017)

- **Sulfatos**

Tabla 8*Ejemplos de sulfatos*

Mineral	Composición	Características
Anhidrita	Ca (SO ₄)	Incoloro, blanco, gris, rojo o azulado.
Yeso	CaSO ₄ 2H ₂	Fractura concoidea y dureza 1,5 – 2,0.
Barita	BaSO ₄	Bario predominantemente hidrotermal.

Nota. Tabla elaborada con base en Duque (2017)

Figura 15*Tipos de minerales de la tierra*

E. Nativos	Sulfuros			Oxidos	Haluros	Carbonatos	Sulfatos	Silicatos	
Azufre	Blenda	Cinabrio	Goethita	Fluorita	Azurita	Baritina	Cuarzo	Cuarzo (Otros)	
Grafito	Pirita	Calcopirita	Magnetita	Silvina	Malaquita	Yeso (rosetas)	Ortosa	Granate	
Diamante	Galena	Marcasita	Pirolusita	Halita	Calcita	Yeso (especular)	Olivino	Ágata	
Mercurio	Rejalgar	Pirrotina	Corindón	Fosfatos	Dolomita	Yeso (Fibroso)	Micas	Turmalina	
Oro	Antimonita	Esfalerita	Oligisto	Apatito	Aragonito	Yeso (Rojo)	Talco	Pistacita	

Nota. Figura recuperada de *Didactalia* (s.f)

6.4. Propiedades químicas del agregado

Algunos agregados reaccionan químicamente con el cemento, esta reacción corresponde a: reacción álcali – agregado. Esta patología corresponde a la reacción de los álcalis del cemento con agregados silíceos (contienen óxidos de silicio en sus formas inestables reaccionando con los hidróxidos alcalinos del cemento, obteniendo como resultado la producción de un gel que aumenta su volumen conforme su absorción del agua) y agregados carbonatados, que son menos comunes que el álcali-sílice (Gutiérrez,2003).

6.5. Propiedades mecánicas del agregado

Tabla 9

Propiedades mecánicas del agregado

Propiedad	Descripción
Resistencia	Se encuentra relacionado con la resistencia del concreto. La resistencia del agregado es influenciada por la estructura de los granos de la partícula, explotación o el proceso de trituración.
Tenacidad	Se refiere a la resistencia al impacto, si el agregado resulta débil al impacto altera su granulometría.
Adherencia	Es una característica importante, debido a que la resistencia y durabilidad dependen de la relación entre el agregado con el cemento utilizado en el concreto hidráulico.
Dureza	Se define como la resistencia al desgaste y roce del agregado. Corresponde a la norma ASTM C131.
Salinidad de los agregados	Es la resistencia a cambios excesivos de volumen debido al intemperismo, la cual depende de su granulometría, porosidad, forma y procedencia. Se detalla esta propiedad en la norma ASTM C88.

Nota. Tabla elaborada con base en Gutiérrez (2003) y normas ASTM

6.6. Propiedades físicas del agregado

Tabla 10*Propiedades físicas del agregado*

Propiedad	Descripción
Granulometría	Corresponde a la norma ASTM C33 y ASTM C136.
Forma de las partículas	Esta propiedad corresponde a la norma ASTM D2488.
Textura	Propiedad que define si el agregado se encuentra con una característica física lisa o pulida, o áspero. Se determina que el agregado que es liso o pulido corresponde a material de río, mientras que el áspero es el material triturado. Esta propiedad influye en la dureza, tamaño, forma y estructura de roca original.
Densidad	Esta propiedad se relaciona con las normas ASTM C127 y en ASTM C128.
Porosidad y absorción	Se menciona esta propiedad en ASTM C128.
Peso unitario	Propiedad descrita en la norma ASTM C29 M.
Expansión	Se refiere al hinchamiento del agregado fino, y con ello el aumento de volumen para una muestra determinada cuando se encuentra alrededor de agua libre. Esta propiedad influye en el transporte y almacenamiento del agregado fino.

Nota. Tabla elaborada con base en Gutiérrez (2003)

7. Nomenclatura descriptiva para los constituyentes de agregados de concreto

Según el ASTM C294, las rocas son clasificadas de acuerdo con su origen. En este sentido, serían de tipo: ígneo (material fundido proveniente sobre o debajo de la superficie de la tierra), sedimentario (roca que se aproxima a la superficie de la tierra debido a la acumulación de rocas existentes por meteorización, erosión o precipitación química directa) y metamórfico (proviene de roca ígnea preexistente, sedimentaria o metamórfica debido al calor, la presión o ambas).

De acuerdo con ASTM C294, los constituyentes minerales de los agregados naturales son los siguientes:

- **Minerales de sílice:** Entre estos minerales se encuentra el cuarzo, componente importante en arenas, gravas y areniscas. Un cuarzo microcristalino o intensamente fracturado, puede ser potencialmente reactivo con los álcalis en las pastas de cemento hidráulico, ópalo, tridimita y cristobalita. y calcedonia. El mineral ópalo es un potencial reactivo en el concreto hidráulico debido a la reacción con los álcalis del cemento.
- **Feldespatos:** Minerales formadores de rocas en la corteza terrestre, por lo que son importantes constituyentes en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Los diversos miembros del grupo se distinguen por sus propiedades cristalográficas y por su composición química. Los feldespatos ortoclasa, sanidina y microclina corresponden a feldespatos de potasio, mientras que el feldespato plagioclasa incluye silicatos de aluminio y sodio, o también ambos sodios y silicatos de calcio y aluminio. Es importante destacar que los feldespatos de potasio son encontrados en rocas ígneas como granitos y riolita, y los feldespatos plagioclasa se encuentran en las rocas ígneas, pero con un bajo contenido de sílice como las diorita, gabro, andesita y basalto.
- **Minerales micáceos:** Estos minerales se diferencian según su color. Los moscovitas pueden ser incoloros, o bien tener un color verde claro. La biotita tiene una tonalidad que va del color café oscuro hasta negro o verde oscuro. Las lepidolitas tienen una coloración que va del blanco, al rosado o al amarillo. Las coritas presentan varias tonalidades de verde. La flogopita tiene un brillo perlado y color bronce. Estos minerales son fácilmente encontrados en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- **Minerales ferromagnesianos:** Se encuentra presente en grupos como anfíbol, piroxeno y olivino. Estos minerales son reconocidos por sus colores, que van del verde oscuro al negro.
- **Minerales carbonatados:** El mineral más común es la calcita o carbonato de calcio (CaCO_3), mientras que la dolomita corresponde a la reacción entre calcita y carbonato de magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.
- **Minerales de sulfato:** Las lutitas y las rocas carbonatadas pueden contener sulfatos como elemento impuro. Entre los minerales de sulfato se encuentra el gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (CaSO_4).

- **Zeolitas:** Corresponde a un gran grupo de silicatos de aluminio hidratados de los elementos alcalinos y alcalinotérreos. Las zeolitas se encuentran entre las cavidades o fisuras en rocas ígneas, o también en el interior de la roca, a causa de la modificación hidrotermal de minerales originales (principalmente los feldespatos). Cabe destacar que las zeolitas como: la heulandita, natrolita y laumontita, causan efectos deletéreos en el concreto, en donde las primeras dos se reconocen por aumentar la reactividad de los álcalis, mientras que los otros destacan por su cambio de volumen por la humectación y secado.
- **Minerales de arcilla:** Mineralógicamente, arcilla se refiere a un grupo de minerales de silicato con capas de arcillas – micas, grupo de caolín, cloritas finamente divididas y las arcillas hinchables – esmectita, tomando en cuenta las montmorillonitas. Los minerales de arcilla corresponden a silicatos de aluminio, magnesio y hierro hidratados que usualmente pueden contener magnesio, calcio, potasio, sodio y otros cationes reemplazables. Los anteriores son originados por la meteorización y variación de otros silicatos y vidrios volcánicos, y son los constituyentes de las arcillas y lutitas, agregado ígneo y metamórfico.
- **Minerales de sulfuro de hierro:** Los sulfuros de hierro se encuentran en diversas rocas. El sulfuro de piritita se encuentra en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas; el sulfuro de pirrotita se encuentra en rocas ígneas y metamórficas; mientras que la marcasita se presenta en rocas sedimentarias. La marcasita y algunos tipos de pirrotita y piritita son reactivos con el concreto, obteniendo como resultado manchas cafés con incremento de su volumen por las ampollas producidas.
- **Minerales de óxido de hierro, anhidros e hidratados:** Algunos minerales comunes son magnetita, hematita, goetita e ilenita.

8. Rocas ígneas



Según el ASTM C294, las rocas ígneas son originadas por medio del enfriamiento del magma. Este tipo de roca se encuentra dividida en dos tipos: plutónicas o intrusivas (rocas que se enfrían en el interior de la tierra), y volcánicas o extrusivas (rocas formadas por el enfriamiento rápido de la lava). La diferencia entre estas dos clases es su tamaño: las intrusivas contienen un tamaño mayor a 1 milímetro, mientras que las extrusivas poseen un tamaño menor a 1 milímetro.

Dentro del grupo de las rocas intrusivas se encuentran: granito (compuesto por feldespato de potasio, feldespato de plagioclase y cuarzo), sienita (compuesto por álcali feldespatos y minerales de ferromagnesio), diorita (compuesto por feldespato plagioclase y minerales ferromagnesio), gabro (se compone de feldespato plagioclase y minerales ferromagnesianos), periodita (formado de olivino y piroxeno), y pegmatita (ASTM C294, p.4).

De acuerdo con el ASTM C294, las rocas ígneas extrusivas vítreas y de grano fino se encuentran: las rocas volcánicas, las rocas volcánicas vítreas (podrían contener vidrio de sílice, lo cual es álcali-reactivo para el concreto), vidrio volcánico, felsita (entre este grupo están riolita, andesita y dacita), basalto (tiene bajo contenido de sílice, por lo tanto, no es deletéreamente reactiva con los álcalis del cemento hidráulico).

Figura 16

Rocas Ígneas

ROCAS	PLUTÓNICAS (grano grueso)						
	VOLCÁNICAS (grano fino)					Son muy poco frecuentes con estas características	
CARACTERÍSTICAS	COLOR	Predominan minerales claros				Predominan minerales oscuros	
	COMPOSICIÓN QUÍMICA	Altas en sílice				Bajas en sílice	
	MINERAL	Bajas en Fe y Mg				Altas en Fe y Mg	
		CUARZO	FELDESPATO	SILICATOS FERROMAGNESIANOS			

Nota. Figura tomada de *Geología* (2015)

- **Agregados de Tajo Chopo:** El tajo Chopo, también llamado Anunciación, se ubica a 6 kilómetros al norte de Cañas, en la provincia de Guanacaste. Este cerro

contiene roca piroclástica (o roca volcánica), de color rojo marrón, causado por la presencia de óxido de hierro. Este tipo de agregado se emplea para construcción: ya sea para el diseño de una carretera o también para el concreto, ya que se ha sometido a pruebas de resistencia y también ha cumplido con los requisitos establecidos por las normas ACI 211.1 y ACI 221.2 (Solano, 2003).

Figura 17

Piedra Chopo



Nota. Figura tomada de Solano (2003)

- **Roca granito:** La roca granito posee las siguientes características ópticas: predomina el color rojizo, aunque también puede presentarse en color gris claro, negro (es el gabro pulido), rosado o blanco. Es utilizado como agregado grueso para construcciones, sin embargo, no es tan empleado debido a su alto costo (Pozo, González y Giner, 2004).

Figura 18

Textura del granito ígneo



Nota. Figura tomada de *Geología web* (s.f.)

Por otro lado, la roca diorita posee características ópticas como su color que se distingue por poseer tonalidades de gris, ya sea oscuro o claro (ver Figura 9). Por su parte, la roca gabro, posee características similares al granito por su textura fanerítica, sin embargo, el gabro tiene tonalidades grises, en un rango de oscuro a verdoso, e incluso negro (Pozo, González y Giner,2004). La roca riolita, corresponde a un agregado con textura afanítica, es decir, que posee cristales con tamaños menores a 1 mm, y es una de las más comunes. En cuanto a su coloración, posee una tonalidad de gris claro a blanco (ver Figura 9).

En el caso de la roca basalto, su característica óptica corresponde a una tonalidad de gris oscuro a negro con tonalidades verdosas debido a su composición química, como se puede observar en la Figura 9 (Pozo, González y Giner,2004). También posee textura áspera y con brillo opaco. (Plascencia, 2000) Por último, la roca toba es una roca volcánica que presenta las siguientes tonalidades: verdosas, blancas, rojizas, cremas, amarillentas y cafés. Debido a su alto contenido de sílice, su inestabilidad y su baja dureza, la toba no es apta para obras ingenieriles. (Pozo, González y Giner,2004).

Figura 19

Roca Toba



Nota. Figura tomada de *Geología web* (s.f.)

9. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias corresponden a rocas compuestas por rocas preexistentes, generadas a partir de agentes mecánicos u origen orgánico o químico. Estas rocas se unifican por medio de la compactación durante el tiempo geológico. Entre las rocas sedimentarias se encuentran: la grava y arenas gruesas que usualmente son conformadas por fragmentos de roca; las arenas finas y limos corresponden normalmente a granos minerales; por último, la arcilla que se compone únicamente de granos minerales (ASTM C294).

Los conglomerados, areniscas y cuarcitas, se conocen como partículas de arena o grava. Las areniscas contienen cuarzo, ópalo, calcita, dolomita, arcilla, dolomita, óxido de hierro otros materiales. Ahora bien, se habla de cuarcitas cuando el agregado es atravesado y gran parte es cuarzo, mientras que la piedra arenisca se compone de las partículas que se rompen alrededor de los granos de arena. (ASTM C294, p.5) Se considera que el cuarzo, calcita, ópalo, arcilla, dolomita, hierro, óxidos y otros influyen en la calidad como agregado para concreto. (ASTM C294, p.5).

Las piedras de arcillas, argilitas, lutitas y limolitas pertenece a las rocas sedimentarias, y cada una se diferencian por su tamaño. Algunas argilitas son álcali – sílice reactivos (ASTM C294, p.5-6). En las rocas sedimentarias se categoriza también las rocas carbonatadas. La piedra caliza es la más conocida dentro de este grupo. La caliza se compone del mineral calcita y dolomitas puras usualmente, pero si la roca contiene del 50% hasta el 90% del mineral dolomita, el elemento es denominado dolomita calcítica (ASTM C294, p.6).

De acuerdo con la norma ASTM C294, la mayoría de las rocas carbonatadas contienen minerales de arcilla, esquisto, cuarzo, gypsum, materia orgánica y sulfuros. La reacción de la dolomita con algunos agregados carbonatados de los álcalis del cemento hidráulico da como resultado la expansión dañina en el concreto, esto debido a su textura (cristales de dolomita en forma de rombo) y a su composición (cantidades sustanciales de calcita y dolomita).

Además, se tiene que el esquisto es de grano fino, compuesto por microcristalino o cuarzo criptocristalino, ópalo, calcedonia o combinaciones en diferentes proporciones. En la mayoría de este tipo de rocas se ha encontrado la presencia de álcali – sílice reactiva, produciendo expansión en el concreto. (ASTM C-294). Por otra parte, la roca yeso posee características como su color blanco, dureza baja por lo que puede ser rayado con una uña, y su

flexibilidad. Debido a su dureza baja y poca resistencia el yeso no es recomendado para obras ingenieriles (Pozo, González y Giner,2004).

Figura 20

Yeso



Nota. Figura tomada de Alamy (2010)

La roca dolomía posee características físicas como su color: blanco, rosa, verde, marrón, negro o gris (Pozo, González y Giner,2004).

Figura 21

Roca dolomía



Nota. Figura tomada de Dorronoso (s.f.)

Por otro lado, la roca caliza posee tonalidades como pardo, rosa, blanco, incoloro, amarillo y gris, con un brillo opaco a cristalino. La diferencia con la dolomita es que esta posee un brillo cristalino (García, 2004).

Figura 22

Caliza



Nota. Figura tomada de *Minería en línea* (s.f.)

Figura 23

Carbón



Nota. Figura tomada de *Geología web* (s.f.)

La margas es un recurso que se utiliza para la fabricación de cementos, tiene un aspecto similar a la arcilla y se puede encontrar en diversos colores como: el blanco, en tonos grisáceos o amarillentos (Sanjuán y Chinchón,2004).

Figura 24*Marga*

Nota. Figura tomada de *Alamy (2016)*

Figura 25*Conglomerado*

Nota. Figura tomada de *Ingeoexpert (2020)*

La arenisca posee diversas texturas. La textura que posea depende de si se encuentran bien sorteadas (conformada por minerales como el cuarzo, feldspatos y granates) o pobremente sorteadas (alto porcentaje de minerales arcillosos), por tanto, dependen de su depósito sedimentario. Este tipo de roca posee colores café, blancos, rojos o rojizos, amarillos y grisáceos (Pozo, González y Giner,2004).

Figura 26

Arenisca



Nota. Figura tomada de *Meteorología en red* (s.f.)

La roca lutita, posee características visuales como su color, que puede ser: negro, diferentes tonos de gris, rojos o rojizos, marrón o amarillento y verde. De acuerdo con su composición mineralógica, su color varía. Suelen tener un tamaño de arcilla, es decir, menor al 0,002mm (Pozo, González y Giner,2004).

Figura 27

Lutitas



Nota. Figura tomada de *Geología Web t* (s.f.)

10. Características físicas de las rocas ígneas y sedimentarias

Tabla 11

Características físicas de las rocas ígneas y sedimentarias

	Tipo de roca y origen	Nombre	Componentes mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto
Ígneas	Plutónicas	Granito	Cuarzo, feldespatos, mica y plagioclase	Fanerítica	Batolitos cuerpos intrusivos	Fácilmente intemperizable en clima tropical, intemperismo esferoidal
		Diorita	Plagioclase y mica	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	-
		Gabro	Plagioclase y mica	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	Alto peso específico
	Volcánicas piroclásticas	Riolita	Cuarzo, feldespato, plagioclase, vidrio y mica	Afanítica porfídica	Domos flujos de lava	Altamente reactiva con los álcalis del cemento
		Andesita	Plagioclase, vidrio y mica	Afanítica porfídica	Derrames de lava	-
		Basalto	P1, V y M	Afanítica vesicular	Derrames de lava	Alta resistencia a la compresión, porosa y resistente a la abrasión

		Tobas	Variable	Porfídica	Pseudoestratificación	Dependiendo de la mineralogía pueden ser reactivas y algunas son muy deleznable.
	Tipo de roca y origen	Nombre	Componentes mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto
Sedimentarias	Clásticas	Conglomerado	Fragmentos de roca y matriz	Fragmentos redondeados 2mm de diámetro	Estratificación gruesa, lentes rellenos de causes, masiva	-
		Arenisca	Qz, Pk, p1 y fragmentos de roca	Fragmentos 2mm a 1/16mm de diámetro	Estratificación masiva lentes	Puedes contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento
		Lutita	Materiales arcillosos	Fragmentos 1/6mm de diámetro	Laminaciones masivas	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión. Puede hidratarse a través de los materiales arcillosos
	No clásticas	Caliza	Calcita	Cristalina	Estratificación masiva	Altamente soluble
		Marga	Calcita y minerales arcillosos	Cristalina	Estatificación	Sus minerales arcillosos pueden hidratarse fácilmente
		Dolomita	Calcita y dolomita	Cristalina	Estratificación masiva	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato (a través de la desdolomitación)


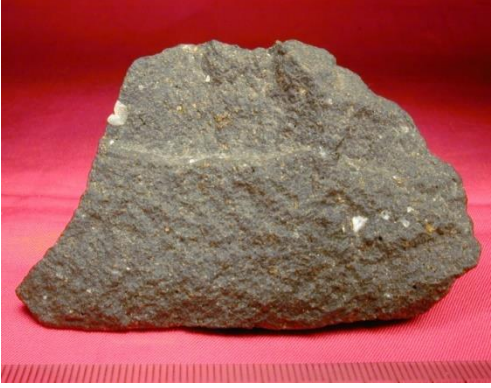
	Yeso	Yeso anhidrita	Cristalina	Vetas y lentes	Muy ligero, baja resistencia a la abrasión Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento Portland.
	Carbón	Carbón	Criptomicrocristalina	Mantos, vetas, lentes	

Nota. Tabla elaborada con base en Chan et al. (2003)

En la siguiente tabla se puede apreciar una comparación entre la roca caliza, que es de tipo sedimentario y la roca basalto, que es de tipo ígneo.

Tabla 12

Características comparativas entre roca caliza (sedimentario) y roca basalto (ígnea)

CALIZA	BASALTO
	
Densidad: 2,6 a 2.8 ton/m ³	Densidad: 2,9 a 3 ton/m ³
Química: CaCO ₃ (56,2% CaO y 43,8% CO ₂).	Química: 49,2% SiO ₂ , 15,74% Al ₂ O ₃ , 7,13% FeO, 97,47% CaO, 2,91% Na ₂ O, 1,1% K ₂ O.

Descripción: Altamente soluble y químicamente pura.	Descripción: Es de color gris oscuro, se caracteriza por tener altas resistencias a la compresión mayores a 400 N/mm ² . Tiene excelente comportamiento Mecánico y mucha durabilidad.
Origen: Sedimentario	Origen: Ígneo extrusivo
Uso: Árido mineral, cal aérea para cemento	Uso: Agregado grueso
Estabilidad Química: Muy Buena	Estabilidad Química: Muy Buena
Restricciones: Si es dolomitada se forma el mineral Periclasa (MgO) que se hidrata fácilmente con gran aumento de volumen	Restricciones: Los Basaltos son altamente sensibles a la insolación, por lo que el tamaño de partícula como agregado grueso debe ser similar al tamaño del grano de la desintegración natural para evitar la pérdida de presiones internas.
Reactividad: Como agregado corre peligro de alcalireactividad perjudicial debido a defectos en la red cristalográfica.	Reactividad: Alcalireactivo pero en mucho menor grado que la Caliza .
Efectos en el concreto: Con la admisión del agua produce gel de silicato alcalino que provoca hinchamiento y provoca microfisuramiento en el concreto inclusive en la zona de Interfase.	Efectos en el concreto: Los concretos expuestos a la insolación, presentan pérdida de Resistencia, producto del agrietamiento del concreto, como mecanismo de falla frágil.

Nota. Fuente de la tabla: Ing. Oscar Calvo Carranza

11. Zona de interfase cemento-agregado

La microestructura, según Mehta, y Monteiro (2013), se define como la porción microscópica de la macroestructura. Siendo la macroestructura, la porción de la estructura de concreto que puede ser visible para el ojo humano. Por lo tanto, a nivel macroscópico, el concreto corresponde a una matriz de pasta de cemento con partículas de agregado grueso dispersas en toda su matriz, mientras que, a nivel microscópico, se logran observar las complejidades del concreto debido a que este no es un material homogéneo y puede presentar zonas en donde la mezcla sea tan densa como el agregado y otras en donde la mezcla sea más porosa.

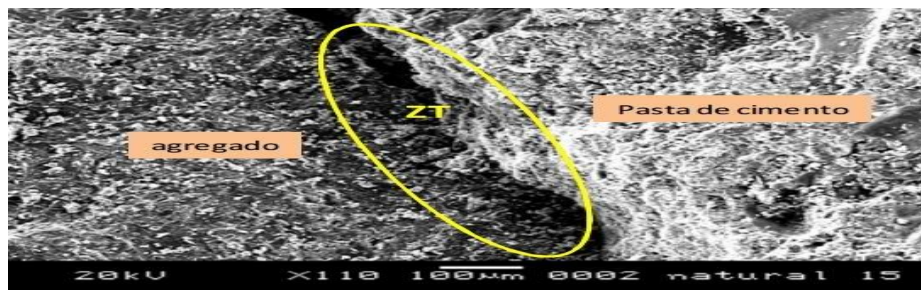
Microscópicamente, la cercanía entre el agregado grueso y la estructura de la pasta de cemento Portland hidratado suele ser distinto a todo el sistema. Esta zona es llamada zona de transición. La zona de transición representa el área de interfase entre las partículas de agregado grueso y la pasta de cemento Portland hidratado, cuyo espesor corresponde entre 10 y 50 micrómetros, y es la zona más débil, por lo tanto, genera mucha influencia en el comportamiento mecánico en el concreto (Mehta, y Monteiro,2013, p.23-24).

La razón por la que la zona de interfase es la zona más débil es porque se caracteriza por presentar una mayor relación de agua/cemento en comparación con el resto del volumen de la pasta, a causa de la exudación superficial de las caras de las partículas del agregado, obteniendo una zona más porosa con un alto contenido de CH o hidróxido de calcio (Diamond,2004). El hidróxido de calcio se compone cristales que forman parte del 20-25% del volumen de los sólidos de la pasta hidratada (Mehta, y Monteiro,2013, p.26). En esta zona, debido a la aplicación se produce el micro agrietamiento, y con el incremento de cargas se genera el momento de falla. (Neville, 1997).

Es importante destacar que la piedra caliza posee una desventaja con respecto a la zona de interfase, pues se caracteriza por ser altamente porosa y presenta manchas cafés. Lo anterior implica la disminución de adherencia a edades tempranas en el concreto, pero a mayor edad, esos poros se saturan con productos de reacción posteriores, aumentando la fuerza de adherencia (Tasong, Lynsdale y Cripss, 1999).

Figura 28

Zona de interfase



Nota. Figura tomada de Rodríguez (2009)

12. Fuentes del álcali

El cemento de Portland es uno de los principales materiales en los que se puede encontrar la presencia de álcalis, sin embargo, existen otros materiales que también pueden estar constituidos por álcalis adicionales que aportan a la reacción. De acuerdo con Thomas et al. (2013), estos son algunos de esos materiales:

- Materiales de cementación suplementarios como cenizas volantes, humo de sílice, puzolanas naturales y escoria.
- Agregados.
- Aditivos químicos.
- Fuentes externas como agua de mar y sales de deshielo.
- Agua de lavado (en caso de ser empleado).

13. Reacciones de álcali-agregado

Se define como una reacción en el concreto o mortero entre los álcalis del cemento Portland, es decir: el sodio y el potasio, así como ciertos componentes de determinados agregados (ACI 116R, p.6). Existen dos tipos de álcali – agregado, según su componente reactivo: álcali – sílice y álcali – carbonato. El álcali – sílice requiere de minerales silíceos (SiO_2) para su desarrollo, y el álcali – carbonato involucra agregados con minerales dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Ambas reacciones afectan al concreto negativamente, provocando expansiones y agrietamiento cuando se encuentran en contacto con la humedad, por lo que disminuye la vida útil de la estructura de concreto (ASTM C1778). Cabe destacar que para que la reactividad álcali – agregado se encuentre presente en la estructura, se deben considerar los siguientes aspectos, según la norma INTE C278 (2020):

- Edad: Las variables a analizar deben ser como mínimo 15 años de antigüedad, debido a que la reacción álcali – agregado toma hasta más de 10 años en desarrollarse.
- Contenido alcalino del concreto.
- Condición de exposición: Humedad presente.

- Síntomas de deterioro.

Según Stanton (2008), esta patología fue descubierta en California en la década de 1930, por medio de la expansión de las barras de mortero, que fueron causadas por la humedad y la temperatura, y también por los contenidos de álcali del cemento, el tipo, y la sílice reactivo presente en el agregado. Además, expresó que la expansión es despreciable cuando la cantidad del álcali del cemento es menor al 0.60% de álcalis (o Na₂Oe), y este puede reducirse con la utilización de puzolanas como medida preventiva.

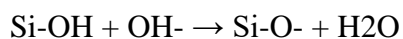
Hoy en día, se tiene documentado sobre la reacción química, cuáles factores benefician a la reacción y expansión, los diversos métodos de prueba en agregados, y las estrategias para evitar la expansión. Gracias a esto, se pueden implementar una serie de especificaciones para capacitar al personal con respecto a las medidas preventivas y determinación de materiales aptos para garantizar una obra duradera. (Thomas et al.,2012, p.4)

13.1. Reacción álcali- sílice

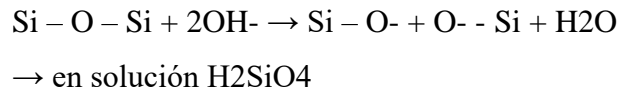
De acuerdo con Segarea (2005) a la hora de fabricar concreto e hidratar el cemento de Portland, se genera una solución que contiene: hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El primer componente, se encuentra cristalizado; mientras que los otros dos se encuentran presentes en la solución. Ahora bien, la reacción de álcali-sílice se da cuando la disolución alcalina de los poros del concreto y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan y forman un gel, que, aumenta de volumen conforme absorbe agua. Este gel, puede ejercer una gran presión de imbibición durante el proceso expansivo, sobrepasando la resistencia a tracción del concreto (p.12).

Según el boletín del ICOLD, hay dos reacciones que se producen:

- La primera, corresponde a reacción ácido – base, cuando los grupos silanol (Si-OH) se neutralizan por la solución alcalina hidróxido de sodio (NaOH).



- En la segunda reacción, ocurren ataques de puentes de siloxeno por la solución alcalina, dando como resultado la división de la estructura y el paso de la sílice en solución al estado de iones positivos (H₂SiO₄).



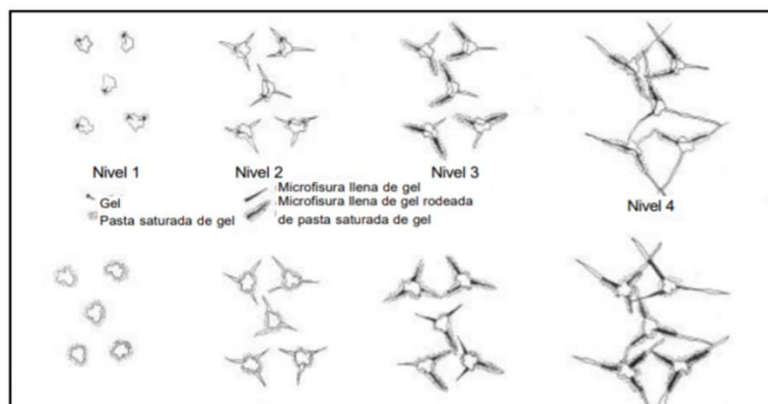
Según Thomas et al. (2013, p.9), la reacción álcali – sílice es una reacción en la que participan los hidróxidos alcalinos presentes en los poros del concreto y algunos minerales de sílice que componen el agregado utilizado. El resultado de esta reacción es la producción de un gel sílice alcalino con cantidades diversas de calcio. Este gel tiene la característica de absorber agua para luego hincharse. Para que la reacción anterior se ejecute, se deben presentar condiciones específicas, las cuales son:

- Cantidad de sílice reactivo en agregados: El tamaño del agregado reactivo influye en la cantidad de sílice reactiva en la superficie
- Contenido de álcali en el cemento Portland.
- Humedad. Un elemento sólido y húmedo puede atacar al concreto (ACI 515.1R)

La ausencia de alguna de las anteriores previene la aparición de esta reacción en el concreto. Sobre la temperatura, el ACI 515.1R (p.7), menciona que cuando esta aumenta, la humedad se reduce, provocando que el concreto se seque, por tanto, sea más permeable a fluidos adicionales.

La expansión causada por la reacción álcali-sílice se presenta por presión osmótica, por lo tanto, es necesario la presencia de las condiciones específicas mencionadas anteriormente en cantidades significativas. A continuación, se mostrarán los niveles de agrietamiento debido al álcali – sílice según Hoobs (1988):

- Nivel 1: El gel silicato alcalino induce fuerzas internas, generando presión en el concreto, sin embargo, no se producen microfisuras.
- Nivel 2: Las presiones ejercidas por el gel incrementan causando microfisuras en la proximidad del agregado reactivo.
- Nivel 3: El gel se establece en las microfisuras, aumentando las fuerzas internas.
- Nivel 4: Las fuerzas internas son lo suficientemente grandes para generar expansiones en el concreto.

Figura 29*Niveles de fisuración del concreto*

Nota. Figura tomada de Hoobs (1988)

13.1.1. Granulometría

La cantidad de sílice que reacciona con los álcalis del cemento depende de la superficie del agregado, por ende, del tamaño de este. Cuanto mayor sea la superficie del agregado, mayor es la cantidad de sílice disponible, y la expansión del concreto irá aumentando (Mehta y Gerwick, 1982).

13.1.2. Tipos de sílice reactivo

A continuación, se mostrarán los componentes silíceos reactivos que tienen posibilidad de estar presentes en los agregados, según el ACI 201.2R:

Tabla 13

Componentes silíceos reactivos que pueden estar presentes en los agregados

Sustancia reactiva	Composición química	Naturaleza física
Ópalo	$\text{SiO}_2 \cdot \text{NH}_2\text{O}$	Amorfa
Calcedonia	SiO_2	Microcristalina a criptocristalina; generalmente fibrosa
Ciertas formas de cuarzo	SiO_2	(a) Microcristalina a criptocristalina

		(b) Cristalina, pero intensamente fracturada, bajo tensión y/o llena de inclusiones
Cristobalita	SiO ₂	Cristalina
Tridimita	SiO ₂	Cristalina
Riolita, dacita, latita o andesita	Silíceos, con proporciones menores de Al ₂ O ₃	Vítrea o criptocristalina
Vidrio o productos de la desvitrificación criptocristalina	FeO ₂₂ , tierras alcalinas y álcalis	Materiales como la matriz de las rocas volcánicas o los fragmentos de las tufas
Vidrios silíceos sintéticos	Silíceos, con proporciones menores de álcalis, alúmina, otras sustancias o todo lo anterior	Vítrea

Las rocas más perjudiciales en términos de la reacción álcali – sílice (es decir, las rocas que contienen una o más de las sustancias listadas en la tabla anterior) son las siguientes:

Esquistos opalinos

Esquistos calcedonios

Esquistos cuarcíticos

Calizas silíceas

Dolomitas silíceas

Riolita y tufas

Dacitas y tufas

Andesitas y tufas

Esquistos silíceos

Filitas

Concreciones opalinas

Cuarzos y cuarcitas fracturados, bajo tensión o llenos de inclusiones.

Nota. Tabla tomada de ACI 201.2R

Según Thomas, et al (2013, p.18), aparte del examen petrográfico para detectar los minerales reactivos, se pueden utilizar otros métodos para determinarlos, tales como el ASTM C295, ASTM C289, ASTM C227, y ASTM C856.

Para Stanton (2008), existen algunos minerales pobremente cristalinos o amorfos como: la cristobalita, ópalo, vidrios volcánicos y artificiales. Estos minerales tienen la capacidad de reaccionar rápidamente, aunque se encuentren en cantidades pequeñas como el 1% y causan un efecto dañino en pocos años en la estructura. En cambio, los minerales como el cuarzo criptocristalino, microcristalino o deformado desarrollan su reacción de manera más lenta, por lo tanto, tardan más años en producir su daño.

Realmente es complicado clasificar la reactividad de los agregados basándose únicamente en la mineralogía, a causa de los diversos minerales reactivos deletéreos que lo componen. Sin embargo, hay otros factores que pueden influir en la presencia de daños en el concreto, por ejemplo: el tamaño de la partícula. Respecto a esto, Stanton (2008), realizó pruebas de barras de mortero con agregados de diferente tamaño, cuyo resultado fue una expansión a edades más tempranas para agregados de tamaños de 180-600 micrones que para los agregados con tamaños mayores.

13.1.3. Síntomas de la reacción álcali-sílice

Como mencionan Thomas et al. (2011) cuando las tres condiciones definidas anteriormente se presentan en el concreto para iniciar y mantener la reacción álcali – sílice, visualmente ocurren ciertos síntomas:

- **Agrietamiento:** Se encuentra influenciado por la forma del concreto, la presencia y disposición del concreto, las condiciones ambientales y las cargas aplicadas al concreto. Es común encontrar un patrón de agrietamiento en forma de mapa. Una complicación que causa este patrón de fisuramiento es que se puede confundir con los ciclos de congelación y descongelación, ataque de sulfato y contracción por secado.

Muchas veces se puede apreciar un descoloramiento en las grietas, a causa de la exudación del sílice.

Figura 30

Agrietamiento del álcali-sílice



Nota. Figura tomada de *ABQ* (s.f.)

- **Expansión:** Causa deformación, movimiento relativo y desplazamiento. Se refiere al movimiento de elementos estructurales adyacentes y a la deflexión, cierre de juntas por compresión y desprendimiento superficial del concreto. Con respecto a las deformaciones, es válido mencionar que la causa de estas son las cargas, efectos de gravedad, movimientos térmicos o por humedad, presión hidráulica, y vibraciones.

Figura 31

Agrietamiento, expansión, movimiento relativo y desplazamiento



Nota. Figura tomada de *Notas de Concretos* (s.f.)

- **Trituración localizada del concreto**
- **Extrusión de material de juntas (sellador)**
- **Salientes emergentes de superficie (Pop- Outs):** Es la expansión del concreto, cerca de, o directamente sobre la superficie del concreto, producida por las heladas, o también, por una deficiente unión entre el mortero y el agregado grueso.

Figura 32

Pop-Outs



Nota. Figura tomada de *NRMCA* (s.f.)

- **Decoloración de la superficie y exudaciones de gel:** La exudación del gel es un indicativo de la aparición de la patología álcali – agregado, sin embargo, no es la única señal generada, debido a que existen otros indicativos como: el movimiento de aguas sobre elementos de concreto agrietados y la acción de las heladas, que provocan eflorescencias.

Figura 33

Exudación de gel marrón



Nota. Figura tomada de *US Department of Transportation* (2006)

Figura 34

Exudación de gel blanco



Nota. Figura tomada de *Milanesi et al.* (s.f.)

13.2. Reacción álcali-carbonato

Como mencionan Thomas et al. (2013), la reacción álcali- carbonato pertenece a una reacción entre los hidróxidos de álcali, es decir, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio,

ubicados en los poros del concreto, y algunas rocas de carbonato, en específico la dolomita calcítica y calcitas dolomíticas. Esta reacción tiene como resultado la desdolomitación y la expansión del agregado, provocando expansión en las partículas de agregado afectadas y, por ende, expansión en el mortero (p.197).

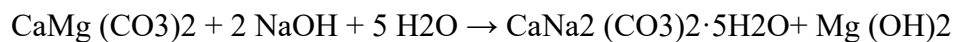
Se caracteriza a las rocas reactivas de carbonato alcalino como elementos con textura y características que contienen dolomita (romboedros de 10 a 50 micrómetros) ubicados a lo largo y ancho del agregado o “flotando” en una matriz de grano fino de arcilla, calcita fina y usualmente sílice. Es común encontrar cantidades de calcita, dolomita y residuo insoluble (ácido clorhídrico) en la composición carbonato – mineral. (Thomas et al.,2013, p.198)

13.2.1. Química de la reacción álcali- carbonato

En calizas dolomíticas ocurre el proceso de desdolomitización, el cual se explica a continuación: la dolomita presente en el agregado reacciona con el hidróxido alcalino, y produce calcita (CaCO_3), brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) y carbonato alcalino que puede contener sodio o potasio (Thomas et al.,2013, pp.200-201). A continuación, la reacción química de desdolomitización, de acuerdo con Tang et al. (2000):



O también:



Indican con Tang et al. (2000) que, al producirse la brucita, se debilita la pasta de cemento y la zona de interfase, por lo que el agua ingresa con fluidez.

En lo que respecta al proceso de expansión a causa de la reacción álcali-carbonato, se han propuesto varias teorías que buscan brindar una explicación, por ejemplo:

- Reacción entre los álcalis del cemento Portland, potasio y sodio, con algunas rocas carbonatadas, especialmente, la dolomita calcítica y calizas dolomíticas presentes en ciertos agregados. El resultado de esta reacción corresponde la

expansión o fisuración anormal del concreto bajo condiciones de servicio. (ACI 116, p.6)

- Hinchazón de la matriz de arcilla: Se menciona que en la desdolomitización se exponen los minerales de arcilla, anteriormente retenidos, a una solución alcalina. Los minerales arcillosos no hidratados se presentan en un estado “activo”. En el sitio donde acontecerá el intercambio en las superficies de arcilla se encuentran vacíos u ocupados por iones de calcio o magnesio, absorben iones de potasio y sodio de la solución y se produce una doble capa junto con la absorción de agua, por lo que genera la hinchazón de minerales arcillosos, y, por tanto, aumento del volumen de la partícula de agregado (Swenson, 1958).
- Crecimiento y reordenamiento de los productos de la desdolomitización, es decir, calcita y brucita, por medio de una reacción química. La arcilla no se encuentra incorporada en los rombos de dolomita, sino que crea una red entre los finos granos de calcita que rodean los rombos. Esta red tiene ciertos canales que permiten que los hidróxidos alcalinos ingresen a los poros, atacando a los rombos de dolomita, dando como resultado la desdolomitización. Posterior a la reacción, se observa brucita alrededor del rombo de aproximadamente 2 μm de espesor. Esta capa de brucita provoca aumento de volumen, por tanto, genera fuerzas de expansión (Tang et al.,2000).
- Reacción álcali – sílice del cuarzo criptocristalino en la matriz que rodea los rombos de dolomita (Katayama, 1992). En este proceso, la reacción del cuarzo del criptocristalino del carbonato es la que genera la expansión del concreto, sin embargo, la desdolomitización de este proceso es “inofensiva”.

En el proceso de expansión, hay una serie de factores que contribuyen, por ejemplo:

- Alcalinidad del cemento, y también por factores externos como: adiciones minerales, aditivos, entre otros (Segarea, 2005).
- Tamaño del agregado: Entre menor sea el tamaño del agregado, la expansión será menor. Mientras que, entre mayor es la superficie del agregado, la expansión del agregado aumenta (Alaejos y Bermúdez,2003).

Ahora bien, también existen una serie de técnicas que se recomiendan para mitigar los posibles problemas patológicos (expansión). La norma de INTECO, INTE C278 (p.17), menciona unas medidas preventivas adecuadas para minimizar el riesgo de expansión:

- Evitar el uso de agregado reactivo: Este es un método viable para prevenir que el álcali – agregado provoque daños en la estructura. Para ello, se deben realizar pruebas ASTM C 1260 (método de prueba estándar para la posible reactividad alcalina de los agregados, método de barras de mortero) y ASTM C 1293 (método de prueba estándar para la determinación de cambio de longitud del concreto debido a la reacción álcali – sílice) (Thomas et al.,2013).
- Limitar la carga de álcali del concreto: Según el ASTM C150, es poco probable que ocurra una reacción álcali – agregado si el porcentaje de contenido de álcali en el cemento se encuentra por debajo del 0.60%, como límite opcional.
- Utilizar materiales cementantes complementarios: Se pueden usar cenizas volantes o puzolanas naturales (ASTM C618). Este tipo de material es utilizado para controlar la expansión del concreto debido al álcali – agregado, que contiene un bajo porcentaje de sílice. Esto controla las reacciones de sílice alcalina; el humo de sílice también reduce la expansión del mortero, sin embargo, a diferencia de las cenizas volantes, tiene un alto contenido de sílice (ASTM C1240).
- Empleo de aditivos a base de litio: La mayoría de estos aditivos contienen nitrato de litio, el componente que genera más eficiencia para suprimir el álcali – sílice. (Thomas et al.,2013). El litio posee la característica de ser un metal alcalino, al igual que el sodio y el potasio, por lo que el litio reacciona con la sílice reactiva de forma similar a las sales de sodio y potasio, produciendo silicato de litio insoluble alrededor del agregado reactivo, siendo poco propenso a absorber el agua y a hincharse, además, protege la sílice reactiva de la reacción con los álcalis del cemento (Feng et al., 2005). El compuesto más empleado para suprimir la reacción álcali – sílice es el nitrato de litio (LiNO_3) (Stokes, et al.,1997).

Figura 35

Materiales cementantes suplementarios



Nota. Figura tomada de *360enconcreto* (s.f.)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

14. Definición del enfoque y método de investigación

El presente trabajo tiene un enfoque de tipo cuantitativo y en cuanto a la metodología de investigación, se va a utilizar una orientación causal. Además, este proyecto plantea la comparación de dos elementos con respecto a una variable en común. En este sentido, se comparará el desarrollo del álcali-agregado en dos tipos diferentes de agregados que se encuentran presentes en los puentes de concreto hidráulico: el agregado ígneo y el agregado sedimentario.

Para realizar el estudio y, posteriormente la comparación de los dos elementos mencionados anteriormente, se seleccionaron cuatro puentes: dos de ellos cuentan con un agregado ígneo y los otros dos tienen un agregado sedimentario. Las cuatro estructuras seleccionadas son clasificadas como viales. Además, tanto los puentes con agregados sedimentarios como lo puentes con agregado ígneo cuentan con una superestructura y una subestructura de concreto.

Para las estructuras elaboradas a base de agregados ígneos se seleccionaron los siguientes puentes: el Puente Río Piedras, que se ubica en San Ramón, Alajuela y el Puente Río Poas en Aserrí de San José. Por otra parte, las estructuras elaboradas a base de agregados sedimentarios que se van a estudiar son: el Puente Río Potrero de Guanacaste y el Puente Río San Lázaro en Nicoya de Guanacaste.

Un elemento que tienen en común las cuatro estructuras seleccionadas es la presencia de las patologías que contribuyen al deterioro del concreto. Por esto, se realizará un estudio sobre el desempeño de las diferentes patologías existentes del álcali – agregado que se ha desarrollado en las estructuras que presentan los agregados ígneos y sedimentarios.

15. Sujetos y fuentes de información

Para el presente trabajo, se consultará a los siguientes profesionales:

Tabla 14*Matriz de sujetos de información*

Nombre	Área de desempeño	Rol
Oscar Calvo Carranza	Ingeniero Civil, experto en patologías de concreto hidráulico.	Supervisor del proyecto investigativo
Andrés Felipe Zamora Coto	Gerencia de Contratación de Vías y Puentes	Consulta sobre puentes inspeccionados con agregados ígneos y sedimentarios. Plataforma SAEP.
Minor Murillo	Ingeniero civil, experto en concreto hidráulico	Consulta sobre patologías del concreto hidráulico
Ronald Jiménez Castro	Ingeniero civil, experto en ingeniería estructural	Consulta sobre patologías del concreto hidráulico

Nota. Tabla de elaboración propia

Respecto a las fuentes de información, y en vista de que este trabajo se enmarca en el área de un estudio del desempeño de las patologías del concreto hidráulico en puentes, se utilizarán como fuentes primarias de información las normas emitidas por la American Society for Testing and Materials y el American Concrete Institute. Asimismo, como fuentes secundarias, se consultarán documentos teóricos relacionados con las reacciones de álcali-agregados.

16. Definición de variables

Las variables que se estudiarán en este trabajo serán las siguientes:

Tabla 15*Matriz de variables*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operativa	Definición Instrumental
Patologías del concreto hidráulico	“Se entiende por Patología a aquella parte	Esta variable se va a estudiar por medio de	Para efectos de instrumentalizar esta

	de la durabilidad que se refiere a los signos, causas posibles y diagnóstico del deterioro que experimentan las estructuras del concreto.” (del Rosal,2017, p.14)	inspecciones visuales, físicas y avanzadas no destructivas.	variable, se harán visitas técnicas para hacer inspección visual, físicas y avanzadas con el criterio experto y se identificará potenciales patológicos en la estructura.
Agregados	“Agregado se define como un material mineral granular relativamente inerte que ocupa la mayor parte del volumen de la mezcla de concreto, la cual se le incorpora por razones de economía, resistencia, trabajabilidad y durabilidad.” (Fernández y Salas, 2002, p. 8)	Esta variable se va a estudiar con la teoría.	Para esta variable, se va a realizar un análisis en una matriz de evaluación para así reconocer la comparación del desempeño de las patologías entre los agregados ígneos y sedimentarios.
Cementos Modificados	“Especialmente útil en obras que exigen altos volúmenes de concreto (una presa, por ejemplo) y, sobre todo, en aquellas que están expuestas al ataque moderado de los cloruros y sulfatos (generalmente las que están en contacto con el agua). Adquiere su resistencia más lentamente que el anterior, aunque finalmente lo iguala y se	Esta variable se va a estudiar con la teoría	En esta variable se va a estudiar el impacto que ejerce con respecto a la reacción de sus compuestos químicos con los deterioros presentes en la estructura.

	<p>puede conseguir la misma resistencia. Entre sus ventajas destaca la resistencia a la corrosión y a la degradación, lo que convierte este material en un buen aliado para no tener grandes preocupaciones de mantenimiento a lo largo de la vida útil de la obra.”</p> <p>(UMACON+emedia, 2021)</p>		
--	---	--	--

Nota. Tabla de elaboración propia

17. Instrumentos y técnicas utilizados en la recolección de datos

En cuanto a los instrumentos que se van a utilizar para recolectar la información necesaria para el análisis se encuentran los siguientes: cámara del celular, para tomar las fotografías de los puentes; cinta métrica de 30 metros de marca BMI, binoculares y escalera, vernier, equipo de protección, arnés, línea de vida y un esclerómetro.

Todos los instrumentos indicados anteriormente serán utilizados de día, con el fin de observar con claridad el fisuramiento presente en la estructura. La toma de datos se hará por medio de anotación de observaciones y posteriormente de mediciones. El esclerómetro que se va a utilizar es de marca Proceq, del tipo martillo para prueba de concreto y cuenta con una capacidad de 70N/mm² fuerza compresiva. Además, su fecha de calibración fue en setiembre del 2010.

18. Sustentación de la confiabilidad y validez de los instrumentos utilizados

La mayoría de los instrumentos que se van a utilizar en la recolección de datos, tienen el fin de brindar protección y seguridad a la hora de recaudar la información necesaria sobre los puentes; tomando en cuenta que son estructuras de gran altura y de difícil acceso, es necesario contar con las precauciones necesarias para evitar algún tipo de accidente.

En lo que respecta a la cinta métrica, ya que se va a utilizar un instrumento estandarizado, se cuenta con la certeza de que brindará una medida estable y consistente; en este sentido, se dará uso de la cinta métrica para realizar mediciones de las grietas presentes en los puentes y documentar su longitud.

Finalmente, el esclerómetro se va a utilizar para obtener el índice de rebote y así determinar una medida aproximada de la resistencia a la compresión en el concreto endurecido. Por esto, se utilizará en todos los elementos estructurales de los cuatro puentes seleccionados.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE

LOS RESULTADOS

19. Organización del análisis

En cada uno de los cuatro puentes seleccionados para este proyecto, se realizó el siguiente procedimiento:

Como primer paso, se elaboró una matriz en Microsoft Excel llamada “Estado del puente”, en esta se especificó el nombre del puente y el elemento de la estructura. Esta matriz, que se puede observar en la Tabla 16, tomó en cuenta las siguientes características:

- Descripción: Se mencionan los síntomas del álcali-agregado.
- Peso: Hace referencia al valor porcentual de cada síntoma listado en la columna de descripción. Cada síntoma tiene una calificación variada, debido a que tres de los indicios mencionados son propios de la patología álcali-agregado; mientras que hay otros síntomas que pueden estar relacionados con dicha patología o bien, de otros daños. La calificación más alta es asignada para los síntomas propios del álcali-agregado.
- Grado de daño: Para asignar un grado de daño, se utiliza una escala que va del 0 al 4 (siendo cero el grado menor y cuatro el mayor). Se detallará más adelante.
- Carácter especial: En esta sección se especificó la manera de localización de la descripción. Más adelante se explicará sobre la manera de la localización.
- Puntaje: Corresponde a los valores porcentuales presentes de cada síntoma. Estos se obtienen de la multiplicación del porcentaje de la columna “Peso” de cada síntoma, por cada resultado obtenido de la columna “Grado de Daño”, y por último se divide entre cuatro, puesto que corresponden a la cantidad de códigos de Grado de Daño determinados en la Tabla 17 (el cero no se toma en cuenta, debido a que según en la Tabla 17, el código cero indica que no hay evidencias del síntoma o característica, por lo tanto, si en algún síntoma se reporta un cero en el grado de daño, este tiene 0% en la calificación en la respectiva fila de la columna “Puntaje”).
- Total: El total representa la sumatoria de tres columnas: la columna de “Peso”, que obligatoriamente debe tener un 100%, debido a que la suma de todos los síntomas da como resultado ese valor; seguidamente, en la misma fila, se indica la sumatoria de los síntomas calificados en la columna de “Grado de Daño”; por

último, se obtiene la sumatoria de la calificación porcentual total de la columna “Puntaje”. El último resultado obtenido define la categorización de la ponderación del sitio de la variable a estudiar.

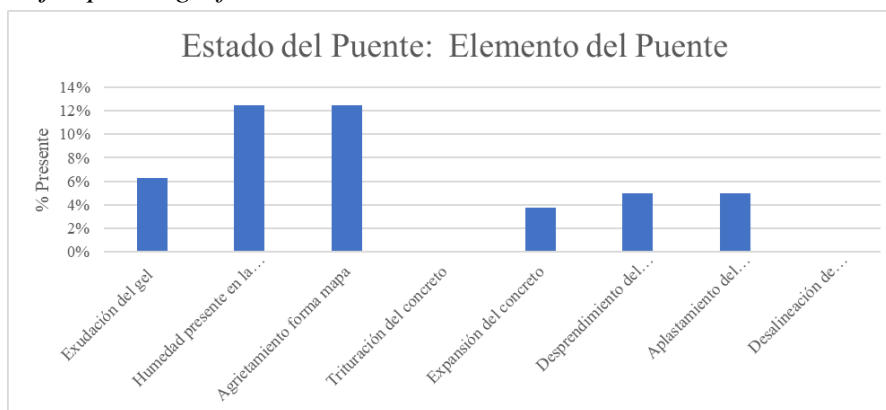
- Ponderación del sitio: Aquí se define el estado del elemento del puente respecto a los resultados totales obtenidos de la columna “Puntaje”. Según el resultado final de la columna “Puntaje”, se puede categorizar como “No aplica”, “Afectación parcial potencial” o “Potencial patológico alto”. La categorización que se aplique depende del rango de valores en que se encuentre, esto se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 16
Estado del puente

Estado del Puente: Elemento Estructural				
Descripción	Peso	Grado de Daño	Carácter Espacial	Puntaje
Exudación del gel	25%	0		0%
Humedad presente en la estructura	25%	0		0%
Agrietamiento forma mapa	25%	0		0%
Trituración del concreto	5%	0		0%
Expansión del concreto	5%	0		0%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0		0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0		0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0		0%
Total	100%	0		0%
Ponderación del sitio	No Aplica			

Nota. Tabla de elaboración propia

La Tabla 16 fue elaborada para que, realizar, con base en sus resultados, una gráfica de tipo radial, y usar dicha gráfica para interpretar los resultados de una mejor manera. La gráfica contiene las siguientes variables obtenidas de la Tabla 16: las descripciones y la calificación de la columna “Presente”. A continuación, se ejemplifica el gráfico construido:

Figura 36*Ejemplo de gráfica*

Nota. Gráfica de elaboración propia

Ahora bien, los elementos presentes en la Tabla 16, son a su vez dependientes de la Tabla 17, llamada “Código de Valoración”, puesto que esta tabla ayuda a determinar por medio de valores y caracteres el grado de daño, el carácter espacial y la ponderación del sitio. La Tabla 17 contiene lo siguiente:

- Descripción: En esta columna se ven reflejadas las características por calificar que tienen las columnas de la tabla “Estado de Puente”. Las características por calificar son: el grado de daño, carácter espacial y la ponderación del sitio.
- Código: El código es el peso que se le da a cada elemento de la columna de “Valoración”. La columna de “Descripción”, tiene rangos de códigos: en el caso del “Grado de daño”, representa que el código obtiene un rango del 0 al 4; para el “Carácter Espacial” representa un código de “P” y “G”; y para “Ponderación del Sitio” posee tres rangos: de un 100% se divide entre los 3 tipos de ponderación del sitio determinados (No Aplica, Aceptación Parcial Potencial y Potencial Patológico Alto). Entonces, el primero va de 0% al 33%; el segundo rango va de 34% al 66%; mientras que el tercer rango va de 67% al 100%.
- Valoración: La columna de “valoración” es la definición utilizada para cada código. Por lo tanto, para “Grado de Daño” la valoración según el rango descrito va de la siguiente manera de forma ascendente: nulo, leve, medio, alto y muy alto; para “Carácter Espacial” la valoración corresponde a local y regional; por último,

en “Potencial patológico” la valoración corresponde a “Nulo o leve”, “Medio” y “Alto”.

Tabla 17
Código de valoración

Descripción	Código	Valoración
Grado de Daño	0	Nulo
	1	Leve
	2	Medio
	3	Alto
	4	Muy alto
Carácter espacial	P	Puntual
	G	Global
Ponderación del sitio	0% – 33%	No aplica
	34% – 66%	Aceptación parcial potencial
	67% - 100%	Potencial patológico alto

Nota. Tabla de elaboración propia

Dentro de esta tabla, los valores de la columna “Valoración” representan lo siguiente:

- Nulo: Cero evidencias de la característica. Está representado por medio del código 0.
- Leve: Indica que existe la presencia de la característica, sin embargo, el deterioro no se observa con facilidad ni es notorio. Se representa con el código 1.
- Medio: La característica a valorar presenta un deterioro notorio, sin embargo, no es grave, por tanto, se le asigna un código 2.
- Alto: La característica presente en la estructura tiene un deterioro avanzado. Esta valoración corresponde a un código de 3.
- Muy alto: La característica se encuentra completamente deteriorada, por lo tanto, a esta valoración se destina el código 4.

- Puntual: Se refiere a que la característica a valorar está presente en la estructura en zonas específicas.
- Global: Cuando la característica presente en la estructura se ubica en gran parte del elemento estructural o en su totalidad.
- No aplica. Indica que el elemento estructural se encuentra fuera de peligro de tener un potencial patológico. Posee un código de un rango de 0% - 33%, debido a que los grados de daño calificados de cada síntoma presente en la estructura no señalan un potencial patológico.
- Aceptación parcial potencial: Posibilidad de ser patológico, sin embargo, por diversas situaciones no se puede determinar si realmente es un potencial patológico o no mediante inspección visual. El código de esta valoración contiene un rango de 34% - 66%, ya que cumple con los síntomas para ser un potencial patológico, sin embargo, algún síntoma existente puede generar controversia.
- Potencial patológico alto: Existe un Potencial patológico, en definitiva. Este obtiene un código de un rango de 67% - 100%, debido a que los resultados de los grados de daño de cada síntoma presente resultan ser evidentes para un potencial patológico.

Los códigos de valoración fueron obtenidos dividiendo el valor máximo (es decir, el 100%) entre 3, puesto que es el número de categorías de esta descripción.

Además de las dos tablas mencionadas con anterioridad, se elaboró una tabla adicional, para determinar la resistencia aproximada del concreto mediante la ejecución del ensayo del esclerómetro. La Tabla 18, llamada “Resistencia aproximada al concreto” especifica el nombre del puente y el elemento en donde se aplicó la prueba. La tabla contiene las siguientes especificaciones:

- Zona afectada: Se refiere al sector en donde se realizó la prueba y se detectó la presencia de agrietamiento en una superficie lisa.
- Zona no afectada: Es el territorio donde se realizó la prueba, pero no se observaron daños en la superficie.

- Medición: La cantidad de pruebas que se realizaron en el ensayo, representada con una letra “n”.
- Valor de rebote: El resultado obtenido posterior al impacto del martillo en la superficie de concreto.
- Índice de rebote: Es el promedio de todos los valores de rebote que se realizaron.
- Resistencia aproximada al concreto: Es el valor obtenido de la Tabla 2 del presente proyecto de acuerdo con su índice de rebote.

Tabla 18*Resistencia aproximada del puente*

Nombre del Puente			
Resistencia Aproximada al concreto: Elemento del Puente			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
6		6	
7		7	
8		8	
9		9	
10		10	
Índice de Rebote		Índice de Rebote	
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)		Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	

Nota. Tabla de elaboración propia

Las tres matrices anteriores fueron utilizadas para la obtención de la información necesaria en los cuatro puentes seleccionados. La información obtenida se usó para elaborar análisis de las posibles técnicas remediales para los procesos patológicos, y así brindarle el sentido a este estudio. A continuación, se explicará el proceso de obtención de datos:

Es importante destacar que, para todos los puentes se realizó el mismo procedimiento, por lo tanto, se inició con la inspección de la superestructura y luego, la subestructura. Posteriormente, se ingresó debajo del puente con los implementos de seguridad necesarios y otras herramientas para facilitar la recolección de información. Una vez debajo del puente, se realizó, primeramente, un chequeo superficial del elemento estructural para verificar en donde se debió prestar más atención. Posterior al chequeo superficial, se comenzó a realizar un chequeo detallado en las zonas más deterioradas, con ayuda de los binoculares, y luego, con ayuda de una escalera se llegó a la superestructura, a verificar el estado.

Se encontraron varios daños en la superestructura, por ejemplo, presencia de humedad, agrietamientos, entre otros. Con ayuda de la cámara fotográfica, se tomaron fotos para obtener pruebas del estado del elemento estructural, específicamente si existe presencia del álcali – agregado. Se procedió a completar la información de la tabla de “Estado de Puente”.

Una vez finalizada la inspección en la superestructura, por motivos de facilidad, se procedió a realizar el ensayo con el esclerómetro. Se aplicó en una zona completamente lisa, sin ningún tipo de daño, y también se realizó otro ensayo en una zona en donde existiera la presencia de agrietamiento, pero con superficie lisa. Se procedió a tomar los diez datos establecidos y se corroboró que el ensayo validara, por último, se aplicó el procedimiento descrito anteriormente para la obtención de la resistencia aproximada al concreto.

Una vez finalizado el proceso anterior, se procedió a inspeccionar la subestructura en el siguiente orden: primeramente, los bastiones, luego las pilas y por último los cimientos, en caso de que estas dos últimas estuvieran presentes en la estructura. Primero se realizó un chequeo superficial para observar que partes de la estructura se debería prestar más atención, y posteriormente, con un chequeo detallado con ayuda de una lupa y una escalera. Para registrar la información recaudada, se utilizó la matriz “Estado de Puente”.

Luego, se realizó el ensayo del esclerómetro del mismo modo en que se realizó en la superestructura, con la diferencia de la posición del instrumento, debido que, para la subestructura el esclerómetro va dirigido de manera horizontal, siendo perpendicular a la superficie del bastión, mientras que en la superestructura el esclerómetro va en sentido vertical, de manera que quede de forma perpendicular a la superficie de concreto de la superestructura.

Este mismo procedimiento se realizó para las pilas, en el caso de los cimientos lo fue posible debido que no estuvieron expuestos.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de cada puente junto con su respectivo análisis:

20. Puente Río San Lázaro

Tabla 19

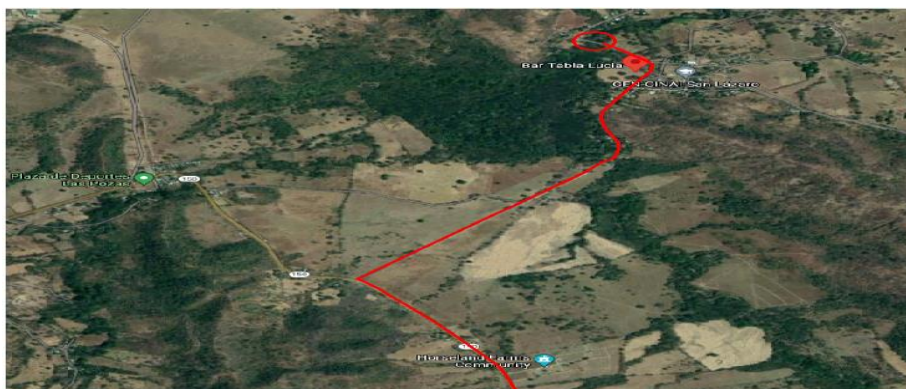
Identificación del Puente Río San Lázaro

Dato	Descripción
Ubicación	San Antonio, Nicoya, Guanacaste. Dirección de vía hacia Pozas.
Ruta	150
Edad	1974
Río o Cuenca	Río San Lázaro
Longitud entre Bastiones	22,95 m

Nota. Tabla elaborada con base en el SAEP (2016)

Figura 37

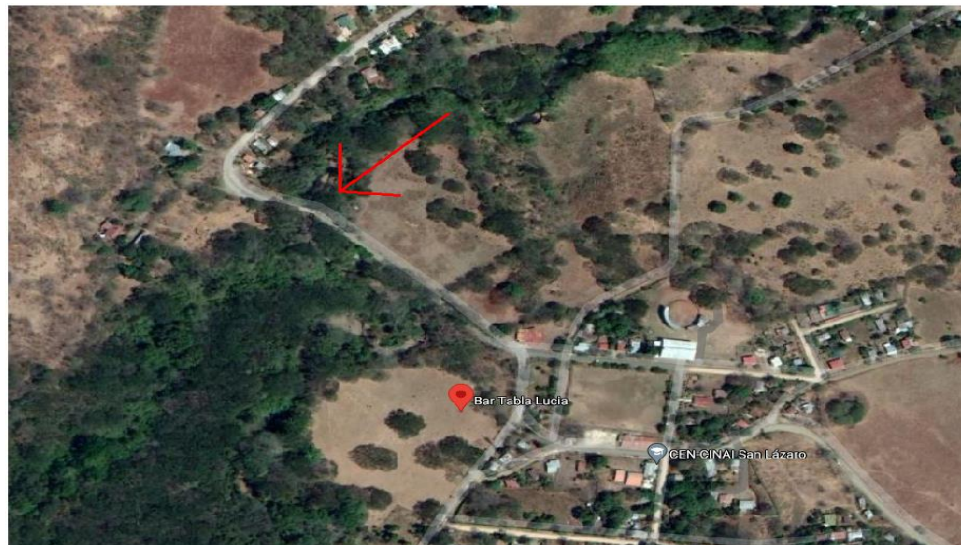
Ruta hacia el Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD.

Figura 38

Ubicación del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 39

Puente Río San Lázaro



Nota. Figura tomada del SAEP (2016)

Figura 40

Vista lateral del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura tomada del SAEP (2016)

El puente Río San Lázaro se clasificó como una estructura con agregado de origen sedimentario. Su origen se comprobó por medio de las siguientes pruebas fotográficas:

Figura 41

Agregado superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 42

Primer plano del agregado de la superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Es relevante mencionar que, debido a que en este proyecto no realizó ensayos destructivos al concreto, no se puede extraer el agregado utilizado para verificar su proveniencia por medio de la mineralogía. A causa de esto, para todos los agregados de los cuatro puentes, se determinó el origen del agregado por medio de la comparación de sus propiedades visuales, a partir de las observaciones en el campo y también utilizando bases teóricas sobre el tema.

Partiendo del agregado que se observa en la Figura 42, y a partir de la inspección visual que se realizó, se puede terminar que el agregado grueso posee un color rojizo, que, según las fuentes teóricas, corresponde a la roca volcánica, perteneciente a la roca natural ígnea proveniente del Tajo Chopo, en la provincia de Guanacaste (Solano,2003).

Esta roca rojiza se podría confundir a simple vista con la roca lutita, por su color rojizo, sin embargo, como se menciona en la Tabla 11, la lutita posee materiales arcillosos, y el tamaño del agregado de la lutita corresponde a fragmentos de 1/6 mm de diámetro (0,16 mm), por lo tanto, es notable que ante ese tamaño no es posible utilizarse como agregado grueso en una obra estructural, además que la arcilla no es un material considerado para utilización de agregado grueso en un concreto.

Sobre la determinación del agregado presente en el elemento estructural, según la Tabla 44 del anexo, un componente presente en esta roca volcánica pertenece a la andesita basáltica. En la Tabla 13, menciona que la andesita es un compuesto reactivo para el álcali – sílice.

A continuación, se mostrará el estado del puente de la superestructura con respecto al álcali – sílice, junto con su respectiva gráfica:

Tabla 20

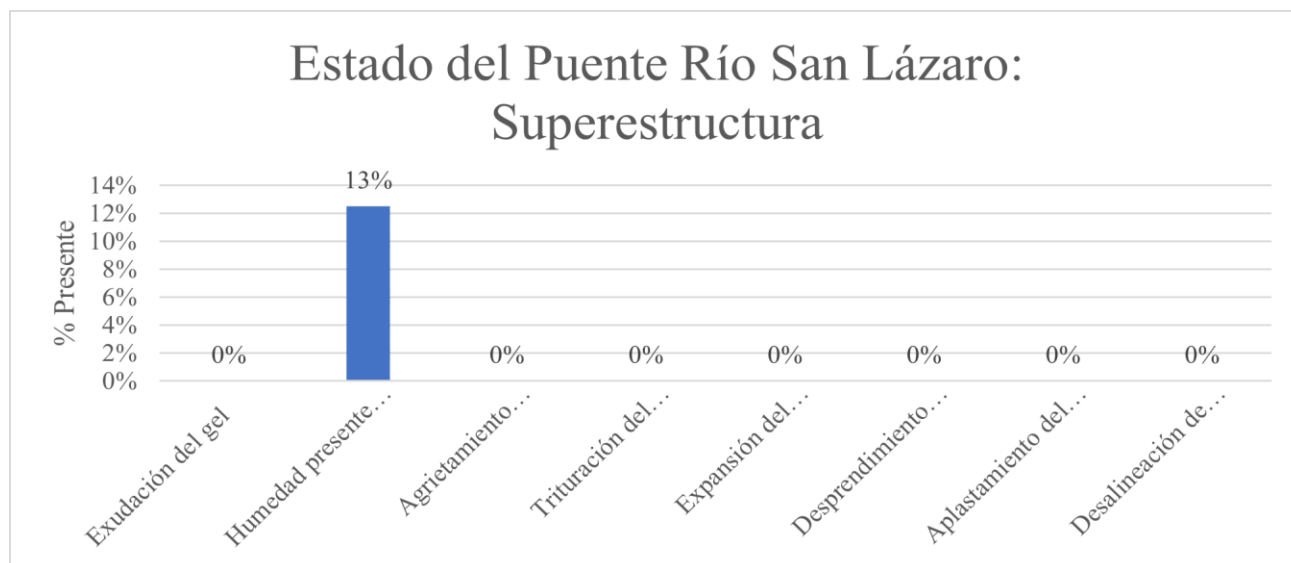
Estado de la superestructura del Puente Río San Lázaro

Estado del Puente Río San Lázaro: Superestructura				
Descripción	Valor	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	0	-	0%
Humedad presente en la estructura	25%	2	G	13%
Agrietamiento forma mapa	25%	0	-	0%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	0	-	0%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	2		13%
Ponderación del Sitio	No Aplica			

Nota. Tabla de elaboración propia

Figura 43

Gráfica del estado de la superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Gráfico de elaboración propia

Según el gráfico anterior, la superestructura obtuvo un porcentaje de 13%, clasificándose como un elemento que no aplica para tener un potencial patológico álcali – sílice, ya que no cumple con la aparición de los síntomas patológicos usuales, únicamente presenta efectos de los 8 existentes. Según la Figura 43, al peso de la humedad del puente se le asigna un 13% (ver Figura 44).

A continuación, se mostrará la fisura presente en el elemento estructural:

Figura 44

Agrietamiento en la superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

De acuerdo con la figura anterior, lo que se logra observar es una fisura con manchas de eflorescencia sobresaliendo en la superficie. Esta no pertenece al álcali – agregado debido a que esta patología presenta agrietamiento en forma de mapa, y en esta prueba se demuestra que el agrietamiento va en dirección transversal a la superestructura. Además, en la grieta se observa eflorescencia, no exudación gel blanco.

A continuación, para demostrar el estado del puente según el agrietamiento, se mostrarán las resistencias aproximadas del concreto en la superestructura:

Tabla 21

Resistencia aproximada al concreto de la superestructura del Puente Río San Lázaro

Puente Río San Lázaro			
Resistencia Aproximada al concreto: Superestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	40	1	50
2	50	2	50
3	44	3	50
4	46	4	45
5	52	5	57
6	52	6	56
7	53	7	46
8	54	8	52
9	48	9	54
10	49	10	48
Índice de Rebote	49	Índice de Rebote	51
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	445	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	480

Nota. Tabla de elaboración propia

La zona no afectada posee una resistencia aproximada de 480 kg/cm², mientras que una zona dañada del mismo elemento estructural, en donde se realizó la prueba en una superficie con agrietamiento, obtuvo una resistencia de 445 kg/cm². Esto determina que en la superestructura no ha perdido una resistencia significativa en las zonas afectadas, sin embargo, según la inspección visual realizada, el elemento si posee daños con respecto a su propiedad mecánica, es decir: la resistencia a compresión, y en su propiedad física: la durabilidad.

En la Tabla 2, del presente trabajo, se puede observar que varios de los factores que afectan la durabilidad se encontraron presentes; por ejemplo: la corrosión del acero y la eflorescencia (ver Figuras 44 y 45). Según la norma ACI 116, la eflorescencia es un depósito de sales color blanco que se forma en el interior y sobresale a la superficie del concreto.

Figura 45

Humedad y corrosión en las vigas de acero- superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 46

Superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 47

Agrietamiento en la superestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

La Figura 48 muestra el agregado expuesto de los bastiones de la subestructura. Según la inspección visual realizada y la base teórica, el agregado que utilizado para el elemento estructural es caliza. Este agregado suele tener un color blanco un brillo cristalino, como se puede apreciar en la imagen. Este agregado no puede ser marga, debido a que la marga tiene características similares a la arcilla, y es bien conocido que la arcilla no es clasificada como agregado grueso.

Figura 48

Agregado subestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 22

Estado de la subestructura del Puente Río San Lázaro

Estado del Puente Río San Lázaro: Subestructura				
Descripción	Valor	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	0	-	0%
Humedad presente en la estructura	25%	3	G	19%
Agrietamiento forma mapa	25%	1	P	6%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	1	G	1%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	5		26%
Ponderación del Sitio	No Aplica			

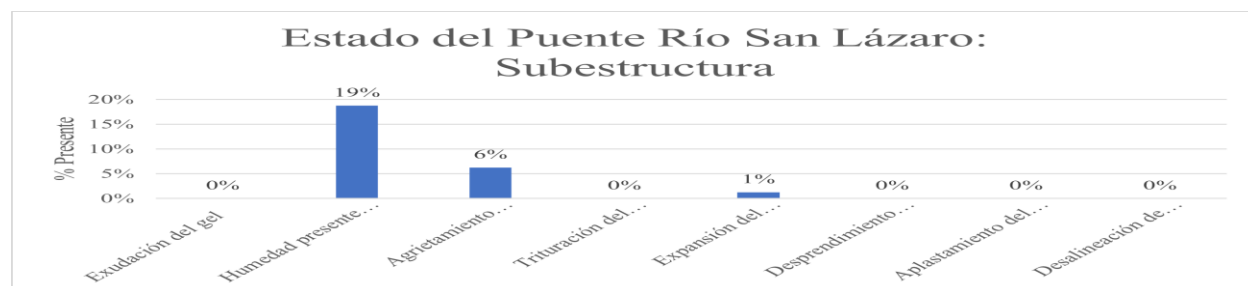
Nota. Tabla de elaboración propia

Debido a que el tipo de agregado presente en el elemento estructural es de origen sedimentario y que, además, la estructura posee minerales carbonatados reactivos, esta estructura podría presentar la patología álcali – carbonato. Ya que, como mencionan Thomas et al. (2013), para que el álcali – carbonato se desarrolle se necesitan minerales de carbonatos (dolomitas y calcitas), y éstas se presentan en la roca caliza y dolomía.

En la Tabla 22, el elemento estructural es determinado como un elemento fuera de peligro, es decir, que no aplica para presentar un potencial patológico álcali – carbonato.

Figura 49

Gráfica del estado de la subestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Gráfica de elaboración propia

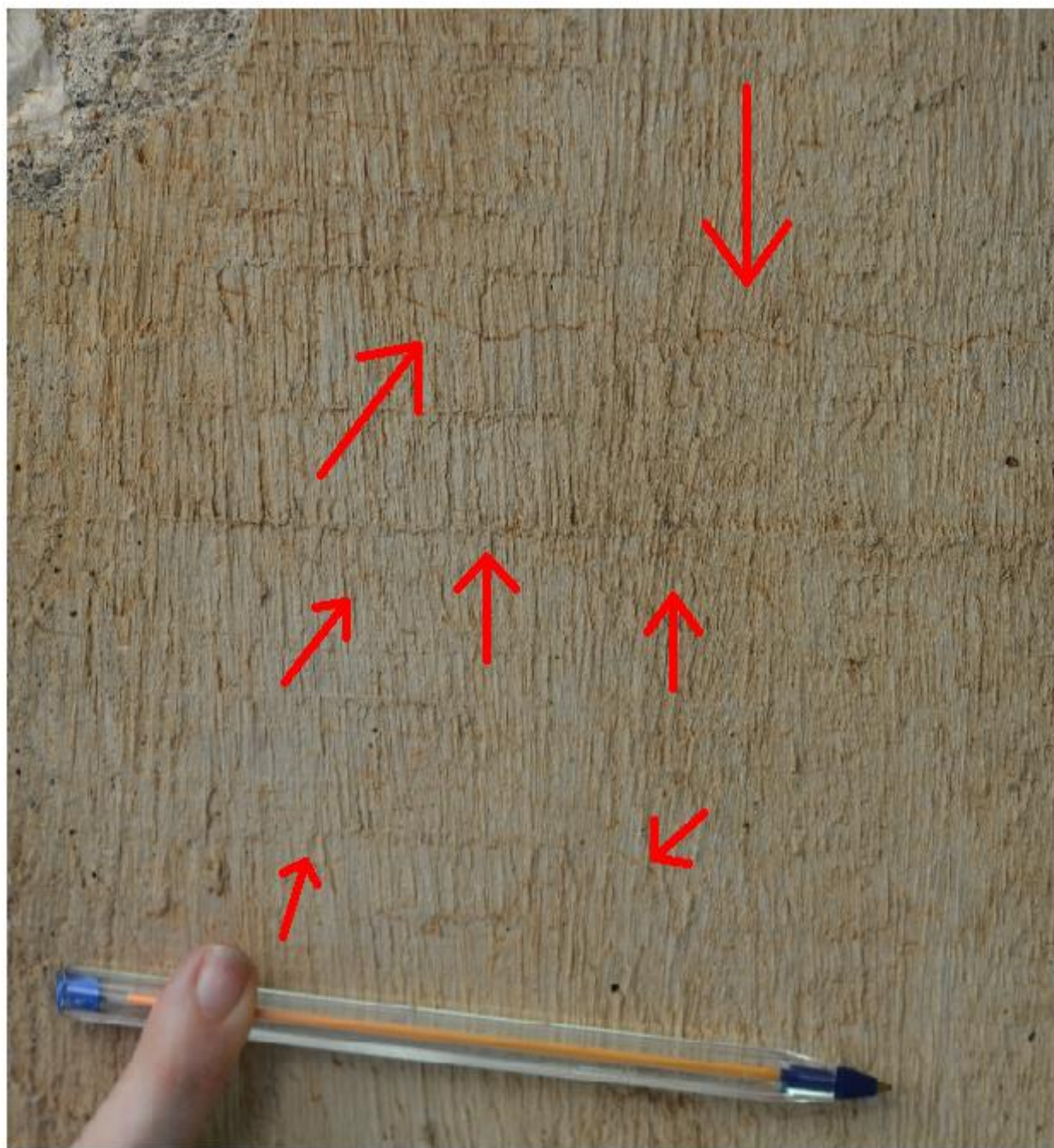
Se puede observar el comportamiento del estado del puente en la gráfica de la Figura 49. En este sentido, la subestructura se encuentra sana con respecto a esta reacción química del agregado, que suele ser un factor que afecta la durabilidad del concreto según Thomas et al. (2013). Cabe recordar que la gráfica corresponde a un estado del puente con respecto a la patología álcali – agregado, por lo tanto, el elemento se encontró con los siguientes síntomas: humedad de un 19% presente en la subestructura de manera global, aparición de agrietamiento en forma de mapa, lo cual implica una leve expansión en el concreto.

Respecto al bajo porcentaje del agrietamiento, se evidencia la presencia de esta característica, pero se observa con mucha dificultad a simple vista, incluso al tomar pruebas con cámara fotográfica fue complicado enfocar el agrietamiento (ver Figura 50). En la gráfica se aprecia que el efecto que más abunda en la estructura es la humedad, seguidamente el agrietamiento en forma de mapa.

Además de la calificación de la tabla anterior y su estado con respecto al álcali – agregado, la subestructura posee otros daños en su estructura independientes al álcali – carbonato, por ejemplo: hay presencia de grietas en el bastión de gran tamaño, y con ellas, una desalineación del mismo elemento. También aparición del agregado debido a la falta de vibrado (ver Figura 51) y una leve corrosión del acero de refuerzo notable desde las fisuras por su mancha de color marrón (ver Figura 50). El color usual del concreto es de color gris, y la Figura 50 muestra un color poco normal en el concreto. Ahora, el agrietamiento de la Figura 51 no puede corresponder a un síntoma de potencial patológico, debido a que es una grieta muy grande y no exuda gel, aunque haya presencia de humedad por su color gris oscuro.

Figura 50

Fisuración en forma de mapa con corrosión del acero -subestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 51

Agrietamiento y desalineación del concreto -subestructura del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

A continuación, se comprobará el estado del puente según los resultados de la prueba del esclerómetro, para la resistencia aproximada del concreto:

Tabla 23

Resistencia aproximada al concreto- subestructura del Puente Río San Lázaro

Puente Río San Lázaro			
Resistencia Aproximada al concreto: Subestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	43	1	40
2	41	2	45
3	39	3	44
4	44	4	38
5	40	5	40
6	42	6	44
7	45	7	47
8	37	8	40
9	43	9	46
10	37	10	43
Índice de Rebote	41	Índice de Rebote	43
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	370	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	400

Nota. Tabla de elaboración propia

Como se puede observar, la resistencia de una zona no afectada, es decir, una zona lisa y sin ningún daño o afectación, corresponde una resistencia aproximada al concreto de 400 kg/cm². Por otro lado, en una zona donde hubo fisuración, pero en superficie lisa, se pudo notar que la resistencia disminuyó. Por otro lado, en la zona con afectación de agrietamiento se obtuvo 370 kg/cm², por lo que los daños generados en la subestructura sí generan afectación en la propiedad mecánica del concreto y en la durabilidad de la estructura. En la Figura 51 se evidencia deterioro en la subestructura.

A continuación, se mostrará el tipo de agregado utilizado y los resultados del estado de las pilas del Puente Río San Lázaro:

Figura 52

Agrietado pilas Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

De acuerdo con la inspección visual realizada y las fuentes teóricas, el agregado utilizado para las pilas del Puente Río San Lázaro se puede clasificar como el agregado calizo. La roca caliza se caracteriza por una tonalidad similar a la del color blanco, y su brillo se puede clasificar como opaco. Características que se pueden observar en la Figura 52. Este agregado corresponde a la roca natural llamada sedimentaria. Según su composición mineralógica, la caliza está compuesta por minerales carbonato, que en el caso de la roca caliza serían: dolomitas y calcitas, por lo tanto, la patología álcali – agregado que podría estar presente en las pilas corresponde a álcali – carbonato.

Tabla 24

Estado de las pilas del Puente Río San Lázaro

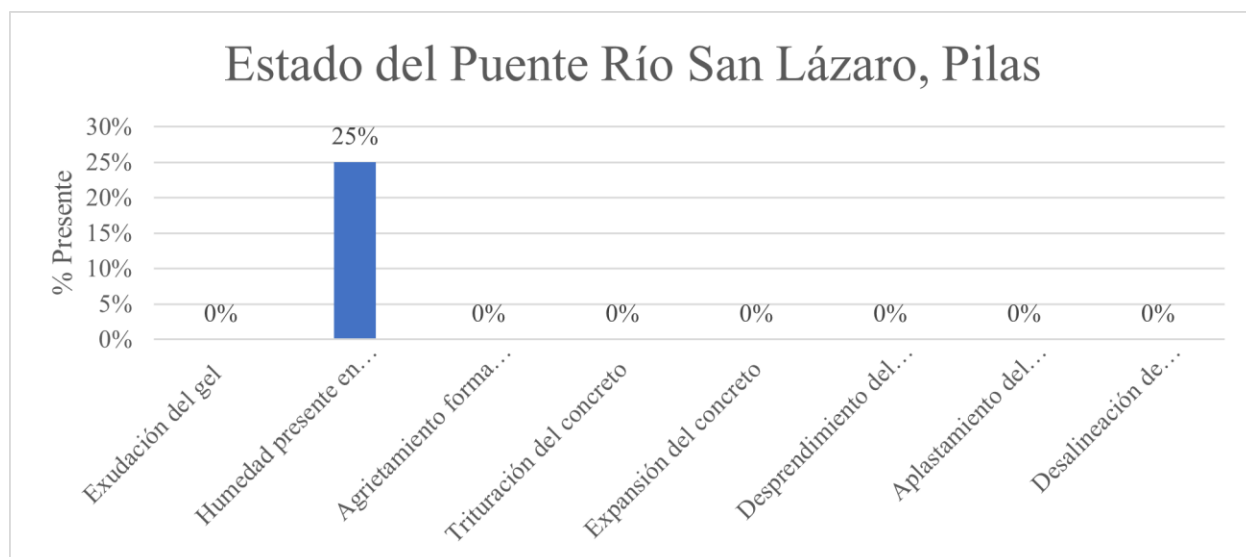
Estado del Puente Río San Lázaro: Pilas				
Descripción	Valor	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	0	-	0%
Humedad presente en la estructura	25%	4	G	25%
Agrietamiento forma mapa	25%	0	-	0%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	0	-	0%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	6		26%
Ponderación del sitio	No aplica			

Nota. Tabla de elaboración propia

El resultado para las pilas de esta estructura corresponde a un 26%, que equivale a la valoración “No aplica”. Esto quiere decir que las pilas no poseen un potencial patológico del álcali – carbonato.

Figura 53

Gráfica del estado de las pilas en el Puente Río San Lázaro



Nota. Gráfica de elaboración propia

Según la gráfica anterior, correspondiente al estado del puente con respecto a la patología álcali-carbonato, se puede observar que, las pilas del Puente Río San Lázaro obtuvieron un nivel de humedad muy alto. Los demás síntomas poseen un nivel nulo debido a que no se observó alguna evidencia. En la inspección visual ejecutada se logró observar en las pilas una tonalidad del concreto diferente al gris común, elemento que denota abundante humedad (ver Figuras 54 y 55). También, se puede observar una expansión del agrietamiento media, debido a la aparición de grietas en las pilas. Sin embargo, las grietas tienen una dirección de forma longitudinal y no en forma de mapa (ver Figuras 56 y 57). En las pilas se logró observar eflorescencia (ver Figuras 56).

Figura 54

Humedad en las pilas del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 55

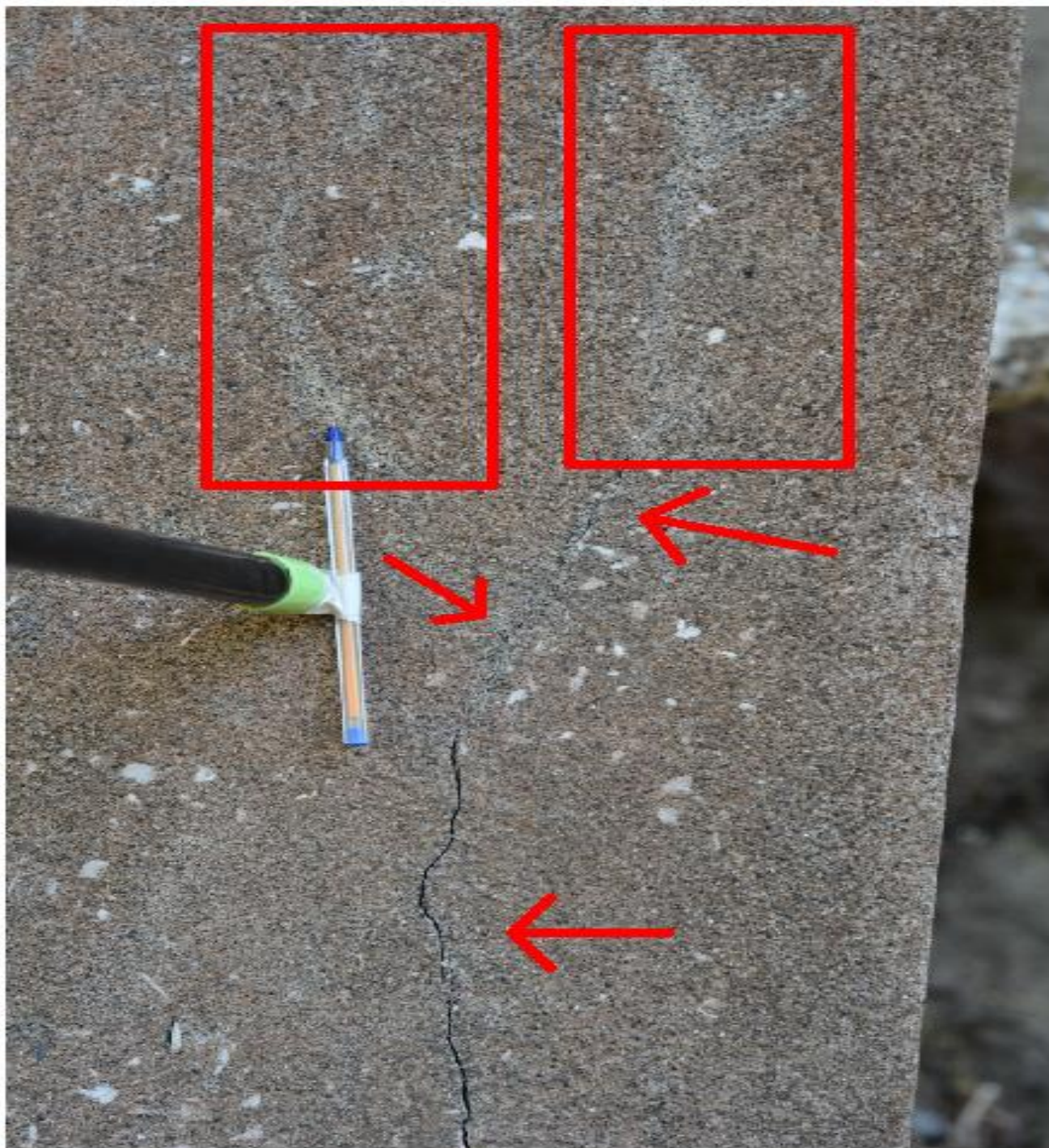
Humedad presente en las pilas del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 56

Agrietamiento y eflorescencia presentes en las pilas del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 57

Agrietamiento en las pilas del Puente Río San Lázaro



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 25

Resistencia aproximada del concreto de las pilas del Puente Río San Lázaro

Puente Río San Lázaro			
Resistencia Aproximada al concreto: Pilas			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	52	1	50
2	47	2	55
3	52	3	60
4	43	4	54
5	46	5	57
6	54	6	55
7	44	7	54
8	52	8	55
9	45	9	53
10	54	10	50
Índice de Rebote	49	Índice de Rebote	54
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	500	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	550

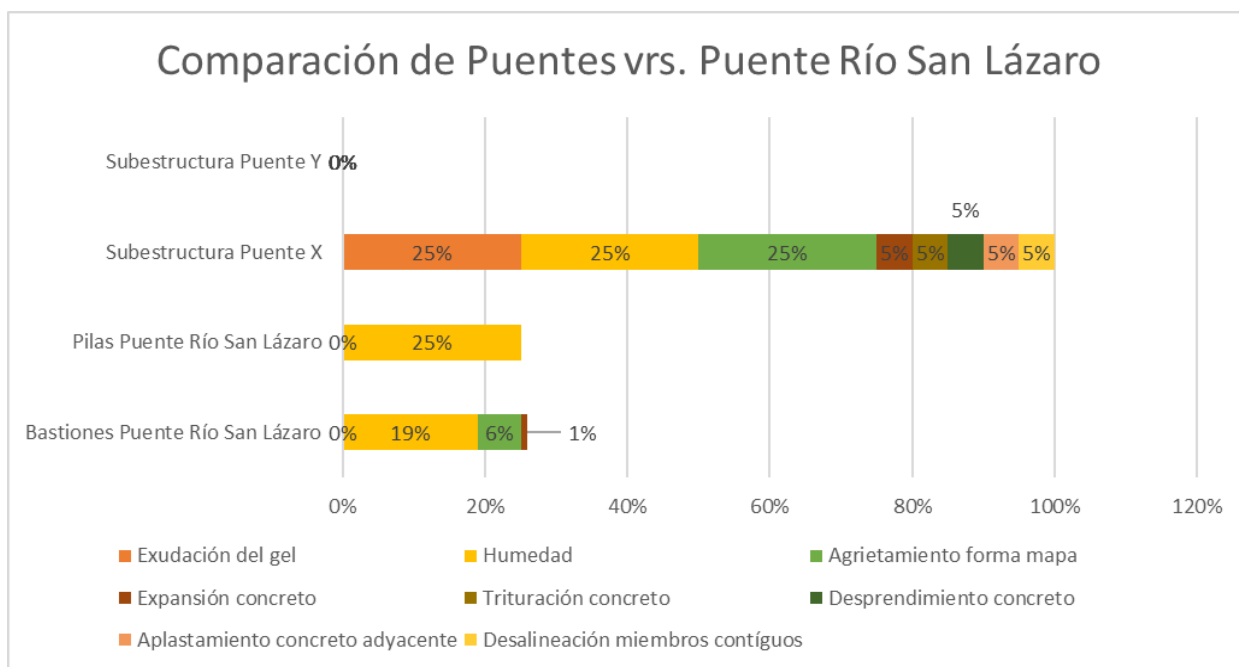
Nota. Tabla de elaboración propia

La tabla anterior, muestra una gran diferencia entre la resistencia aproximada de una zona no afectada, la cual es de 550 kg/cm² y una zona afectada con agrietamiento. La resistencia de una zona afectada indica que su propiedad mecánica (la resistencia a la compresión) ha sido afectada, debido al valor de 500 kg/cm² que obtuvo. Como se aprecia en las figuras 56 y 57, el agrietamiento es de manera longitudinal, ya que se encuentra en varias de las caras en la parte baja de la pila, lo cual afecta la resistencia del elemento.

En la siguiente gráfica se mostrarán los resultados de una comparación de esta estructura en su totalidad con un Puente “Y”, que representa una estructura que no posee ningún daño, y un Puente “X” que se encuentra completamente deteriorado con álcali – carbonato:

Figura 58

Comparación: Puente Río San Lázaro –Puente Sano-Puente Deteriorado (álcali-carbonato)



Comparando la subestructura del Puente Río San Lázaro con la del Puente “Y”, la estructura del Puente Río San Lázaro no presenta grandes daños, únicamente la presencia de humedad, por lo que se puede decir que la estructura se encuentra en óptimas condiciones de servicio. Hasta el momento, no se han observado los otros síntomas álcali – agregado, a pesar de su mineralogía en el agregado; sin embargo, las pilas si se muestran un poco más deterioradas, por ende, el agrietamiento, la humedad y la expansión del concreto llegan a ser una preocupación a mediano y largo plazo.

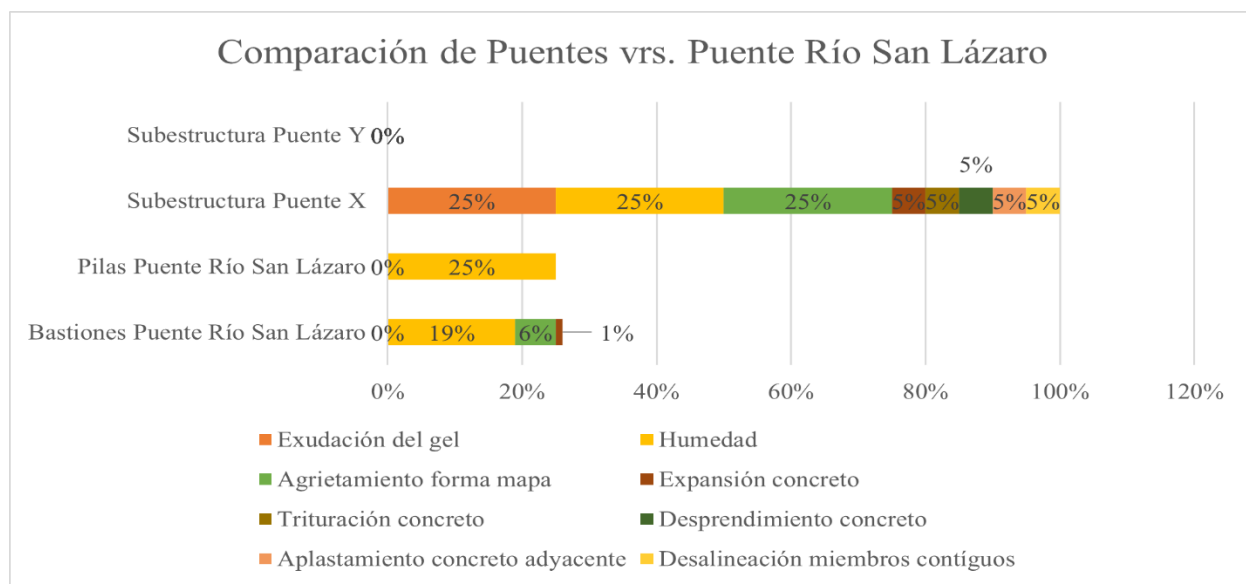
Respecto a la comparación con el Puente “X”, los elementos estructurales no parecen peligrar, por los porcentajes y su afectación en las propiedades del concreto, es decir, en su calidad de vida, a pesar de los efectos presentes. Se debe considerar que, a largo plazo, puede ocurrir algo que cause que esos porcentajes incrementen. Si esto sucediera se deben considerar que las condiciones de servicio se pueden ver afectadas.

Es importante recordar que, según la prueba del esclerómetro, la estructura sí se encuentra afectada en la resistencia a compresión, pero se debe considerar que la estructura también presenta otra serie de deterioros que han dado como resultado la reducción de la resistencia a compresión.

Ya que la superestructura del Puente Río San Lázaro es un elemento estructural con agregado de origen ígneo, se realizó el siguiente análisis por aparte: se comparó con una estructura Puente “Y”. El puente “Y” es una estructura que se encuentra en óptimas condiciones, no cuenta con ningún deterioro, las propiedades del concreto y de sus agregados se encuentran intactas y su vida útil y de servicio se encuentra en perfecto estado. Al contrario el Puente “X” que se encuentra completamente deteriorado con álcali – sílice:

Figura 59

Comparación: Puente Río San Lázaro – Puente Sano – Puente Deteriorado (álcali-sílice)



Nota. Gráfico de elaboración propia

En comparación con el Puente “Y, la superestructura del Puente Río San Lázaro se encuentra muy similar, debido a que la única afectación que presenta es la humedad en un 13%, el resto de los efectos del álcali – sílice no se encontraron. El Puente Río San Lázaro se encuentra en buenas condiciones, sin embargo, debido a otros factores que afectan en la estructura, la resistencia a compresión se ve afectada. Respecto a la comparación con el Puente

“X”, también se considera que la estructura se encuentra lejos de poseer un potencial patológico, debido a la falta de síntomas. A mediano plazo se espera que la humedad aumente, y no se descarta que en un futuro se logre determinar cómo potencial patológico por su mineral reactivo presente en el agregado.

21. Puente Río Potrero

Tabla 26

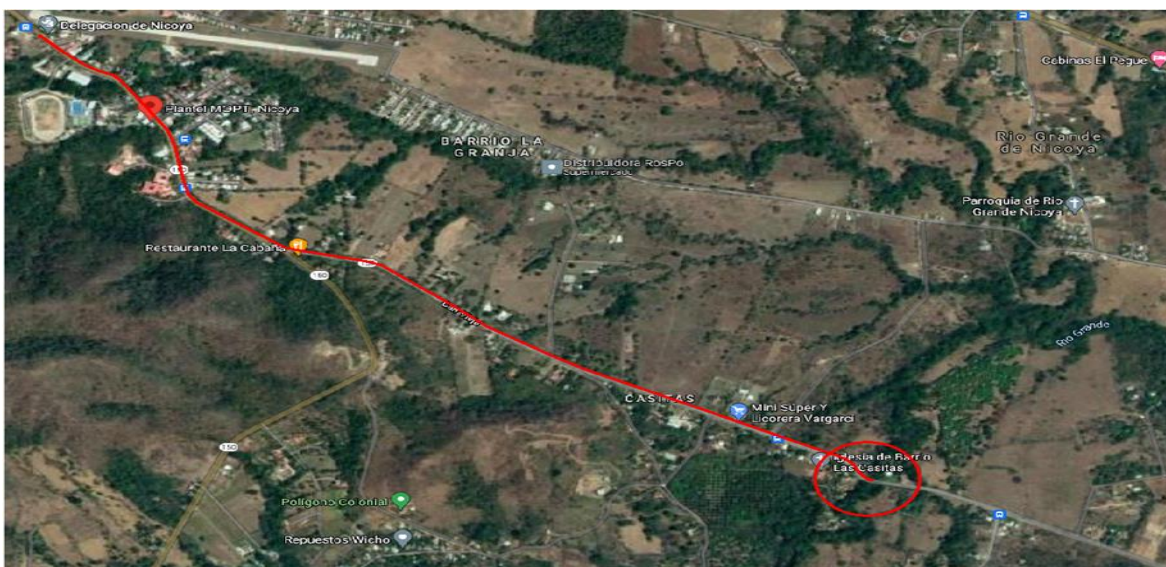
Identificación del Puente Río Potrero

Dato	Descripción
Ubicación	Nicoya, Nicoya, Guanacaste. Dirección de vía hacia Mansión.
Ruta	157
Edad	1936
Río o Cuenca	Río Potrero
Longitud entre Bastiones	26,5 m

Nota. Tabla de elaboración propia basado en el SAEP (2016)

Figura 60

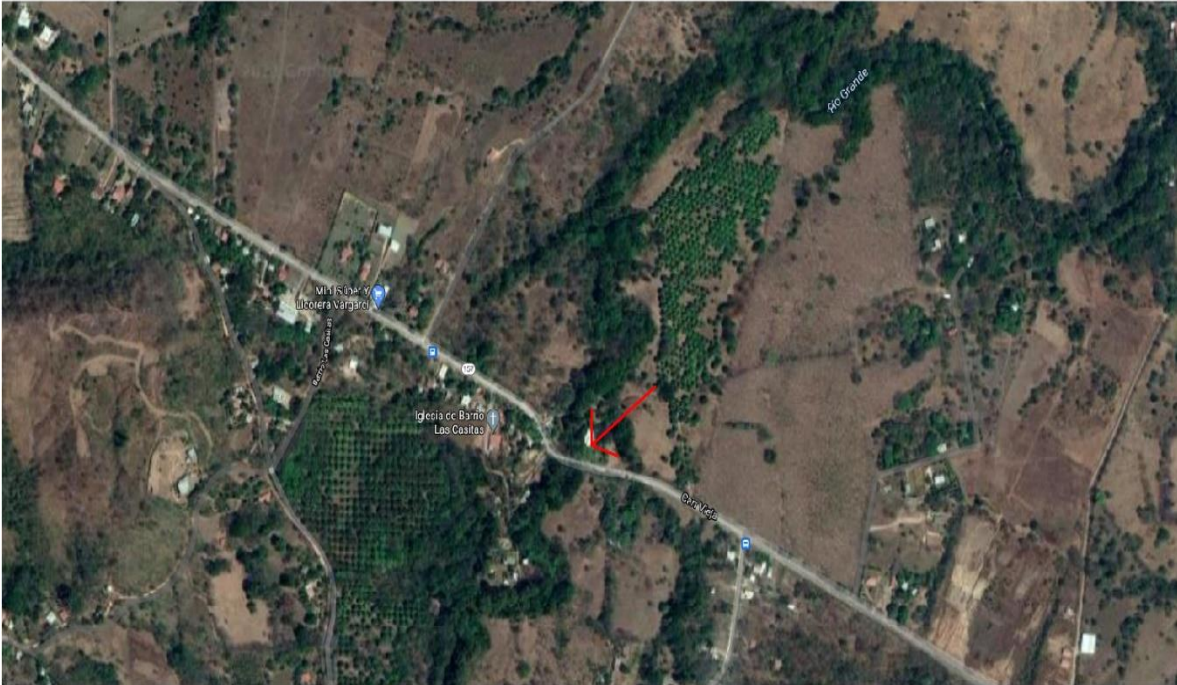
Ruta hacia el Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 61

Ubicación Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 62

Vista lateral del Puente Río Potrero



Nota. Figura recuperada de SAEP (2016)

Figura 63*Puente Río Potrero*

Nota. Figura de elaboración propia

Figura 64*Agregado de la superestructura del Puente Río Potrero*

Nota. Figura de elaboración propia

Se puede apreciar que el agregado que se utilizó en la superestructura del Puente Río Potrero corresponde a la roca natural sedimentaria, específicamente roca dolomía. Esto se puede comprobar observando su aspecto físico, pues la roca dolomía suele presentar un color que puede ser incoloro, blanco, rosa, negro, gris, verde o marrón, así como un brillo cristalino. En la Figura 64 se logra observar el agregado con un tono gris con brillo cristalino.

Una vez determinado que el tipo de agregado presente en la superestructura del Puente Río Potrero es la dolomía, se debe tomar en cuenta que este agregado posee la composición mineralógica carbonato, hay una posibilidad de que exista la la patología álcali – carbonato, ya que según el ACI 116, para que se produzca la patología en la estructura es necesario la reacción entre los álcalis del cemento Portland (sodio y potasio) y rocas dolomías o calizas.

A continuación, se mostrará el resultado del estado de la superestructura de acuerdo con el álcali – carbonato:

Tabla 27

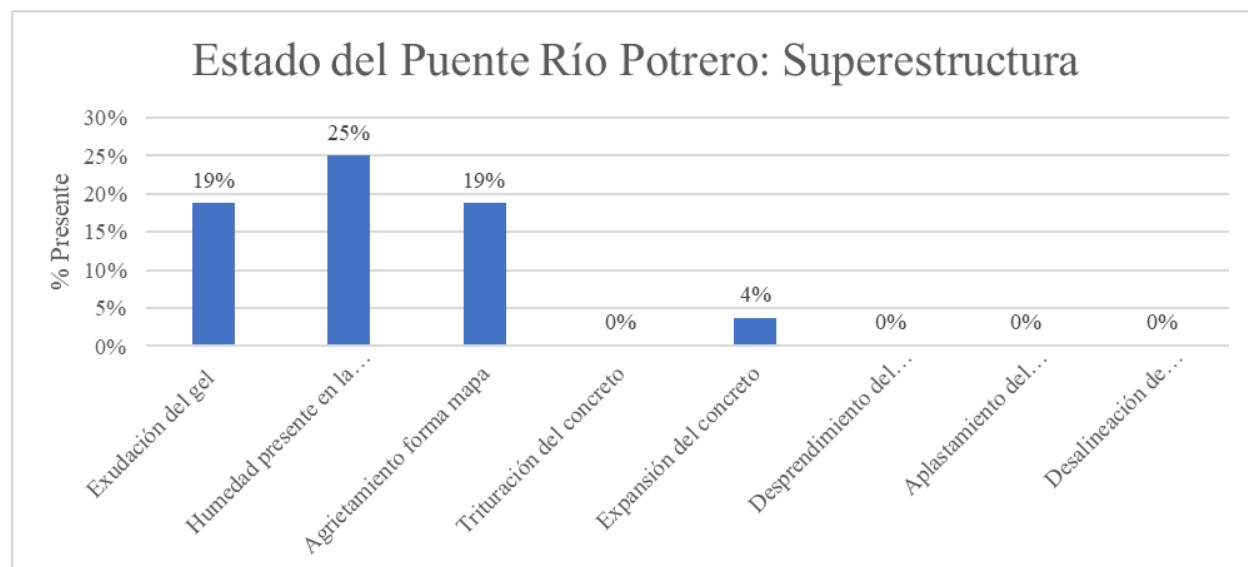
Estado de la superestructura del Puente Río Potrero

Estado del Puente Río Potrero: Superestructura				
Descripción	Valor	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	3	L	19%
Humedad presente en la estructura	25%	4	R	25%
Agrietamiento forma mapa	25%	3	L	19%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	3	R	4%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	13		66%
Ponderación del sitio	Potencial patológico			

Nota. Tabla de elaboración propia

Figura 65

Gráfica del estado de la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Gráfica de elaboración propia

Según los resultados obtenidos gracias a la inspección visual realizada, la superestructura resultó tener potencial patológico. El puente posee un alto nivel de exposición del gel sílice localizado de manera local, es decir, un 19%, también tiene un 25% de humedad presente en la totalidad de la estructura. También tiene un 19% de agrietamiento en forma de mapa de manera local. Esta exudación, según su base teórica, genera expansión en el concreto.

Figura 66

Exudación de gel y agrietamiento en la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 67

Potencial patológico álcali-carbonato en la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 68

Humedad presente en la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 28

Resistencia aproximada al concreto de la superestructura del Puente Río Potrero

Puente Río Potrero			
Resistencia Aproximada al concreto: Superestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	50	1	52
2	44	2	58
3	42	3	52
4	47	4	56
5	50	5	54
6	48	6	56
7	51	7	56
8	48	8	52
9	50	9	53
10	48	10	54
Índice de Rebote	48	Índice de Rebote	54
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	430	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	530

Nota. Tabla de elaboración propia

Los bastiones muestran que la estructura se encuentra deteriorada, y además muestran diferentes resistencias en ambas zonas: en la zona afectada, el valor es de 430 kg/cm², mientras que en una zona fuera de deterioros visualmente comprobables, se encuentra en 530 kg/cm². Algunos elementos que han coadyuvado al deterioro de esta estructura además del álcali – carbonato, son: el agrietamiento producido por diversas causas y los factores que afectan la durabilidad como la corrosión del acero de refuerzo, eflorescencia y la humedad (ver figuras 69 y 70). Estos podrían en algún momento generar un colapso en la estructura.

Figura 69

Corrosión del acero de refuerzo en la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 70

Eflorescencia en la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 71

Agregado en la superestructura del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

El agregado presente en la ilustración anterior corresponde al agregado utilizado en la subestructura. Por sus características visuales, se puede concluir que es un tipo de agregado caliza, según su semejanza con la Figura 71. También, muestra características descritas anteriormente en el presente proyecto, las cuales mencionan que este tipo de roca posee color pardo con brillo opaco.

Al haber definido el agregado a la subestructura, se determina el tipo de patología que podría presenciarse es de tipo álcali – carbonato. Las rocas calizas poseen minerales como calcitas o dolomitas según el ASTM C294, y su reacción con los álcalis del cemento, es decir el sodio y el potasio, generan esta reacción patológica, según la base teórica en el ACI 116.

A continuación, se muestran los resultados del estado del puente con respecto a la patología álcali – carbonato:

Tabla 29

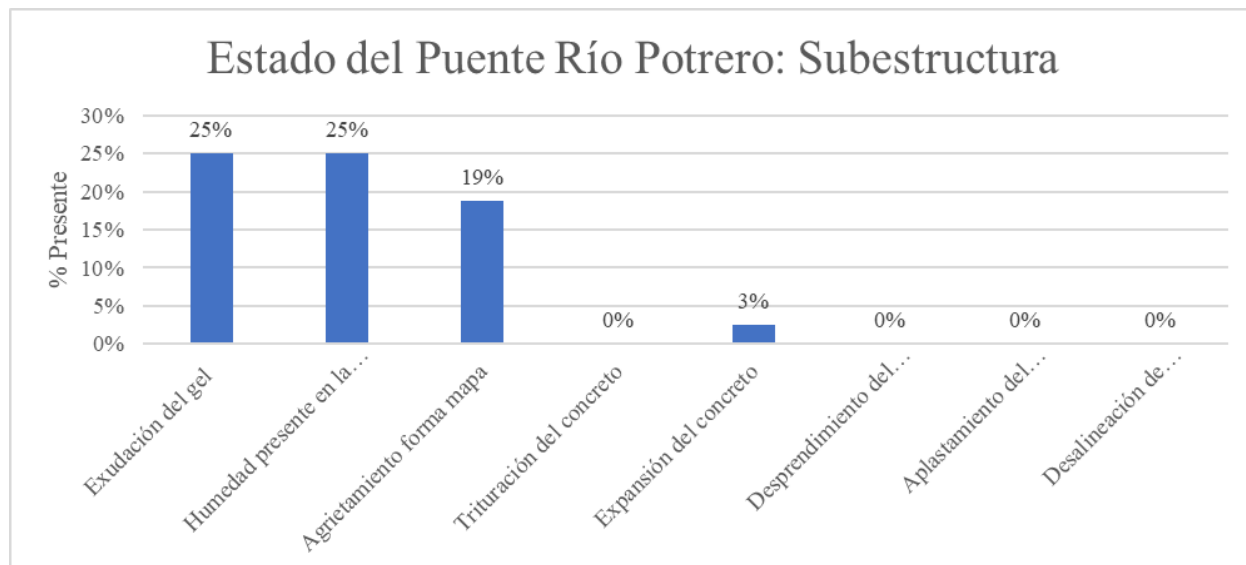
Estado de la subestructura del Puente Río Potrero

Estado del Puente Río Potrero: Subestructura				
Descripción	Peso	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	4	L	25%
Humedad presente en la estructura	25%	4	R	25%
Agrietamiento forma mapa	25%	3	L	19%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	2	R	3%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100	13		71%
Ponderación del sitio	%			
			Potencial patológico	

Nota. Tabla de elaboración propia

Figura 72

Gráfica del estado de la subestructura del Puente Río Potrero



Nota. Gráfico de elaboración propia

Según la tabla anterior, se determina que la subestructura presenta un potencial patológico álcali – carbonato, ya que obtuvo la calificación de 71%. De acuerdo con la gráfica anterior, se puede observar el comportamiento de los efectos del álcali - carbonato, por ejemplo: la exudación de gel presenta un 25%. Este porcentaje es muy alto debido a que se encuentra de manera regional en ciertos lados del bastión, además de que se logró observar a simple vista; la humedad presente en la estructura corresponde a un 25%, adicionalmente se encuentra presente en toda la estructura; el agrietamiento en forma de mapa se representó en un peso de 19% en los lados del bastión de manera regional en las zonas en donde exudó el gel; y la expansión del concreto obtuvo un peso de 3%, debido al agrietamiento en forma de mapa, que no se observa con un deterioro de gravedad como para provocar un colapso en la estructura.

Esta estructura se encuentra mayormente afectada por la humedad y la exudación del gel, mientras que el agrietamiento no llega a ser tan severo como para que el concreto se triture, se desalinee, se desprenda o aplaste el elemento contiguo. Respecto a los demás síntomas, se presenta un grado de daño nulo debido a que no se observaron en la zona donde se presentaba el álcali – carbonato.

Figura 73

Bastión 1 del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 74

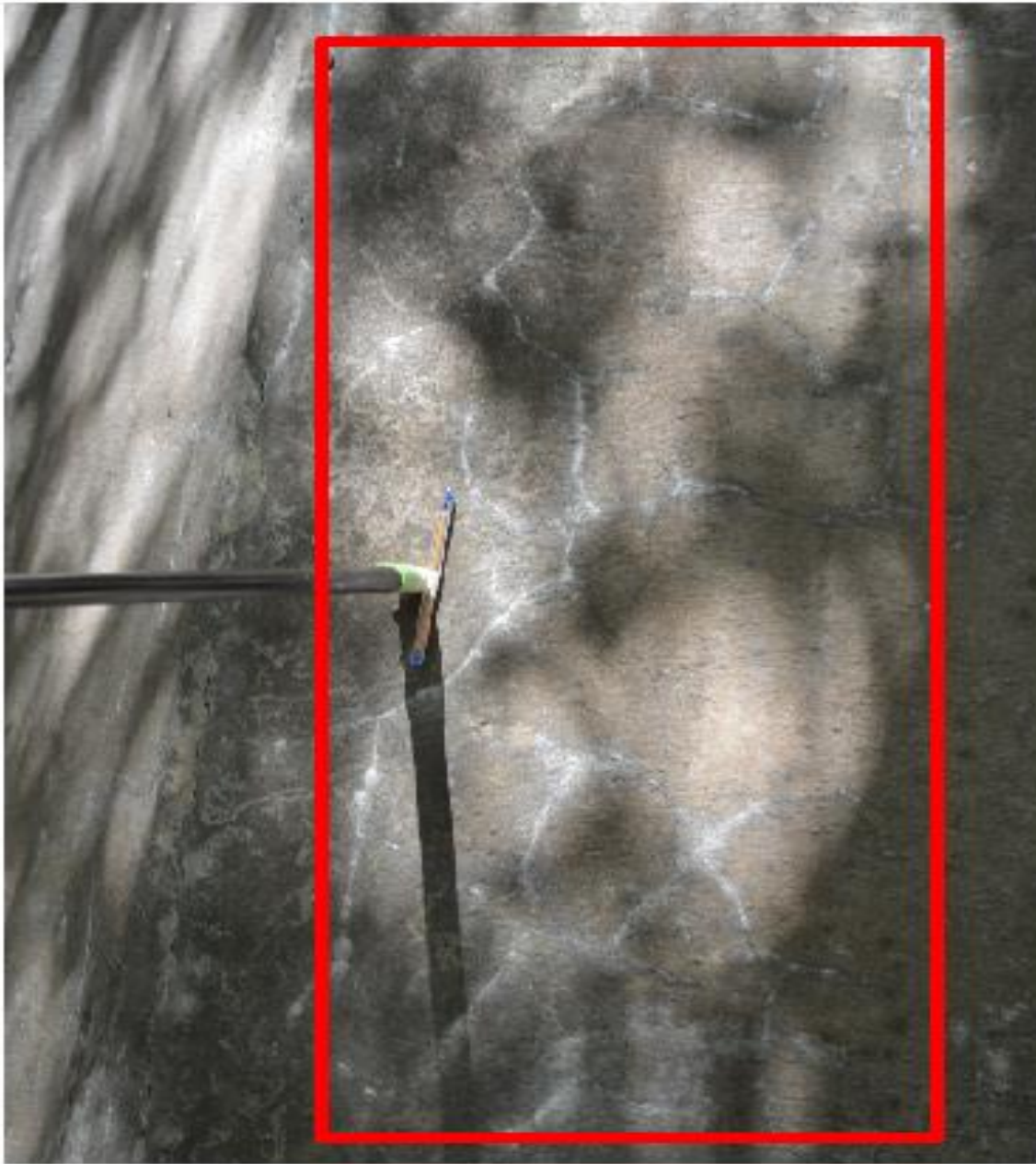
Bastión 2 del Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 75

Exudación de gel, agrietamiento forma de mapa y humedad-subestructura Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 76

Reacción álcali-carbonato en la subestructura Puente Río Potrero



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 30

Resistencia aproximada al concreto de la subestructura del Puente Río Potrero

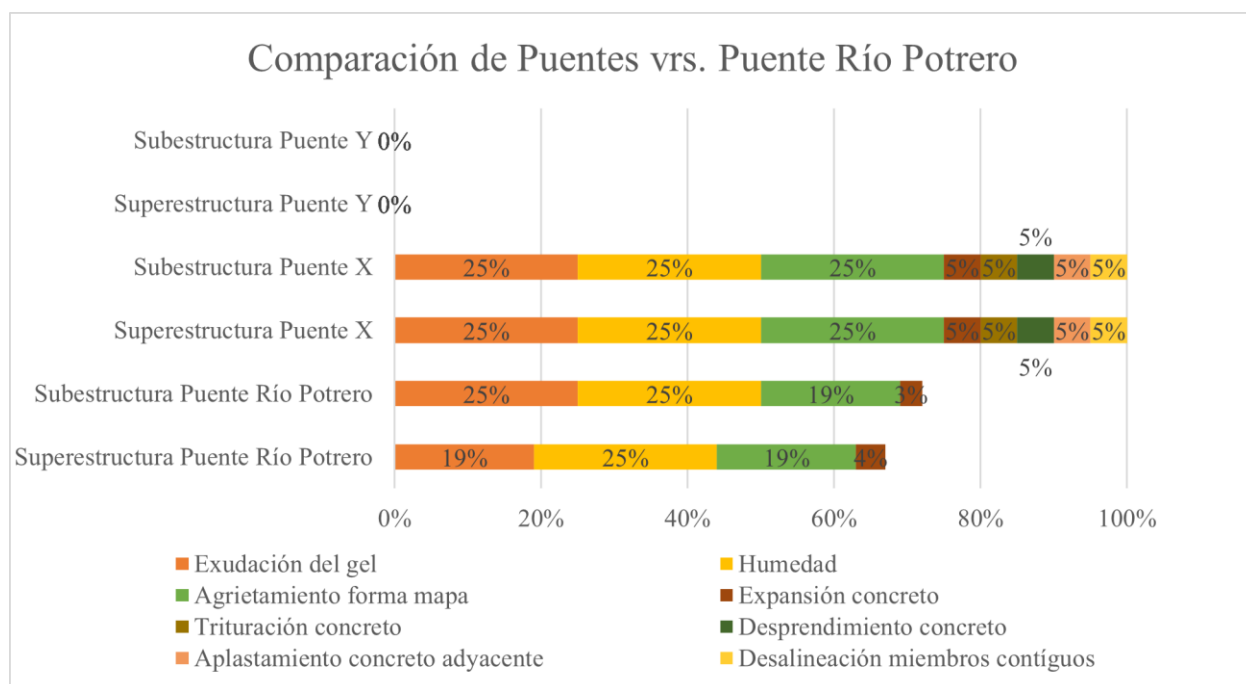
Puente Río Potrero			
Resistencia Aproximada al concreto: Subestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	36	1	47
2	32	2	48
3	30	3	47
4	30	4	49
5	31	5	51
6	28	6	48
7	34	7	44
8	36	8	50
9	34	9	50
10	30	10	44
Índice de Rebote	32	Índice de Rebote	48
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	238	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	480

Nota. Tabla de elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior los valores que se obtuvieron fueron: 480 kg/cm² para una zona que se encontró lisa y sin ningún deterioro, y 238 kg/cm² para la zona lisa, pero con presencia de agrietamiento. Esto demuestra que realmente existen zonas deterioradas que afectan la durabilidad del concreto como: el agrietamiento y la aparición de reacciones químicas de los agregados, puesto que la existencia de estas afecta en la resistencia del concreto. Si se compara este puente, con un Puente “Y” que no posee ningún síntoma álcali – carbonato, y con un Puente “X”, que se encuentra con todos los efectos de dicha patología, se obtienen los siguientes resultados:

Figura 77

Comparación Puente Río Potrero- Puente Sano- Puente Deteriorado (álcali-carbonato)



Nota. Gráfico de elaboración propia

Se puede observar que el Puente Río Potrero, comparado con el Puente “Y”, se encuentra mayormente deteriorado por sus porcentajes altos de ambos elementos estructurales, efectivamente se denota el álcali – carbonato en la estructura. A mediano plazo la subestructura podría presentar una mayor afectación, en donde los otros efectos que se calificaron como nulos en las inspecciones, sobresalgan; y en la superestructura, se espera el mismo proceso de desarrollo. La diferencia de porcentajes entre elementos estructurales no es tan variada. Estos daños afectarán la vida útil del concreto, y sus propiedades se verán mayormente afectadas.

Por otro lado, comparando el puente inspeccionado con el Puente “X”, se encuentra una equivalencia de porcentajes en los efectos entre subestructuras, por ejemplo, la humedad y exudación de gel. Pero, en lo que respecta al agrietamiento y a la expansión del concreto se presenta un porcentaje disminuido. Por otro lado, la superestructura del Puente Río Potrero se encuentra en mejor condición que la superestructura del Puente “X” y que la subestructura del

mismo Puente Río Potrero, sin embargo, el álcali – agregado continuará afectando las propiedades del agregado, y, por consiguiente, las propiedades del concreto, generando a mediano plazo, la aparición de los demás efectos considerados como nulos en esta inspección, y posteriormente, a largo plazo, un colapso.

Es importante recordar que la estructura actualmente cuenta con daños en la resistencia a compresión, según los resultados obtenidos de la prueba del esclerómetro, y, además, la estructura también contiene otra serie de deterioros que ha dado como resultado la reducción de la resistencia a compresión.

22. Ponderación de los resultados de los puentes con agregado de origen sedimentario

Según los resultados obtenidos a partir de los análisis de los puentes inspeccionados, se realizó una tabla en donde se muestran resumidamente los resultados obtenidos sobre su ponderación del sitio álcali – carbonato, esto en el caso de las estructuras en donde se determinó con agregados de origen sedimentario:

Tabla 31

Resultados ponderación del sitio para álcali-carbonato

Álcali-Carbonato		
Elemento Estructural	Ponderación del sitio	Porcentaje
Subestructura Puente Río San Lázaro	No aplica	25%
Pilas Puente Río San Lázaro	No aplica	25%
Superestructura Puente Río Potrero	Potencial patológico	25%
Subestructura Puente Río Potrero	No aplica	25%

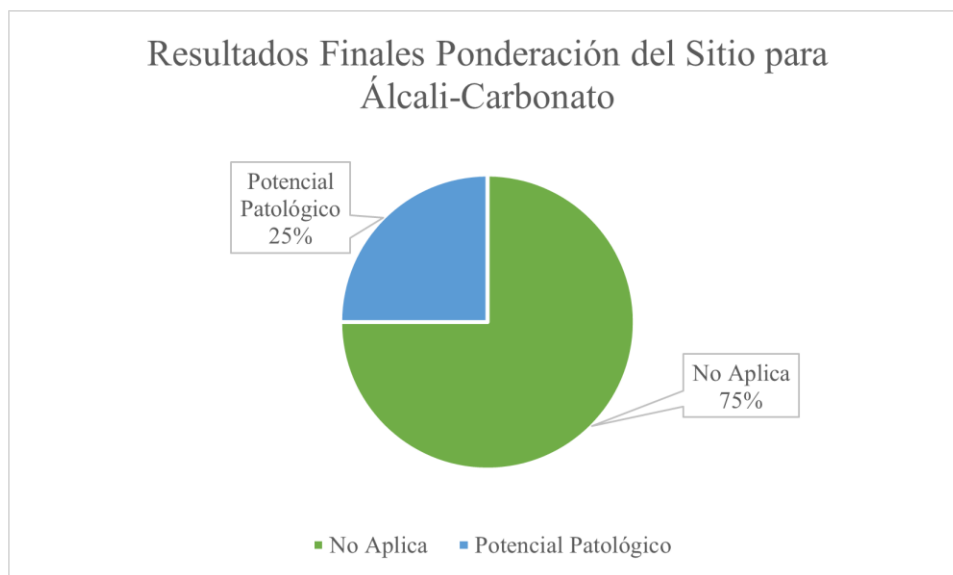
Nota. Tabla de elaboración propia

En la columna de “Elemento Estructural”, se encuentran los elementos estructurales de los puentes seleccionados que presentan el agregado de origen sedimentario; en la columna de “Ponderación del sitio” se encuentran los resultados de dicha ponderación de las tablas 22, 24, 27 y 29; por último, los porcentajes escritos en la última columna corresponden a los valores obtenidos de la división del 100% entre la cantidad de elementos estructurales. En la siguiente

gráfica se mostrarán de una manera más clara los resultados de la ponderación del sitio para estos puentes:

Figura 78

Gráfica de resultados ponderación del sitio para álcali-carbonato



Nota. Gráfico de elaboración propia

Los resultados que se brindaron en la gráfica anterior indican que, de las 4 variables estudiadas, el 75% de los elementos estructurales no posee un potencial patológico álcali - carbonato, al menos a partir de una inspección visual, mientras que el otro 25% si posee potencial patológico álcali – carbonato.

En cuanto al 25% que sí posee un potencial patológico, se debe mencionar que son elementos que, aunque están deteriorados, no se encuentran a un nivel de colapso, causado por la reacción química del agregado, a pesar de que las estructuras son muy antiguas. Según las inspecciones realizadas, se encuentra más deteriorado por otras razones que por la aparición del álcali – carbonato. Ahora bien, la superestructura del Puente Río San Lázaro formará parte de los resultados finales del álcali – sílice por el tipo de agregado que posee, que es propensa al tipo de patología álcali – sílice.

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre los efectos presentes en los elementos estructurales de los dos puentes estudiados, no se presentaron los siguientes efectos: trituración del concreto, desprendimiento del concreto, aplastamiento del concreto adyacente ni desalineación de miembros contiguos. A falta de estos indicios se puede concluir que, el álcali – carbonato no se encuentra en su máximo deterioro. A continuación, se mostrará la comparación de los efectos detectados entre los elementos de concreto:

Tabla 32

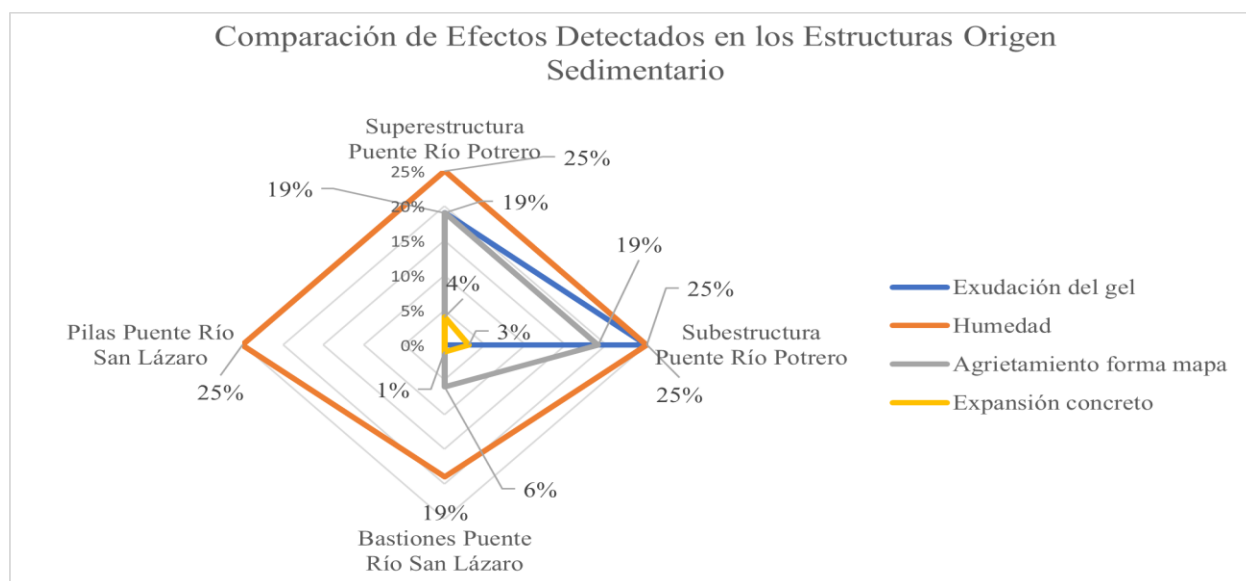
Comparación de efectos detectados en elementos estructurales (origen sedimentario)

Efectos en el concreto	Elementos Estructurales con Agregado de Origen Sedimentario			
	Superestructura	Subestructura	Bastiones Puente	Pilas Puente Río
	Puente Río Potrero	Puente Río Potrero	Río San Lázaro	San Lázaro
Exudación del gel	19%	25%	0%	0%
Humedad	25%	25%	19%	25%
Agrietamiento forma mapa	19%	19%	6%	0%
Expansión del concreto	4%	3%	1%	0%

Nota. Tabla de elaboración propia

Figura 79

Comparación de efectos detectados en los elementos estructurales (origen sedimentario)



Nota. Figura de elaboración propia

Se puede observar que, la superestructura y la subestructura del Puente Río Potrero, obtuvieron porcentajes más elevados que los elementos estructurales del Puente Río San Lázaro, construido en 1974. Estas estructuras tienen una diferencia de construcción de 38 años. Cabe destacar que ambos puentes cuentan con la misma condición climática por la ubicación, por tanto, presentan el mismo ciclo de temperatura y de lluvias para la aparición y desarrollo de deterioros en general y, particularmente, del álcali – carbonato.

También, ambas parecen compartir el mismo tipo de agregado reactivo en la subestructura, no obstante, el Puente Río Potrero se encuentra más en contacto con el agua del río por la cercanía hacia los bastiones, por ende, hay mayor humedad presente, y al ser la estructura de mayor antigüedad, el impacto de estos efectos a través del tiempo es mayor.

Aunque las pilas del Puente Río San Lázaro están en contacto continuo con el agua de río (lo que le proporciona suficiente humedad para el desarrollo del álcali – carbonato), no se detectan los suficientes síntomas como para observar un potencial patológico.

Ahora bien, de ambas estructuras, únicamente el Puente Río Potrero, en su totalidad presenta un potencial patológico álcali – carbonato. Debido a esto, para alargar el tiempo de vida útil de la estructura, es conveniente realizarle ciertas mejoras, por ejemplo: empleando aditivos a base de litio, los cuales suelen utilizarse cuando la patología se observa expuesta en la estructura. Los materiales cementantes suplementarios no son una opción viable en este caso pues se utilizan al inicio de una obra, cuando se realiza la mezcla.

23. Puente Río Poás

Tabla 33

Identificación del Puente Río Poás

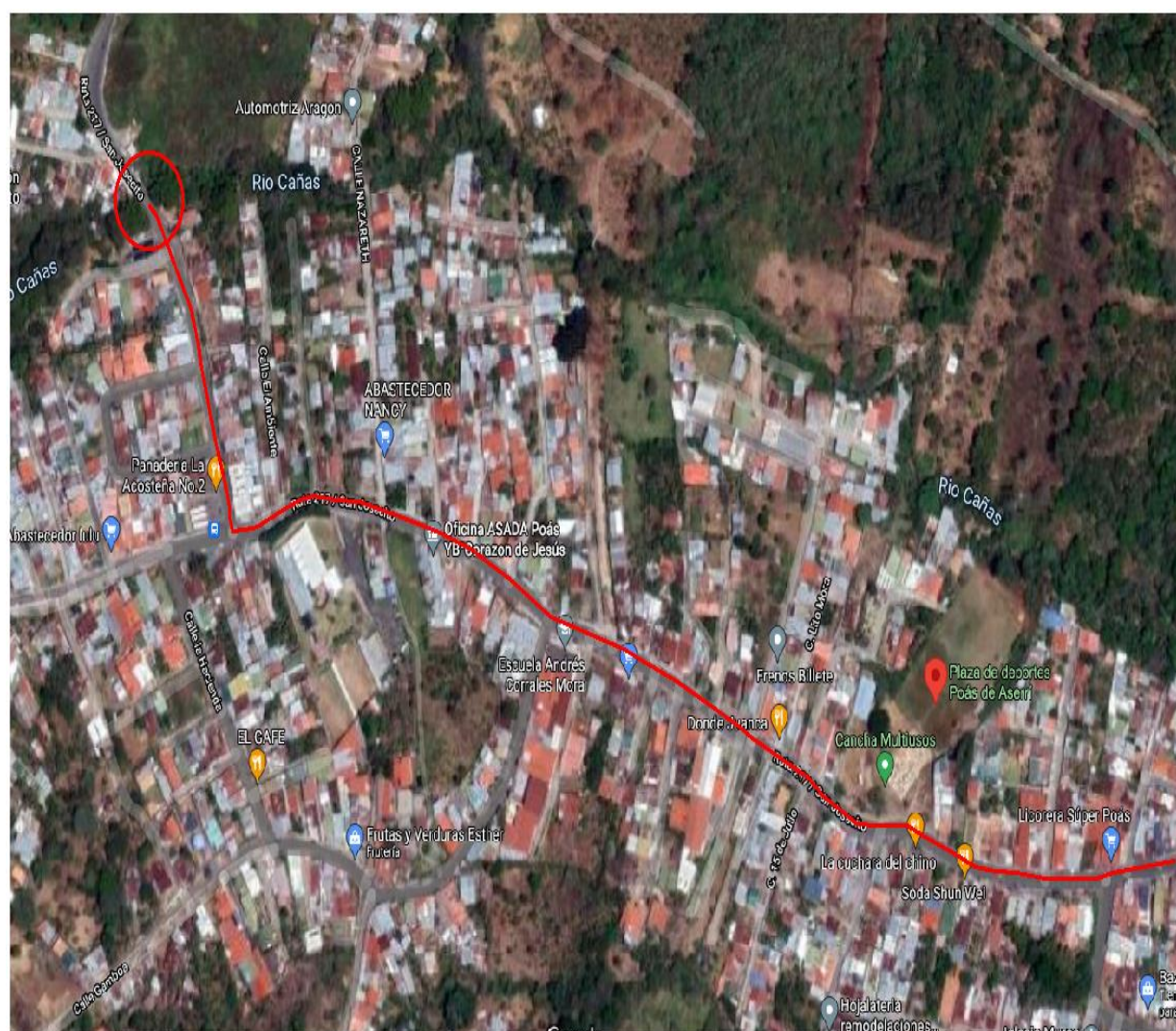
Dato	Descripción
Ubicación	Aserrí, Aserrí, San José. Dirección de vía hacia Alajuelita.
Ruta	217

Edad	1974
Río o Cuenca	Río Poás
Longitud entre Bastiones	11,57 m

Nota. Tabla de elaboración propia basada en el SAEP (2016)

Figura 80

Ruta hacia el Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 81*Ubicación Puente Río Poás*

Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 82

Vista lateral del Puente Río Poás



Nota. Figura tomada del SAEP (2016)

Figura 83

Puente Río Poás



Nota. Figura tomada del SAEP (2016)

Figura 84

Agregado de la superestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Siguiendo la base teórica propuesta en capítulos anteriores, el agregado riolita posee una tonalidad de gris claro a blanco y tiene también tiene cristales de tamaños menor a 1mm. Según la inspección visual, el agregado que sobresale del concreto y se encuentra encerrado con círculos rojos en la ilustración anterior posee un color gris claro, además, en el agregado se observaron pequeñas manchas cristalinas, muy similar a las características de la roca mencionada anteriormente. Por tanto, el agregado es determinado como riolita, que proviene del grupo de rocas ígneas.

La reacción química de algunos de los agregados de las rocas ígneas corresponde al álcali – sílice, debido a que para que esta patología se manifieste en la estructura, es necesario la reacción de los álcalis del cemento, es decir, el sodio y el potasio, con minerales silíceos presentes en ciertos agregados ígneos, entre los que se encuentran el cuarzo, ópalo y vidrio volcánico.

La roca riolita se compone mineralógicamente de cuarzo (que según el ACI 201.2R es una sustancia reactiva), feldespatos, plagio clase, vidrio y mica, según Chan J. et. Al (2003), Tabla 11 del presente proyecto, por tanto, la superestructura tiene la posibilidad de presentarse como un potencial patológico alto.

Figura 85

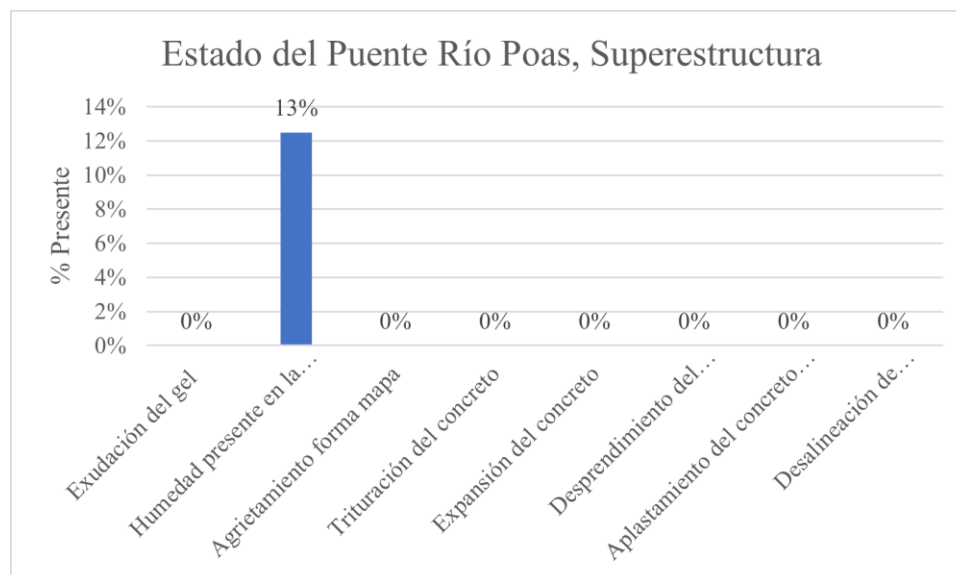
Superestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 34*Estado de la superestructura del Puente Río Poás*

Estado del Puente Río Poas: Superestructura				
Descripción	Peso	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	0	-	0%
Humedad presente en la estructura	25%	2	R	13%
Agrietamiento forma mapa	25%	0	-	0%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	0	-	0%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	2		13%
Ponderación del Sitio	No Aplica			

Nota. Tabla de elaboración propia**Figura 86***Superestructura del Puente Río Poás**Nota.* Gráfico de elaboración propia

Los resultados de la tabla anterior indican un 13%, es decir no aplica para un potencial patológico alto, debido a los pocos síntomas presentes en la estructura para evidenciar el álcali – sílice. Otra observación relevante es la de la humedad, que se presenta en un peso de 12,50%, (ver Figura 88), del resto de los síntomas no se observó evidencia. Los efectos en el concreto no son perjudiciales.

Por otro lado, se observó agrietamiento de la superestructura debido a otros factores, y por tanto, se puede concluir que sí existe presencia de expansión del concreto (ver figuras 87 y 89). También, debido a la falta de vibrado, se denotó el agregado sobresaliendo en la superficie (ver Figura 87).

Figura 87

Agrietamiento de la superestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 88

Humedad y manifestación del agregado en la superestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 89

Agrietamiento en la superestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 35*Resistencia aproximada al concreto en la superestructura del Puente Río Poás*

Puente Río Poas			
Resistencia Aproximada al concreto: Superestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	47	1	45
2	47	2	50
3	43	3	48
4	43	4	42
5	43	5	46
6	46	6	46
7	42	7	46
8	46	8	46
9	46	9	49
10	42	10	49
Índice de Rebote	45	Índice de Rebote	47
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	375	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	410

Nota. Tabla de elaboración propia

Los resultados de la tabla anterior expresan que la resistencia aproximada para el concreto en donde la zona fue lisa, pero con agrietamiento presente, fue de 375 kg/cm², mientras que la resistencia aproximada al concreto para una zona en donde no se presentó ningún deterioro fue de 410 kg/cm². Los resultados determinan que la estructura no se encuentra con deterioros que requieran de intervención ingenieril alguna, aunque sí delimita zonas en donde hay presencia de algunos daños, puesto que hay un ligero descenso en la resistencia aproximada al concreto de una zona dañada.

En la siguiente ilustración se mostrará el agregado que se utilizó en la construcción de los bastiones del puente:

Figura 90

Agregado en la subestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

El agregado encerrado en el círculo rojo contiene características ópticas similares a las del agregado que se utilizó para la construcción de la superestructura: tiene un color gris claro y posee ciertos cristales dentro de ella, por tanto, se determina que la roca perteneciente a esta estructura es riolita, roca de origen ígneo. También, debido a que corresponde al mismo agregado que en la superestructura, se afirma que la reacción química de los agregados para esta estructura corresponde al álcali – sílice. En la siguiente tabla se mostrarán los resultados obtenidos de la inspección visual con respecto a la reacción química del agregado:

Tabla 36

Estado de la subestructura del Puente Río Poás

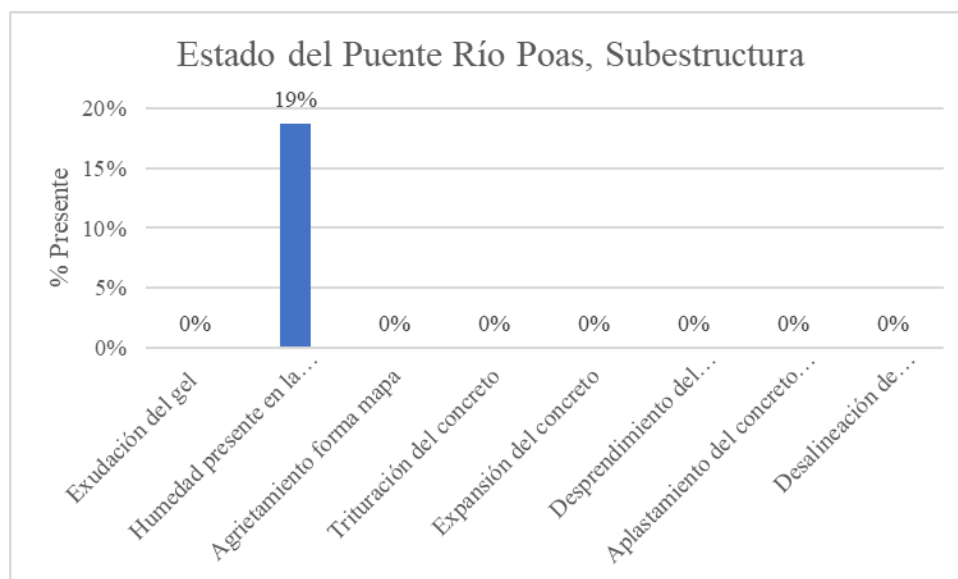
Estado del Puente Río Poas: Subestructura				
Descripción	Peso	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	0	-	0%
Humedad presente en la estructura	25%	3	R	19%
Agrietamiento forma mapa	25%	0	-	0%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	0	-	0%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	3		19%
Ponderación del Sitio	No aplica			

Nota. Tabla de elaboración propia

De acuerdo con la tabla anterior, se determina que los bastiones no aplican para ser un potencial patológico debido a su calificación, la cual es un 19%. En la siguiente gráfica, demostrará la afectación de los síntomas de la Tabla 37.

Figura 91

Gráfica del estado de la subestructura del Puente Río Poás



Nota. Gráfica de elaboración propia

La humedad es un factor que genera deterioros y que se encuentra muy presente en la estructura (ver figuras 88, 89, 90 y 91). Respecto al resto de los síntomas relacionados con la patología álcali – sílice, no se encuentra evidencia de su existencia en la estructura. Lo que sí se observó fueron agrietamientos debido a otros factores, por ende, expansión en el concreto. Estas expansiones no generaron desalineación de miembros contiguos ni aplastamiento en las juntas, ni tampoco son notorias a simple vista, pero sí se observó que están presentes de manera regional, por lo que el elemento estructural se reporta en condiciones óptimas. También se evidenció la manifestación de eflorescencia (ver figuras 88 y 91).

Figura 92

Humedad y eflorescencia en bastiones del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 93

Humedad presente en el bastión del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 94

Humedad presente en el bastión 2 del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 95

Humedad presente en la subestructura del Puente Río Poás



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 37*Resistencia aproximada al concreto del Puente Río Poás*

Puente Río Poas			
Resistencia Aproximada al concreto: Subestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	35	1	38
2	32	2	46
3	34	3	40
4	31	4	45
5	33	5	49
6	31	6	46
7	29	7	42
8	33	8	50
9	32	9	44
10	30	10	42
Índice de Rebote	32	Índice de Rebote	44
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	238	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	420

Nota. Tabla de elaboración propia

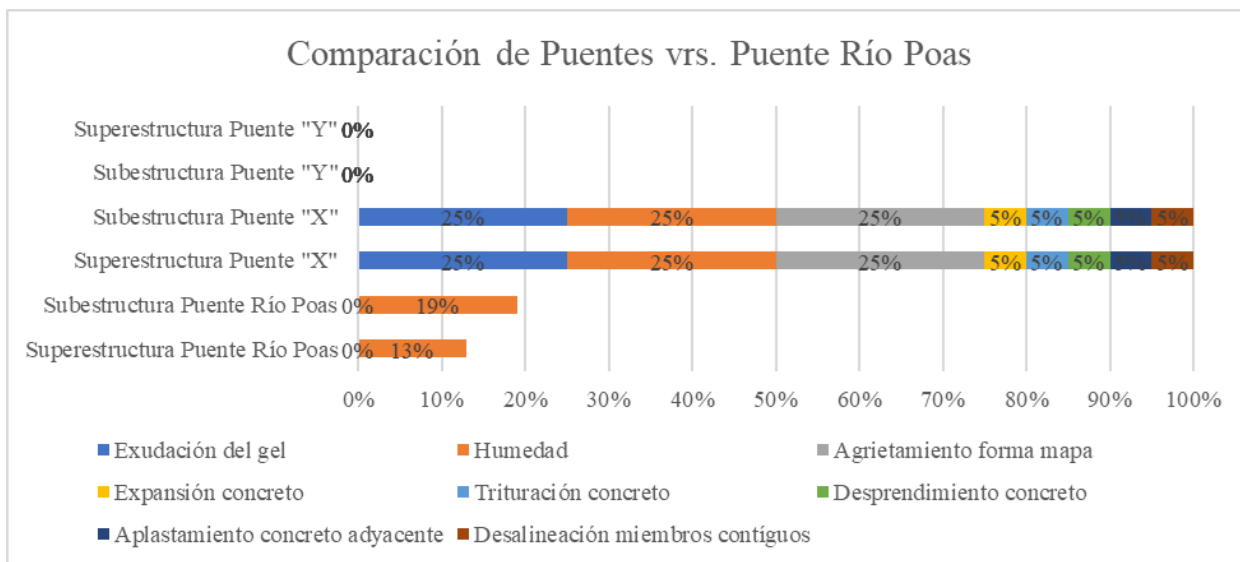
Según los resultados de la Tabla 38, se estima que en la zona con agrietamientos o zona dañada corresponde a una resistencia aproximada de 238 kg/cm², mientras que para una zona sin deterioro alguno determinó 420 kg/cm².

El primer resultado delimita que los daños presenciados han afectado la resistencia del concreto en comparación con el resultado para una zona no afectada, pues en la zona afectada se puede observar humedad, eflorescencia y agrietamiento a lo largo y ancho de la estructura, sin embargo, como se dijo anteriormente, el agrietamiento no se percibe fácilmente, se debe ver con mucha cercanía al concreto.

Esta estructura, se comparó con un Puente “Y”. El puente “Y” es una estructura que se encuentra en óptimas condiciones, no cuenta con ningún deterioro, las propiedades del concreto y de sus agregados se encuentran intactas y su vida útil y de servicio se encuentra en perfecto estado. Al contrario, el Puente “X” que se encuentra completamente deteriorado con álcali – sílice:

Figura 96

Comparación Puente Río Poás- Puente Sano-Puente Deteriorado (álcali-sílice)



Nota. Gráfica de elaboración propia

En la comparación del Puente “Y” con el Puente Río Poás, se observa que sus superestructuras son muy similares. El Puente Río Poás solamente cuenta con la presencia de humedad, que inflige cierto deterioro sobre la estructura. En este sentido, es el elemento menos deteriorado del análisis de estructuras con agregado de origen ígneo, sin embargo, el álcali – sílice no afecta en esta estructura, por la ausencia de los demás síntomas, a pesar de contener minerales reactivos en el agregado.

La humedad es un indicio de un futuro deterioro que se puede desarrollar a mediano y largo plazo, perjudicando la durabilidad y las resistencias del concreto. La humedad también da inicio al desarrollo del álcali – sílice, no obstante, actualmente la estructura se encuentra en condiciones óptimas de servicio y fuera del alcance de un potencial patológico, incluso a mediano plazo. Ahora bien, en comparación con la superestructura Puente “X”, la cual se encuentra completamente deteriorada, esta estructura se confirma que se encuentra con calidad de vida.

La subestructura del Puente Río Poas presenta un único efecto en el concreto: 19% para la humedad. Si se relaciona con la subestructura del Puente “Y”, la estructura se encuentra en

óptimas condiciones por la falta de efectos del álcali – sílice. Por ahora, este elemento no posee un potencial patológico, no obstante, no se descarta la posibilidad de que lo desarrolle a largo plazo, ya que el álcali – sílice es una patología que inicia en cualquier lugar de la estructura en donde exista agrietamiento o un concreto bastante poroso. Aunado esto al álcali del cemento y la sílice reactiva, pueden generarse dicha patología. A mediano plazo lo que se podría esperar es un progresivo desarrollo del síntoma encontrado actualmente, ya que, si se compara con la subestructura del Puente “X”, se descarta la aparición del álcali – sílice prontamente por la falta de síntomas.

Es importante recordar que, según los datos obtenidos de la prueba del esclerómetro, la estructura actualmente se encuentra dañada en la resistencia a compresión, no obstante, la estructura también contiene otra serie de deterioros que ha dado como resultado la reducción de la resistencia a compresión.

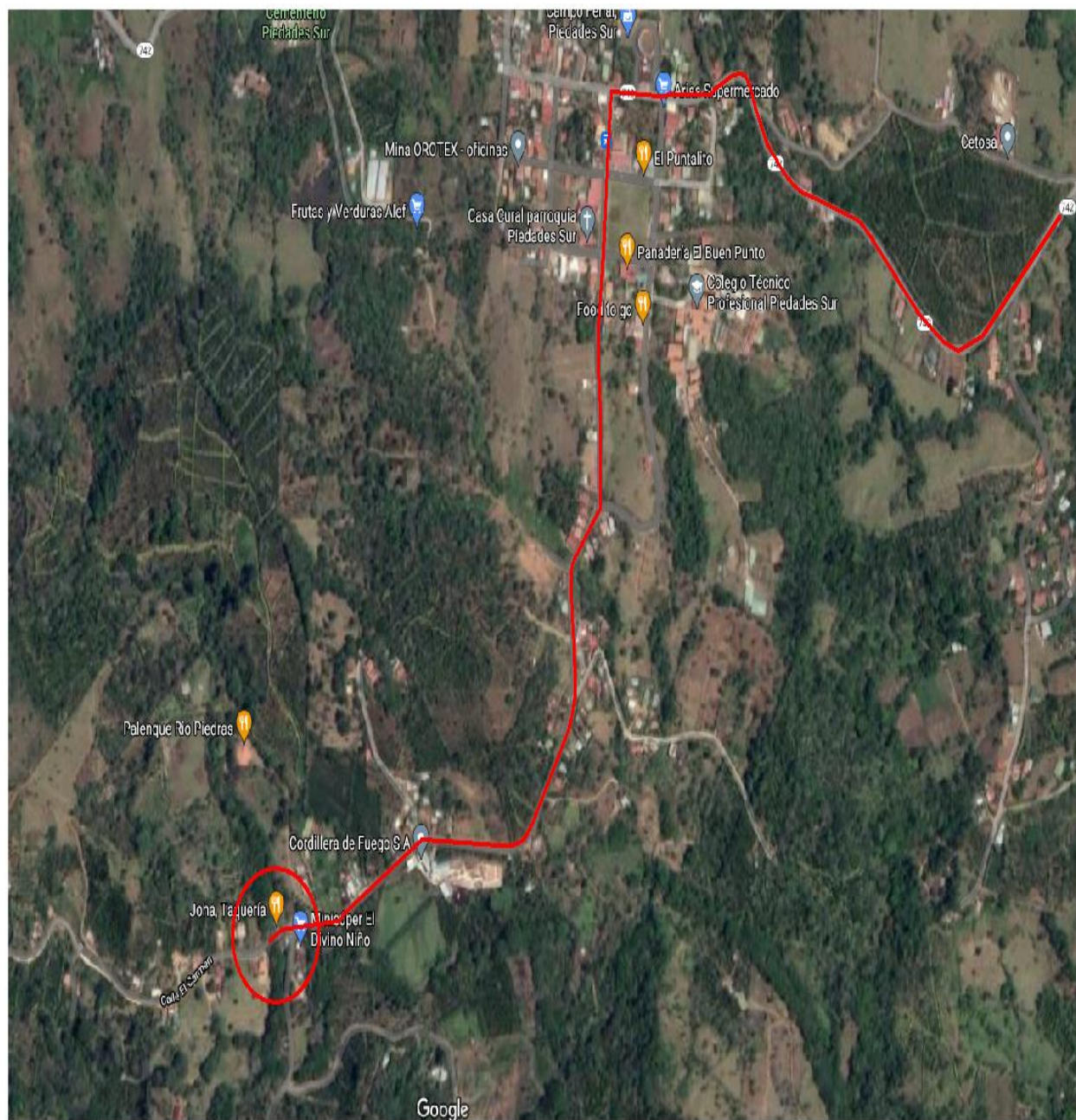
24. Puente Río Piedras

Tabla 38

Identificación Puente Río Piedras

Dato	Descripción
Ubicación	Piedades Sur, San Ramón, Alajuela. Dirección de vía hacia Piedades Sur.
Ruta	742
Edad	1924
Río o Cuenca	Río Piedras
Longitud entre Bastiones	9,10 m

Nota. Tabla de elaboración propia basada en SAEP (2016)

Figura 97*Ruta hacia Puente Río Piedras*

Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 98

Ubicación Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia con Google Maps y AutoCAD

Figura 99

Puente Río Piedras



Nota. Figura tomada de SAEP (2016)

Figura 100

Vista lateral del Puente Río Piedras



Nota. Figura tomada de SAEP (2016)

Figura 101

Agregado de la superestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

El agregado mostrado en la ilustración anterior presenta una tonalidad gris oscura, con textura áspera y brillo opaco, muy similar lo que se menciona en la base teórica del presente proyecto sobre el basalto. Por lo que se puede definir el basalto como el agregado empleado para esta estructura.

Según lo mencionado por el Ingeniero Oscar Calvo Carranza en Tabla 12, la roca basalto, se compone mineralógicamente, por: sílice, óxido de aluminio, óxido de sodio, óxido de calcio y óxido de potasio. Al haber presencia de sílice en la estructura, la reacción química posible en esta estructura es el álcali – sílice. A continuación, se mostrará el resultado del estado de la superestructura del puente con respecto a la inspección visual realizada para verificar su potencial patológico:

Tabla 39*Estado de la superestructura del Puente Río Piedras*

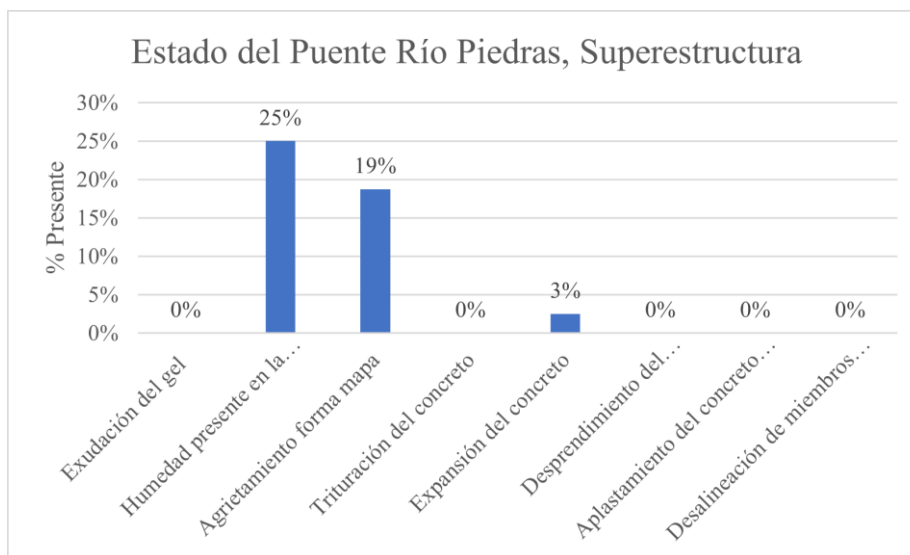
Estado del Puente Río Piedras: Superestructura				
Descripción	Peso	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	0	-	0%
Humedad presente en la estructura	25%	4	R	25%
Agrietamiento forma mapa	25%	3	R	19%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	2	R	3%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	9		46%
Ponderación del sitio	Aceptación parcial			

Nota. Tabla de elaboración propia

Los resultados de la tabla indican que a la superestructura se le puede asignar una aceptación parcial por su calificación final de 46%. La razón de su clasificación es por la complejidad del acceso hacia la zona donde podría presenciarse el álcali – sílice, debido a esto no se logra apreciar si en realidad posee gel álcali – sílice, ni tampoco se pudieron obtener pruebas fotográficas por su lejanía. La Tabla 40 indica que la humedad presente en la estructura se encuentra de manera regional o a lo largo y ancho de la estructura, mientras que la exudación de gel se presentó a lo largo de la barrera vehicular, y la expansión debido a este agrietamiento se encuentra de manera regional también. En la siguiente gráfica se muestran los efectos en la estructura con respecto a los resultados de la tabla anterior:

Figura 102

Gráfica del estado de la superestructura del Puente Río Piedras



Nota. Gráfica de elaboración propia

25%, un nivel muy alto. Aunque la humedad no se puede clasificar como un deterioro, si forma parte de los factores que fomentan daños en la estructura, por lo que la superestructura se encuentra muy vulnerable a continuar desarrollando los factores que benefician el deterioro de la estructura, por ejemplo, la abrasión, reacciones químicas de los agregados, corrosión del acero de refuerzo, entre otros.

La barrera vehicular presenta un patrón de agrietamiento en forma de mapa con un 19% de afectación, pero no se encuentra completamente deteriorada. En este agrietamiento no se observa el pop – out, ni el aplastamiento del concreto adyacente ni desalineación de miembros contiguos. La exudación de gel no se logró observar debido a que la zona de la barrera vehicular donde se observó el agrietamiento es difícil de acceder para observar con seguridad. Por todo lo anterior, se logran observar dos de los tres síntomas que son propiamente de la patología (humedad y agrietamiento en forma de mapa), por lo que visualmente es un indicativo de que podría presentar potencial patológico, sin embargo, no se confirma como potencial patológico. Debido a esto, es necesario realizar un ensayo petrográfico para corroborar si realmente la estructura posee la reacción álcali – sílice.

Para esta situación, se propone como solución para evitar la propagación de esta patología, la aplicación de aditivos a base de litio. Según la teoría, esta opción se aplica cuando el concreto se encuentra endurecido, y el álcali – sílice se está presente en la estructura.

Por otro lado, la estructura se mostró muy deteriorada, debido a exposición de la armadura en las vigas principales, que además se encuentran completamente corroídas y con eflorescencia (ver Figuras 103, 104, 105 y 106).

Figura 103

Agrietamiento con forma de mapa en la barrera vehicular del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 104

Exposición de la armadura en la superestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 105

Corrosión del acero en la superestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 106*Eflorescencia en la superestructura del Puente Río Piedras**Nota.* Figura de elaboración propia**Tabla 40***Resistencia aproximada al concreto de la superestructura del Puente Río Piedras*

Resistencia Aproximada al concreto: Superestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	29	1	32
2	25	2	34
3	28	3	28
4	27	4	34
5	25	5	31
6	28	6	30
7	26	7	30
8	26	8	30
9	25	9	32
10	27	10	30
Índice de Rebote	27	Índice de Rebote	31
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	105	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	122

Nota. Tabla de elaboración propia

En la tabla anterior se pueden observar los siguientes resultados sobre el análisis de la estructura: para la zona con agrietamiento o zona afectada se cuenta con una resistencia aproximada de 105 kg/cm², y en la zona donde no se presentó agrietamiento se obtuvo un resultado de 122 kg/cm². Como se puede observar en las fotos y comprobar con la prueba del esclerómetro, la superestructura se encuentra realmente deteriorada, y las resistencias obtenidas por los resultados se encuentran por debajo del mínimo de diseño, por lo que urge una intervención para realizar mejorías. Se puede decir que la zona en donde se encuentra esta estructura no es una carretera muy transitada, sin embargo, es notorio el nulo mantenimiento que se le ha brindado.

Figura 107

Condición de la superestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 108

Agregado de la subestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

El agregado encerado con el círculo rojo posee características visuales similares a la superestructura como: la tonalidad gris oscura, su brillo opaco y su textura áspera. Por tanto, el agregado utilizado para la subestructura corresponde a la roca basalto, proveniente de la roca natural ígnea, y, por consiguiente, al ser similar a la superestructura con respecto al agregado, la reacción química deletérea en agregado perteneciente al bastión es álcali – sílice. En la siguiente tabla se determina el resultado de la sintomatología del álcali – sílice en la estructura:

Tabla 41

Estado de la subestructura del Puente Río Piedras

Estado del Puente Río Poas: Subestructura				
Descripción	Peso	Grado de Daño	Carácter Espacial	Presente
Exudación del gel	25%	4	L	25%
Humedad presente en la estructura	25%	4	R	25%
Agrietamiento forma mapa	25%	3	R	19%
Trituración del concreto	5%	0	-	0%
Expansión del concreto	5%	3	R	4%
Desprendimiento del concreto (pop-outs)	5%	0	-	0%
Aplastamiento del concreto adyacente (juntas)	5%	0	-	0%
Desalineación de miembros contiguos	5%	0	-	0%
Total	100%	14		73%
Ponderación del sitio	Potencial patológico			

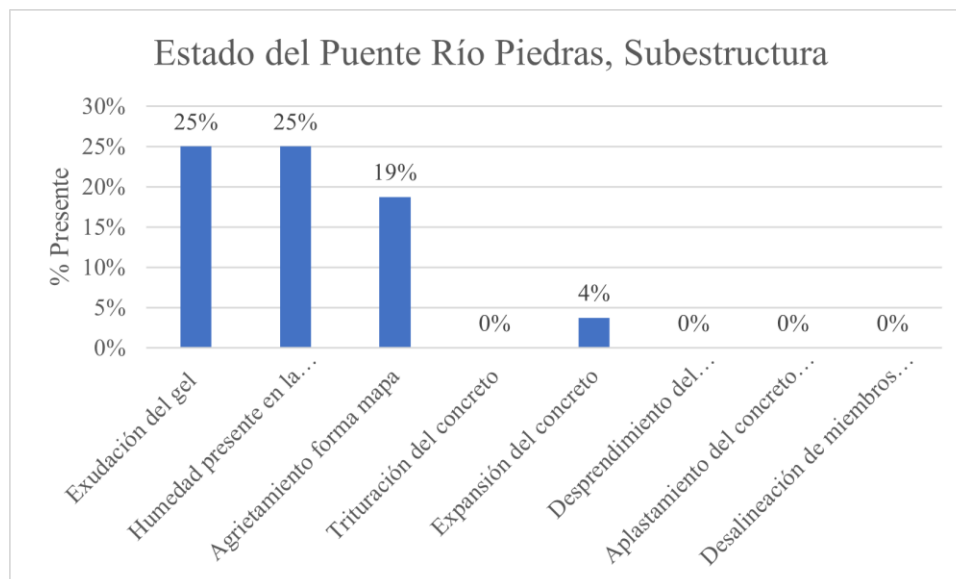
Nota. Tabla de elaboración propia

La estructura presenta un potencial patológico, por su calificación final de 73%. La humedad presente en el concreto se encuentra presente en todo el bastión, en donde el agrietamiento en forma de mapa surgió de manera regional en los aletones del bastión, generando expansión en el concreto con el mismo carácter espacial. La exudación del gel en el concreto se presentó dentro del agrietamiento en forma de mapa de manera local, en dirección vertical hacia arriba.

En la siguiente gráfica se explicará el comportamiento de la estructura con respecto al álcali – sílice:

Figura 109

Gráfica de la subestructura del Puente Río Piedras



Nota. Gráfica de elaboración propia

Como se puede observar, la humedad se presenta en un 25%, lo cual implica un gran aporte ante el álcali – sílice y cualquier deterioro que lo requiera, y además causa que, físicamente la estructura se observe muy dañada. El agrietamiento es una de las afectaciones más avanzadas, pero no implica un deterioro tan grande como para provocar un colapso en la estructura. La expansión del concreto se encuentra en un 4% y es provocada por la exudación del gel, que, a su vez, se genera debido al agrietamiento. Por último, la exudación del gel obtuvo un 25%, físicamente se observa la estructura completamente deteriorada de forma puntual.

Figura 110

Condición del bastión y subestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 111

Humedad, agrietamiento, expansión y exudación del gel en la subestructura del Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 112

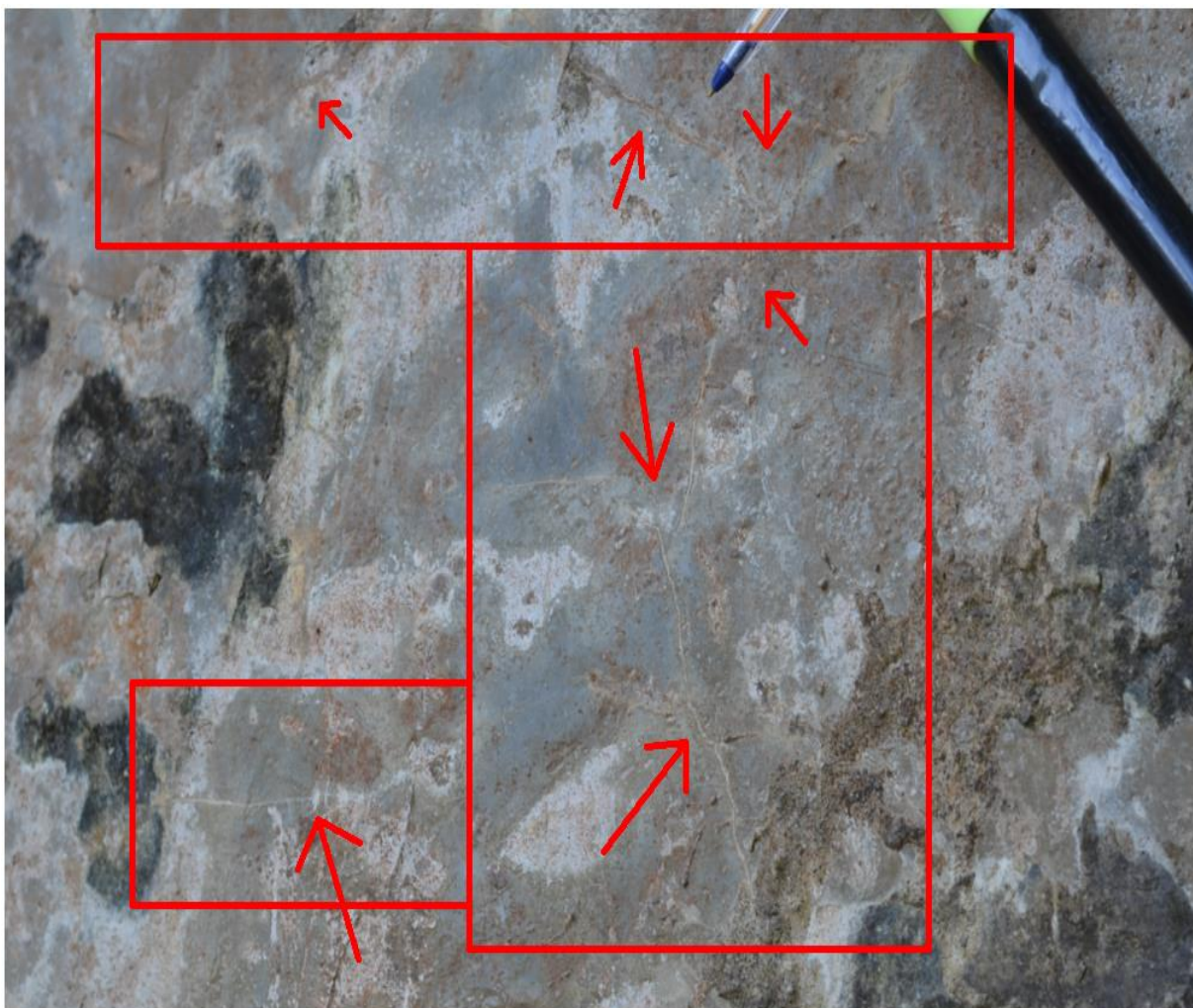
Presencia del álcali-sílice en el Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Figura 113

Señalización de la reacción álcali-sílice en el Puente Río Piedras



Nota. Figura de elaboración propia

Tabla 42*Resistencia aproximada al concreto en la subestructura del Puente Río Piedras*

Puente Río Piedras			
Resistencia Aproximada al concreto: Subestructura			
Zona Afectada		Zona No Afectada	
Medición (n)	Valor de Rebote	Medición (n)	Valor de Rebote
1	36	1	36
2	28	2	39
3	34	3	36
4	38	4	37
5	36	5	36
6	36	6	36
7	34	7	38
8	35	8	37
9	35	9	37
10	34	10	39
Índice de Rebote	35	Índice de Rebote	37
Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	280	Resistencia Aprox. concreto (kg/cm²)	310

Nota. Tabla de elaboración propia

En la tabla anterior se muestran los siguientes resultados: para una zona no dañada, se obtuvo una resistencia aproximada de 310 kg/cm², y en una zona en donde si hubo afectación del concreto mediante agrietamiento se obtuvo un resultado de resistencia aproximada de 280 kg/cm². Estos datos indican que se delimitan zonas con deterioros con respecto al resultado 479 kg/cm². Cabe destacar que los resultados anteriores, al igual que todas las tablas sobre resistencias brindadas en el presente estudio, son un aproximado de una resistencia del concreto.

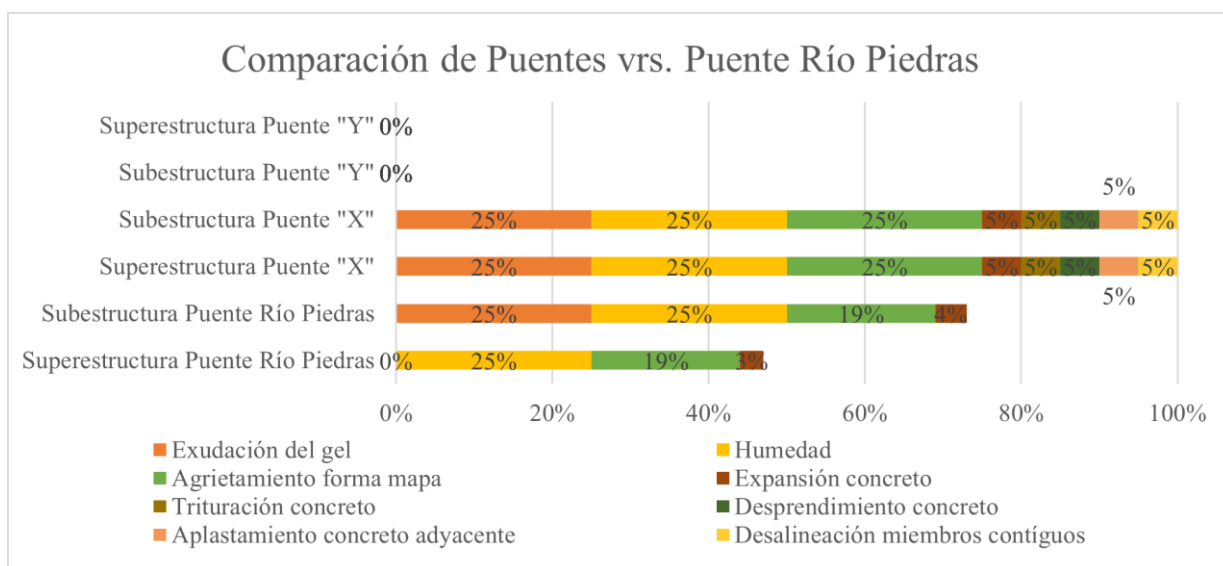
Comparando los resultados de la subestructura con los resultados de la superestructura de este puente, se puede determinar que la superestructura cuenta con una mayor deficiencia en las resistencias del concreto, por tanto, la durabilidad de la estructura se encuentra afectada también. Las propiedades del agregado, tales como su resistencia y su tenacidad causan el deterioro de las resistencias del concreto, por lo que se puede decir que tanto la superestructura como la subestructura se encuentran en pésimas condiciones, para formar parte de un puente en funcionamiento. En la Figura 110 se logra observar la cimentación debajo del bastión, un

elemento estructural el cual soporta las cargas de la estructura y las envía al suelo, y que además se encuentra debajo del suelo, por tanto, no debe ser visible en la superficie de la capa vegetal, por lo que se determina que hubo socavación en esa zona.

Se analizó este puente mediante una comparación entre dos tipos de puentes: un Puente “Y”, que sería el ideal, en donde no se encuentra álcali – sílice ni tampoco afectaciones en las propiedades del agregado ni del concreto; y un Puente “X”, el cual se representa una estructura completamente deteriorada debido al álcali – sílice, y con ella, deterioros en las propiedades del concreto y del agregado. Adicionalmente, se asume que estos dos últimos puentes cuentan con el mismo agregado que contiene el Puente Río Piedras. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 114

Comparación Puente Río Piedras- Puente Sano- Puente Deteriorado (álcali-sílice)



Nota. Gráfica de elaboración propia

Según la comparación de la superestructura del Puente Río Piedras con la superestructura del Puente “Y”, se puede observar que el Puente Río Piedras se encuentra deteriorado, con 3 efectos del álcali – sílice de alto porcentaje presente; 25% de humedad, 19% de agrietamiento y un 3% de expansión del concreto, por lo que las resistencias del concreto se encuentran afectadas, al igual que la durabilidad.

Potro lado, con respecto a la superestructura del Puente “X”, se observa que el elemento se encuentra deteriorado por los síntomas presentes, cuyos porcentajes se aproximan a los

mismos efectos del Puente “X”, sin embargo, aún no se confirma su potencial patológico. A mediano plazo, probablemente se llegue a confirmar el potencial patológico de la superestructura, ya que solo se necesita la exudación del gel para corroborar el álcali – sílice. Es importante indicar que la superestructura no se encuentra con un deterioro tan avanzado como para que el concreto se desprenda, se desalinee, aplaste al elemento adyacente ni se triture, pero definitivamente debido a los efectos presentes, la estructura cuenta con problemas en las propiedades del concreto (como en las resistencias), por ende, afecta la durabilidad del concreto, disminuyendo su vida útil. Este elemento estructural es el menos deteriorado comparado con la subestructura del mismo puente.

Al comparar la subestructura del Puente Río Piedras, con la subestructura del Puente “Y”, se puede observar que el primero se encuentra altamente deteriorado por sus altos porcentajes de cada efecto presente. Por otro lado, su comparación con respecto a la subestructura del Puente “X”, resulta ser equivalente en cuanto a los efectos de la exudación y humedad, mientras que con el agrietamiento se aproxima al 5%.

Actualmente la estructura cuenta con un gran deterioro en las resistencias a compresión, y al ser un potencial patológico, la durabilidad del concreto disminuye, reduciendo su vida útil. A mediano plazo se esperaría que las resistencias vayan deteriorándose aún más, denotándose sobre la superficie los daños que actualmente se encuentran nulos, como la trituración, aplastamiento del elemento adyacente, desprendimiento del concreto y desalineación de los miembros contiguos.

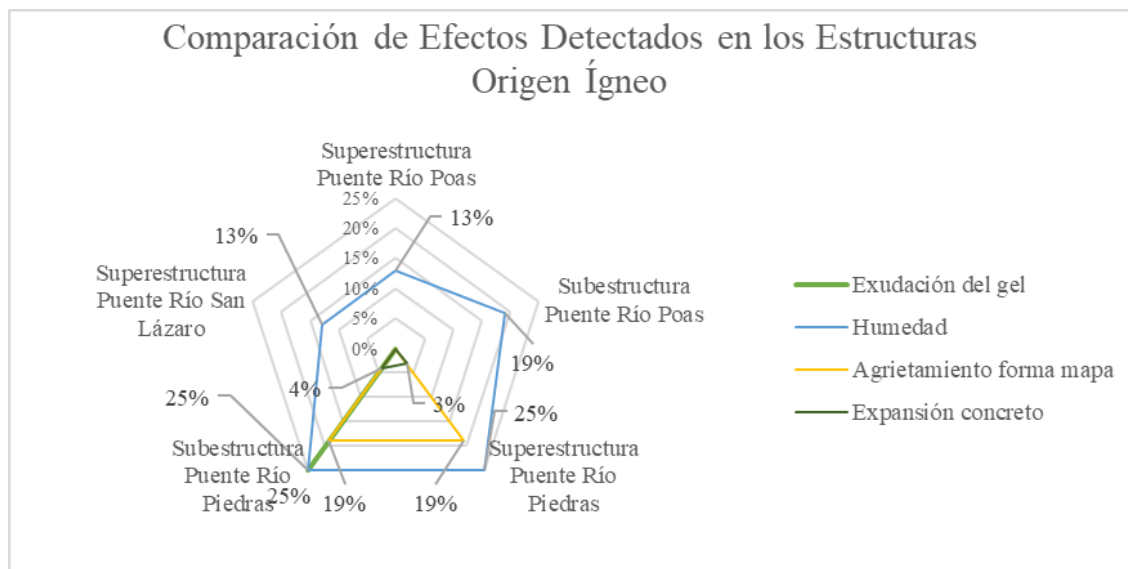
Es importante recordar que la estructura actualmente tiene daños en la resistencia a compresión, según los datos obtenidos por prueba del esclerómetro en campo, sin embargo, la estructura también posee otra serie de daños que aportan a la reducción de la resistencia a compresión.

25. Ponderación de los resultados y análisis comparativo

A continuación, se presentará una comparación de los análisis realizados a los dos puentes con agregado de tipo ígneo:

Figura 115

Comparación de los efectos en estructuras con agregado de origen ígneo



Nota. Figura de elaboración propia

La estructura más antigua entre estos elementos estructurales se construyó en 1924: el Puente Río Piedras. Los otros tres puentes se construyeron en el mismo año, 1974, teniendo 50 años de diferencia de construcción, con respecto al Río Piedras. Los tres puentes se encuentran localizados en diferentes provincias alrededor del país, sus temperaturas y su humedad son distintas. También, los tres puentes tienen diferente tipo de agregado.

La estructura menos afectada por el potencial álcali – sílice es la superestructura del Puente Río San Lázaro, además de que no se determinó un potencial patológico, aunque tuviera mineralogía reactiva del agregado Chopo. El único daño presente es la humedad, con un porcentaje del 13%. La estructura que se encontró con mayor deterioro es a la subestructura del Puente Río Piedras, siendo un elemento potencialmente patológico. Posee porcentajes altos en todos los síntomas de la gráfica.

En el caso de la superestructura del Puente Río Piedras, se obtuvo un resultado de “Aceptación Parcial”, la cual indica que sí tiende a ser un potencial patológico, pero no se puede determinar como tal debido a que no se observó exudación del gel sílice, pero sí se observó el agrietamiento en forma de mapa, por ende, la expansión del concreto, y la humedad. A pesar de

que la mineralogía de este puente es baja en sílice, su edad casi 100 años, permitió el desarrollo de la patología.

Por último, se tiene que el efecto con más porcentaje en los dos elementos estructurales del Puente Río Poas es la humedad. A pesar de que es un puente longevo, y además posee reactividad en el agregado, no cuenta con un potencial patológico, ni tampoco padece de severas afectaciones. La subestructura si se encuentra más deteriorada porcentualmente en comparación con la superestructura, por la humedad y el agrietamiento en forma de mapa presente.

Ante este problema en las estructuras con potencial patológico álcali – sílice, se pueden emplear técnicas remediabiles en la estructura, para prevenir más daños En específico, se podrían usar aditivos a base de litio, ya que se debe procurar que el álcali – sílice no continúe su desarrollo, deteriorando la estructura.

Por otro lado, las estructuras con álcali – sílice mostraron la siguiente ponderación del sitio:

Tabla 43

Resultados ponderación del sitio para álcali-sílice

Álcali-Sílice		
Elemento Estructural	Ponderación del sitio	Porcentaje
Superestructura Puente Río San Lázaro	No aplica	20%
Superestructura Puente Río Poas	No aplica	20%
Subestructura Puente Río Poas	No aplica	20%
Superestructura Puente Río Piedras	Afectación parcial potencial	20%
Subestructura Puente Río Piedras	Potencial patológico	20%

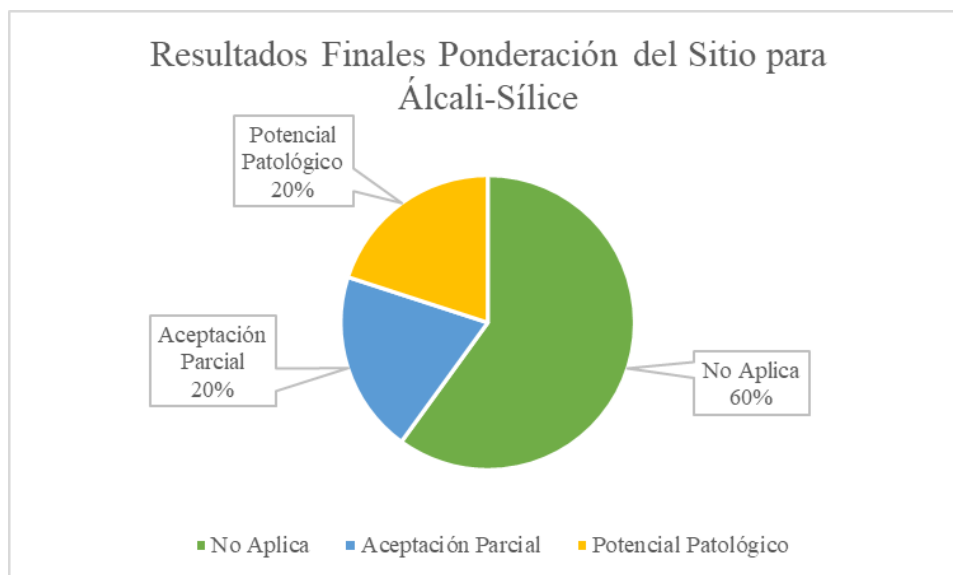
Nota. Tabla de elaboración propia

Las ponderaciones del sitio según esta tabla corresponden a los resultados de las Tablas 33, 35, 38, 40 y 20, y los porcentajes de cada elemento estructural pertenece a la división del 100% del total de todos los elementos estructurales estudiados para el álcali – sílice entre la cantidad de elementos estructurales, por tanto, cada uno obtiene un 25% como porcentaje. De

acuerdo con los resultados obtenidos de la Tabla 42, se mostrará gráficamente los resultados para una mejor comprensión:

Figura 116

Gráfica de resultados ponderación del sitio para álcali-sílice



Nota. Gráfica de elaboración propia

Según la gráfica anterior, de los 2 puentes elegidos, el 60% de los elementos estructurales los de 5 estudiados no poseen un potencial patológico desde una inspección visual. Un 20% posee el potencial patológico, y, por último, un 20% posee una aceptación parcial. En la inspección realizada para cada puente se logró observar que el deterioro de la estructura se basa en otras razones, y para los elementos estructurales que sí resultaron tener un potencial patológico, se pueden encontrar otros daños que causan un mayor deterioro que los efectos del álcali – sílice.

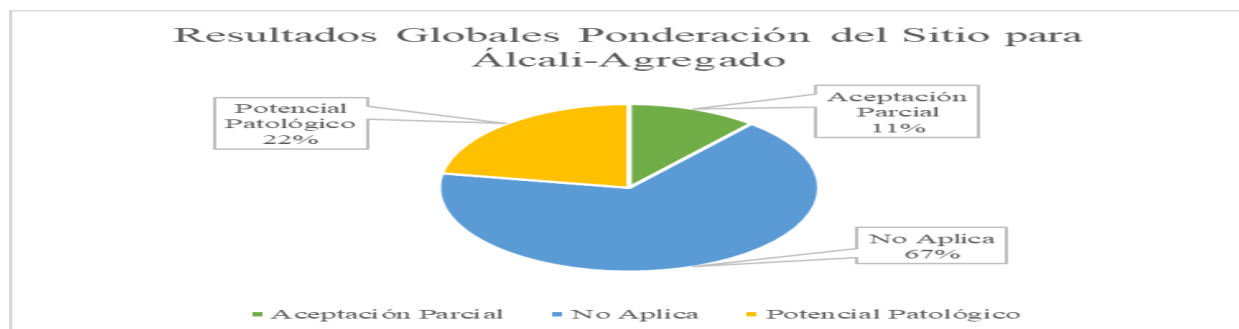
Ahora, de manera global, la afectación del álcali – agregado se presentó en los puentes de la siguiente manera:

Tabla 44*Calificación final de la afectación álcali-agregado en puentes*

Álcali-Agregado		
Elemento Estructural	Ponderación del sitio	Porcentaje
Superestructura Puente Río San Lázaro	No aplica	11,1%
Subestructura Puente Río San Lázaro	No aplica	11,1%
Pilas Puente Río San Lázaro	No aplica	11,1%
Superestructura Puente Río Potrero	Potencial patológico	11,1%
Subestructura Puente Río Potrero	No aplica	11,1%
Superestructura Puente Río Poas	No aplica	11,1%
Subestructura Puente Río Poas	No aplica	11,1%
Superestructura Puente Río Piedras	Aceptación parcial	11,1%
Subestructura Puente Río Piedras	Potencial patológico	11,1%

Nota. Tabla de elaboración propia

En la Tabla 43 se encuentran todas las variables estudiadas en el presente proyecto. En esta tabla, se pueden observar su clasificación final en la ponderación del sitio, y en la columna de “Porcentaje”, el valor porcentual otorgado de cada puente. Este valor proviene de la división del 100% de la totalidad de los elementos estructurales que componen los puentes entre la cantidad de elementos estructurales, la cual son 9, por tanto, cada estructura obtiene un 11,1%. A continuación, se mostrarán los resultados de la ponderación del sitio de la tabla anterior de una manera más gráfica:

Figura 117*Gráfica global resultados de ponderación del sitio para álcali-agregado**Nota.* Gráfica de elaboración propia

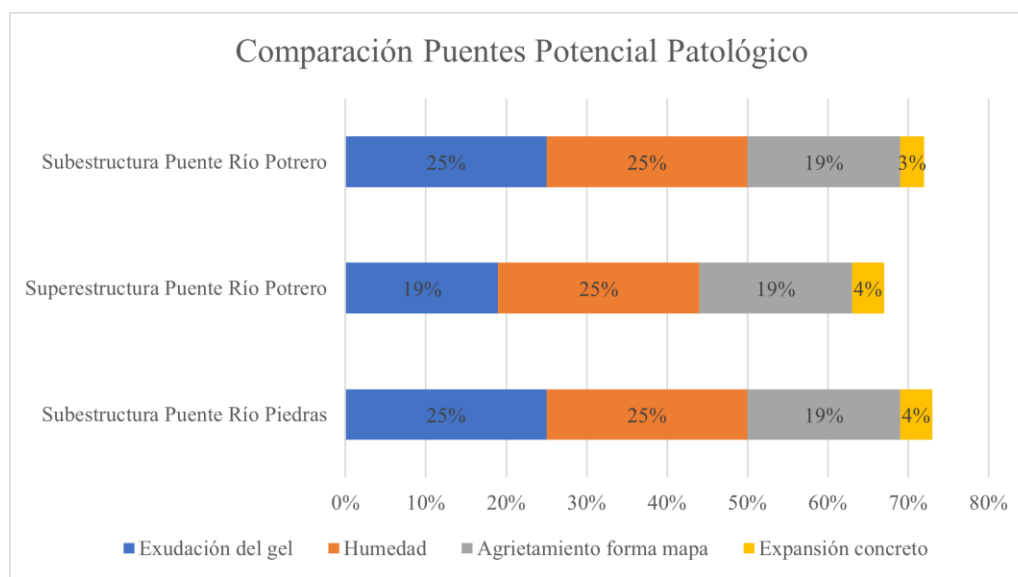
Según la figura anterior, en donde se muestran los resultados de la Tabla 43 mediante una gráfica, se determina que el 67% de los elementos estructurales que componen los cuatro puentes (del 100%), no poseen un potencial patológico álcali – agregado, y un 22% sí la posee. El último 11% corresponde a una aceptación parcial, que al final se determina como una estructura en la que no se puede corroborar ser potencial patológico. Los efectos del álcali – sílice no generan un mayor impacto en los puentes.

Esta información indica que, para los puentes con los efectos que sí poseen un potencial patológico, se presentan deterioros bastante notorios que no deben pasarse por alto, pero no parece ser alarmante, por tanto, es recomendable recurrir a aditivos para mitigar este problema. Con el 67%, visualmente se indica que el álcali – sílice no se encuentra presente en la estructura, no obstante, puede que la patología se encuentre en desarrollo, por la mineralogía del agregado presente en la estructura.

A continuación, se comparará la estructura del Puente Río Potrero, que presenta potencial patológico álcali – carbonato, con la estructura del Puente Río Piedras, que presenta potencial patológico álcali – sílice, y se verificará cuál de las dos estructuras se encuentra más afectado:

Figura 118

Comparación de estructuras con potencial patológico



Nota. Gráfica de elaboración propia

Entre subestructuras, el Puente Río Piedras construido en 1924, se encuentra levemente más deteriorado por el 1% de diferencia con la expansión del concreto del Puente Río Potrero, construido en 1974. Se considera que ambos puentes se encuentran con altos porcentajes de deterioro. A pesar de la longevidad de ambas estructuras, no se puede determinar que, entre más antiguo sea su año de construcción mayor sería su deterioro, puesto que la patología dura alrededor de 15 años volverse notoria en la superficie, y puede ocurrir en cualquier momento, no obstante, con ayuda de la temperatura se acelera el proceso de deterioro.

Respecto a la correlación de superestructuras, se considera que el Puente Río Potrero posee un potencial patológico, y se determinó que, el Puente Río Piedras no posee un potencial patológico.

Los puentes en general se encuentran en zonas muy húmedas, pero si se comparan los resultados de las subestructuras con las superestructuras, son más altos los resultados porcentuales de las subestructuras. Se puede decir que el agua de río brinda un mayor impacto en el incremento del álcali – agregado, ya que mantiene un mayor contacto con las subestructuras que con las superestructuras.

Conclusiones

1. Se analizaron los efectos del concreto hidráulico endurecido derivado de la patología álcali – agregado, en donde el contenido de álcalis del cemento, la mineralogía y génesis del agregado y la humedad son los efectos del álcali – agregado. Estos daños afectan negativamente las propiedades del concreto y del agregado, así también la vida útil de la estructura y del elemento. En este caso, el álcali – agregado, patología desarrolla en el interior del concreto, específicamente en la zona de interfase, se divide en dos tipos de patologías (álcali – sílice y álcali – agregado). Estas patologías dependen del tipo de agregado presente y de la cantidad de álcalis del cemento, junto con la humedad y temperatura y producen efectos negativos.
2. Se indicaron técnicas remediabiles para los problemas patológicos. La medida ideal, según este proyecto, sería el uso de los aditivos a base de litio, ya que se aplican en el concreto endurecido ya afectado. Otras alternativas como: el uso de material cementante suplementario, limitar el empleo de agregados reactivos y la cantidad de álcalis del cemento hidráulico, se pueden utilizar al inicio de las construcciones. Se pueden incorporar para tener desde el inicio del proceso constructivo buenas prácticas que mejoren la calidad de vida de la estructura. Además, se pueden incluir inspecciones regulares después del proceso constructivo, cuando la estructura se encuentra en funcionamiento.
3. Se calificaron los efectos álcali – agregado sobre el concreto hidráulico endurecido, empleando una matriz de ponderación que establezca niveles de impacto de puentes. De las variables estudiadas para un posible álcali – sílice, el 20% corresponde a potencial patológico, y para el álcali – carbonato, un 25%.
4. De las estructuras estudiadas con agregado ígneo, todas presentaron humedad en rangos del 13% - 25%, solo tres elementos con agrietamiento en un 19%, tres de ellos presentaron expansión del concreto del 3% al 4%, y por último, un único elemento presentó exudación del gel, del 25%. Para el agregado de origen sedimentario, todos los elementos estructurales presentaron humedad en rangos del 19% al 25%, tres de ellos agrietamiento del 6% - 19%, dos de ellos presentaron exudación del gel del 19% al 25%, y una expansión del 3% al 4%.

5. En cuanto a los resultados globales, el 22% de las estructuras estudiadas presentaron el potencial álcali – agregado. Específicamente, el Puente Río Potrero (álcali – carbonato) y la subestructura del Puente Río Piedras (álcali – sílice).
6. Se concluye que las reacciones expansivas más comunes en los agregados para la elaboración de concreto hidráulico son las álcali-sílice.
7. El análisis realizado señala que los álcalis pueden ser liberados en cantidades significativas en medios, especialmente de rocas volcánicas.
8. Se puede concluir que la reactividad álcali-agregado se transforma potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable dentro de la masa de concreto, con las consecuencias directas del microfisuramiento del concreto, que permite el ingreso del oxígeno y el agua y por ende, los consecuentes efectos sobre el concreto hidráulico reforzado.
9. También se concluye que los efectos del microfisuramiento en el concreto son altamente perjudiciales, para obras sometidas a inmersión o a los efectos de la saturación del suelo bajo el nivel freático. Esto debido a que se pierde el equilibrio alcalino del concreto que recubre al acero de refuerzo, además del ingreso del agua que provoca un proceso acelerado de corrosión del acero.
10. Finalmente, se puede determinar que estas reacciones se presentan con mayor intensidad en climas cálidos por los siguientes factores: elevada humedad de ambiente, temperatura, en especial de 20° a 40°C y fisuras previas de contracción plástica.

Recomendaciones

1. Para un próximo estudio en donde seleccione un puente como estructura a estudiar, se recomienda utilizar un equipo de maquinaria especial para realizar inspecciones visuales en lugares de acceso complicado.
2. Para investigaciones en donde se requiera utilizar estructuras de puentes carreteras como objeto de estudio, se recomienda realizar los estudios durante verano, ya que si se realiza en época de invierno se corre peligro de que la persona pueda presenciar alguna crecida de agua.
3. Cuando se vayan a realizar inspecciones a las estructuras puentes carreteras que se vayan a estudiar, es de utilidad llevar implementos para limpiar las zonas, ya sea para realizar pruebas o tomar evidencias, para que se observe con mayor claridad.
4. Ante un estudio de desempeño de álcali – agregado en estructuras, por medio de inspecciones visuales, se recomienda realizar varias inspecciones a lo largo del tiempo para detallar más su comportamiento en el elemento estructural.
5. Para la prueba del esclerómetro, es recomendable asegurarse que el índice de rebote no supere ± 6 valores una vez concluida la prueba, ya que en dado caso que no se apruebe el índice mencionado, se tiene la posibilidad de corregirlo a tiempo.
6. Se recomienda incentivar al estudiante para realizar más estudios sobre el álcali – agregado, debido a que los estudios existentes en Costa Rica son escasos y muy generales.
7. Se recomienda al profesional de Ingeniería Civil conocer sobre la mineralogía de los agregados, para así evitar deterioros de álcali – agregado en la estructura desde la etapa de diseño. Además, se sugiere incentivar el uso de agregados de alta resistencia en las estructuras y materiales cementantes suplementarios.
8. Se recomienda al estudiante realizar como proyecto final de graduación la comprobación del presente proyecto, ya que este se compone de conocimiento teórico, inspecciones visuales y pruebas no destructivas, por tanto, se basa en conclusiones de un potencial patológico. Por lo tanto, se podrían ejecutar pruebas destructivas en elementos estructurales en donde no se determinó su potencial patológico por medio de dicha inspección y en donde sí se determinó, con el fin de complementar la información

respecto al tipo de agregado presente en la estructura y la presencia definitiva del álcali – agregado.

9. Es recomendable realizar es el análisis petrográfico de los agregados a utilizar y determinar si son potencialmente reactivos en cuanto a esta problemática, antes de ser usados en mezclas para concreto estructural.
10. En cuanto a la combinación de agregados, es recomendable combinar agregados potencialmente reactivos con inocuos. En el caso de la reacción álcali – sílice, los agregados más reactivos son los gruesos de la fracción fina (arenas).
11. Respecto a la combinación de agregados en el caso particular de la reacción álcali – carbonato, los que producen una expansión mayor son los agregados gruesos cuando la interface es porosa, lo que es de esperar cuando se da la reacción, por lo que es recomendable manejar tamaños de partículas gruesas de menor tamaño nominal combinado con agregados inocuos para contrarrestar los efectos futuros de la RAC.

Referencias bibliográficas

123R. (s.f.). *Cristalizado en concreto* [Figura 6]. https://es.123rf.com/profile_sv1861

360enconcreto. *Materiales cementantes en el concreto* [Figura 35].

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/materiales-cementantes-en-el-concreto>

ABQ. (s.f.). *Faiençage* [Figura 30]. https://betonabq.org/wp-content/uploads/techno-beton/tbnumero3_2014_v01.pdf

Alaejos, M y Bermúdez, M. (2003). *Durabilidad y procesos de degradación del hormigón en presas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Alamy. (2016). *Marga* [Figura 24]. <https://www.alamy.es/foto-macro-de-roca-sedimentaria-especimenes-marga-marlstone-de-piedra-aislado-sobre-fondo-blanco-117626084.html>

Alamy. (2016). *Yeso* [Figura 20]. <https://www.alamy.es/foto-yeso-de-rock-roca-sedimentaria-28332792.html>

Alvarado, G y Gans, P. (2012). *Dataciones radiométricas del vulcanismo efusivo de Fm. Monteverde* [Figura 44]. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0256-70242012000100001&script=sci_arttext

American Concrete Institute. (2000). Cement and concrete terminology (ACI 116R-00 Edition). *ACI*.

American Concrete Institute. (2000). Service- life prediction. State of the art report (ACI 365.1R-00 Edition). *ACI*.

American Concrete Institute. (2016). Guide to durable concrete (ACI 201.2R-16 Edition). *ACI*.

American Concrete Institute. (2017). Guide to the use of waterproofing, dampproofing, protective and decorative barrier systems for concrete. (ACI 515.1R-85 Edition). *ACI*.

American Society for Testing and Materials. (2013). Standard test method for rebound number of hardened concrete. (C805-13 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2014). Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate (D2419-14 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2015). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate (C128-15 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2015). Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate (C127-15 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2017). *Fines suspended in the water are washed over a No. 8 (2.36 mm) and a No. 200 (75 μ m) sieve* [Figura 8].

American Society for Testing and Materials. (2017). Standard practice for random sampling of construction materials (D3665-17 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2017). Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate. (C29/C29M-17 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2017). Standard test method for materials finer than 75- μ m (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing (C117-17 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2018). Standard specification for concrete aggregates (C33-18 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2018). Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate (C88-18 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2019). Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates (C294-19 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2019). Standard guide for reducing the risk of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete (C1778-19a Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (C618-19a Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method) (C289-19 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (C136/C136M-19 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2020). Standard practice for petrographic examination of hardened concrete (C 856-20 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2020). Standard specification for Portland Cement (C150-20 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2020). Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures. (C1240-20 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2020). Standard test method for organic impurities in fine aggregates for concrete (C40-20 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2020). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. (C131/C131M-20 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2021). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field (C31/C31M-21 Edition). *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials. (2021). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (C39/C39M-21 Edition). *ASTM International*.

Barrera, A. (2017). Durabilidad y patología del concreto. *Construcción y tecnología en concreto*, 6 (12), 55.

<http://www.imcyc.com/revistacyt/MARZO%202017/MARZO17.pdf>.

Chan, J; Solís, R y Moreno, I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7, 29-46.

Del Rosal, F. (2017). Durabilidad y patología del concreto *Construcción y tecnología en concreto*, 6 (12), 14-17.

<http://www.imcyc.com/revistacyt/MARZO%202017/MARZO17.pdf>

Diamond, S. (2004). The microstructure of cement paste and concrete- a visual primer. *Cement and concrete composites*, 26, 919-933.

Didactalia. (s.f.). *Tipos de minerales* [Figura 15].

<https://didactalia.net/gl/comunidade/materialeducativo/recurso/clasificacion-de-los-minerales-segun-sus/6011e392-9fa2-401e-9dd0-77fe8a8b29d2>

Dorronoso, C. (s.f.). *Dolomia* [Figura 21]. <http://edafologia.ugr.es/rocas/dolomia.htm>

Duque, G. (2017). *Manual de Geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3145>.

Feng, X; Thomas, M; Bremner, T; Balcom, B y Folliard, K. (2005). Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. *Cement and concrete research*, 35, 1789-1796.

Fernández, A y Salas, A. (2002). *Evaluación y revisión de las proporciones recomendadas para mezclas de concreto en obras menores utilizando dos fuentes de agregados nacionales*. [Tesis de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/243/Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Geología Web. (s.f). *Carbón* [Figura 23]. <https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/carbon/>

Geología Web. (s.f). *Textura del granito* [Figura 18]. <https://geologiaweb.com/rocas-igneas/granito/>

Geología Web. (s.f). *Tipos de lutitas* [Figura 27]. <https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/lutita/>

Geología Web. (s.f). *Toba volcánica* [Figura 19]. <https://geologiaweb.com/rocas-igneas/toba-volcanica/>

Geología. (2015). *Rocas Ígnea* [Figura 16]. <https://post.geoxnet.com/rocas-magmaticas-clasificacion-de-los-magmas/>

- Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hess. (s.f). *Fotografía de grieta*. [Figura 2]. https://hesspumice.com/_spanish/pumice-pages/pumice-uses/pumice-pozzolan-mitigates-asr.html.
- Hoobs, D. (1988). *Alkali-silica reaction in concrete*. Thomas Telford Ltd.
- Hoobs, D. (1988). *Niveles de fisuración en el concreto* [Figura 29]. Thomas Telford Ltd.
- IDVIA Ingeniería. (27 de abril del 2020). *Motivos para el colapso de un puente: Puente Morandi*. <https://www.idvia.es/motivos-para-el-colapso-de-un-puente-puente-morandi>.
- IMCYC. (2006). *Prueba de resistencia a la compresión de concreto* [Figura 14]. <http://www.imcyc.com/ct2006/junio06/PROBLEMAS.pdf>
- Ingeoexpert. (2020). *Las rocas detríticas* [Figura 25]. <https://ingeoexpert.com/2020/08/12/las-rocas-detríticas-o-clásticas/>
- INTECO. (2018). *Cemento Hidráulico. Requisitos*. (INTE C147:2018 Edición). INTECO.

INTECO. (2020). *Guía para reducir el riesgo de la reacción perjudicial álcali-agregado en el concreto*. (INTE C278:2020 Edición). INTECO.

JCP Ingeniería SAS [@JCPIngenieria]. (15 de febrero del 2018). *Desgaste del concreto por cavitación en estructura hidráulica* [Figura 5].

<https://twitter.com/jcpingenieria/status/964304965354344449>

Katayama, T (1992). A Critical Review of Carbonate Rock Reactions – Is their Reactivity Useful or Harmful? *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Londres, 508–518.

López, J y Agüero, J. (2018). *Elaboración de un catálogo de deterioros en puentes para Costa Rica*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica].

<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/5936>.

Mata, L. (19 de marzo del 2019). El problema de investigación: claves para su planeamiento. *Investigalia*. <https://investigaliacr.com/investigacion/el-problema-de-investigacion/>.

Matarrita, A. (2017). *Evaluación y clasificación de patologías que influyen en la vida útil de las losas de concreto en los puentes*. [Tesis de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9376>.

Mehta, P y Gerwick, J. (1982). Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment. *Concrete International*, 10, 45-51.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/9109>

Mehta, P y Monteiro, P. (2013). *Concrete. Microstructure, properties, and materials*. McGraw- Hill Education.

Meteorología en red. (s.f.). *Arsenica* [Figura 26].

<https://www.meteorologiaenred.com/arenisca.html>

Milanesi, C; Pappalardi, M y Violini, D. (s.f.). *Fisuras en forma de mapa con exudación de geles* [Figura 34]. <http://congresodevialidad.org.ar/congreso2016/TRA/TRA-162.pdf>

Minería en línea. (s.f.). *Rocas sedimentarias* [Figura 22].

<https://mineriaenlinea.com/glosario/rocas-sedimentarias/>

Neville, A. (1997). Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. *Materials Journal*, 94, 71-74.

Notas de concretos (s.f.). *Depósitos blancos de etringita secundaria en un vacío. Ancho del campo 64 μm (69547)* [Figura 1].

<http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/etringita-y-expansion-retardadas-por.html>

Notas de concretos (s.f). *La fisuración, el cerramiento de las juntas y dislocación lateral causadas por la reactividad álcali-agregado* [Figura 31].

<http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/deterioro-concreto-reactividad-alkali.html>

NPCA. (s.f.). *Concrete sampling and testing* [Figura 13]. <https://precast.org/wp-content/uploads/2015/03/TechNote-Concrete-Sampling-and-Testing.pdf>

NRMCA. (s.f.). *Expulsión de agregados* [Figura 32]. <https://concretesupplyco.com/wp-content/uploads/2017/01/39pes.pdf>

Ozol, M. (2006). *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International.

Paez, B. (19 de febrero del 2016). *Dificultades diversas con el hormigón fresco y/o endurecido* [Figura 7]. Portal Ondac. <https://portal.ondac.com/601/w3-article-64907.html>

Panqueva, J. (2015). *Análisis de patologías físicas de puentes vehiculares en concreto de la localidad de Chapinero*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad Católica de Colombia].
<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:CLlyxVbfzykJ:https://repos>

itory.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2928/4/Patolog%25C3%25ADas-puentes-vehiculares-concreto-Chapinero.pdf+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=cr.

Pavement Interactive. (s.f.). *Los Angeles abrasion* [Figura 9].

<https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/aggregate-tests/los-angeles-abrasion/>

Peñuela, E y Sossa, J. (2015). *Patologías mecánicas presentes en los puentes vehiculares de la localidad de Fontibón*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2930>

Pozo, M; González, J y Giner, J. (2004). *Geología práctica. Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*. Pearson. <http://geo1.espe.edu.ec/wp-content/uploads/wordpress/Geologia-Practica-MANUEL-POZO-RODRIGUEZ.pdf>

Rodríguez, J. (2009). *A influênciã da zona de transição nas propriedades do concreto* [Figura 28]. <http://revistas.unama.br/index.php/revistatracos/article/view/500>

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 39]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 40]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 62]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 82]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 83]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 99]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

SAEP. (2015). *Información del puente*. [Figura 100]

https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/publico/pagInformacionPuente.faces.

Sanjuán, M y Chinchón, S. (2004). *Introducción a la fabricación y normalización del*

Cemento de Portland. Publicaciones de la Universidad de Alicante.

<https://core.ac.uk/download/pdf/32322379.pdf>

Segarra, J. (2005). *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas del hormigón*. [Tesis

de grado técnico, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins].

<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3315>.

Solano, M. (2003). *Diseño de mezclas de concreto con agregado grueso del tajo Chopo*.

[Tesis de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2688/Informe_Final.pdf?sequence=1

Solano, M. (2003). *Piedra chopo* [Figura 17].

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2688/Informe_Final.pdf?sequence=1

Stanton, T. (2008). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate.

Proceedings of the American Society of Testing and Materials, 66, 1781-1811.

Stokes, D; Wang, H y Diamond, S. (1997). A lithium-based admixture for ASR control

Swenson, E. (1958). Cement-aggregate reaction in concrete of a canadian bridge.

Proceedings of the American Society of Testing and Materials, 57,1043-1056.

Tang, M; Deng, M y Zhongzi, X. (2000). Comparison between Alkali- Silica reaction and

Alkali- Carbonate reaction. *Proceeding's 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Québec,109–117.

Tasong, W; Lynsdale, C y Cripss, J. (1999). Aggregate-cement past interface: Part I.

Influence of aggregate geochemistry. *Cement and concrete research*, 29, 1019- 1025.

Ternium. (11 de diciembre del 2020). *Corrosión*. [Figura 3].

<https://www.ternium.com/es/novedades/noticias/la-oxidacion-y-la-corrosion-del-acero--13540664220>

that does not increase the pore solution pH. *Proceedings of the 5th CANMET/ACI Int. Conf.*

The Constructor. (s.f.). *Concrete test hammer* [Figura12].

<https://theconstructor.org/page/184/>

Thomas, M; Fournier, B; Folliard, K y Resendez, Y. (2011). *Alkali-silica reactivity field identification handbook*. U.S Department of Transportation.

Thomas, M; Fournier, B; Folliard, K y Resendez, Y. (2013). *Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book*. U.S Department of Transportation.

Thomas, M; Hooton, D; Rogers, C y Fournier, B. (2012). 50 years old and still going strong. *Concrete International*, 34,35.

UCA. (s.f.). *Comparación de colores entre la solución con arena (luego de 24 horas) y la y la placa orgánica de colores Gardner* [Figura 10]. <https://www.uca.edu.sv/mecanica->

estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/IMPUREZAS
.pdf

US Department of Transportation (2006). *Extensive map cracking in several concrete barriers along State Highway 2 near Leominster, MA* [Figura 33].

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/06069>

UMACON + emedia. (2021). ¿Qué es el cemento Portland?

<http://www.umacon.com/noticia.php/es/que-es-el-cemento-Portland-tipos-y-caracteristicas/413/>

Anexos

Figura 44

Dataciones radiométricas del vulcanismo efusivo de Fm. Monteverde

MUESTRA	LITOLOGIA	UBICACIÓN	EDAD (Ma)	REFERENCIA
VULCANISMO EFUSIVO DE MONTEVERDE				
5	Andesita	Cerca de Queb. Alondra, C. Centinelas, H. Juntas, 444,9-252,2	2,2 ± 0,5 (K/Ar)	Amos & Rogers (1983)
CR-TE-02-38	Andesita Tajo C.	Bambú, Tierras Morenas, H. Tierras Morenas, 421,684-286,213	2,174 ± 0,040 (40Ar/39Ar: mtz: iso.)	Carr et al. (2007)
CR-025	Andesita basáltica	Basamento del C. Chopo, H. Cañas, 418,900-272,075	2,030 ± 0,020 (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo
CR97-1	Andesita	Colada de lava bajo gravas aluviales, cerca del Chopo, H. Cañas, 419,717-271,913	2,08 ± 0,26 (plat.) 1,90 ± 0,05 (40Ar/39Ar: iso.: mtz)	Marshall (2000)
CR-026	Andesita basáltica	Basamento del C. Chopo, H. Cañas, 418,900-272,075	2,040 ± 0,015 (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo
CR-027	Andesita basáltica	Basamento del C. Chopo, H. Cañas, 418,750-271,750	2,040 ± 0,010 (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo

PT-1/93 (JR-43)	Colada de andesita dentro de brechas	Pozo de gradiente geotérmico (92 m), poblado de Paraíso, Queb. Casa, H. Tierras Morenas, 421,8-288,2	Aprox. $1,96 \pm 0,03$ (K/Ar)	ICE-ENEL (1990)
CR-169	Andesita	Cuesta Blanca, entre La Lindora y Llanos, H. Juntas, 445,200-243,300	$1,92 \pm 0,04$ (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo
6	Andesita	E de Líbano, H. Tilarán, 431,4-267,5	$1,8 \pm 0,8$ (K/Ar)	Amos & Rogers (1983)
CR-104	Andesita basáltica	P.H. Peñas Blancas sitio de Presa, tope perforación, H. Fortuna, 470,025-260,950	$1,79 \pm 0,04$ (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo
Mi245	Andesita basáltica	Tajo Bellavista, 3 km ENE Miramar, H. Miramar, 459,811-231,291	$1,77 \pm 0,11$ (K/Ar: wr)	Kycl et al. (2010)
CR-C-3-89	Andesita	Presa Sandillal, H. Cañas, 415.7E-271.4N	$1,77 \pm 0,05$ (40Ar/39Ar)	Gardner & Turrin (en Alvarado et al., 1992)
Mi343	Andesita basáltica	Finca Mirón, H. Miramar, 463.364E-222-.285N	$1,71 \pm 0,22$ (K/Ar: wr)	Kycl et al. (2010)
CR-107	Andesita basáltica	P.H. Peñas Blancas sitio de Presa, parte basal de la perforación, H.	$1,77 \pm 0,004$ (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo

		Fortuna, 470,025-260,950		
CR-C-1-89	Andesita	Basamento del C. Chopo, H. Cañas, 418,8-271,8	1,70 ± 0,09 (40Ar/39Ar)	Gardner & Turrin (en Alvarado et al., 1992)
CRO72ARK	Andesita	W San Ramón, H. Miramar, 479,0-233,4	1,6 ± 0,04 (K/Ar)	Schultz et al., 1987
CR-213	Andesita sobre flujo de pómez CR-214	P.H. Daniel Gutiérrez, R. Balsa, H. San Lorenzo, 479,850 - 246,900	1,57 ± 0,03 (40Ar/39Ar: mtz)	Presente trabajo

Nota. Tabla recuperada de Alvarado y Gans (2012)