



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Ingeniería y Arquitectura

Título del Trabajo:

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos
industriales, a partir de técnicas petrográficas

Nombre del autor:

Marco Antonio Meza Mondragón

Director de tesis: Dr. Luis Daimir López León

Codirector: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Fecha: enero de 2026

Índice

1. Glosario de términos	8
2. Resumen	11
3. Abstract	12
4. Introducción.....	14
4.1. Antecedentes	14
4.2. Planteamiento del problema	16
4.3. Justificación	17
4.4. Objetivos	18
4.4.1. Objetivo general	18
4.4.2. Objetivos específicos.....	18
4.4.3. Alcance y limitaciones.....	19
4.4.4. Planteamiento del problema.....	20
4.5. Pregunta de investigación	21
4.6. Hipótesis.....	21
5. Marco teórico.....	21
5.1. Fundamentos de la petrografía aplicada al concreto	21
5.2. Composición y comportamiento del concreto	23
5.2.1. Tipos de contracción del concreto.....	25
5.2.1.1. Contracción autógena.....	25
5.2.1.2. Contracción plástica.....	26
5.2.1.3. Contracción por secado	27
5.3. Factores que influyen en la contracción del concreto.....	29
5.3.1. Contracción autógena	29
5.3.2. Contracción plástica	29
5.3.3. Contracción por secado.....	30
6. Técnicas petrográficas para el análisis del concreto	30
6.1. Conceptos de la petrografía aplicada al concreto	30
6.2. Norma ASTM C 856 “Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”.	32

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

6.2.1.	Alcance	32
6.2.2.	Intención	32
6.2.3.	Calificaciones de petrógrafos y técnicos	33
6.2.4.	Propósitos.....	33
6.2.5.	Material para preparación.....	34
6.2.6.	Selección y uso del equipo	35
6.2.7.	Muestras.....	35
6.2.8.	Examen de muestras.....	36
6.2.9.	Microfotografías petrográficas	41
6.2.10.	Preparación de especímenes	41
6.2.11.	Examen con microscopio estereoscópico	42
6.2.12.	Examen con microscopio petrográfico.....	42
6.2.13.	Características de la pasta.....	42
6.2.14.	Informe	43
6.3.	Identificación de parámetros críticos de diseño observables mediante petrografía en concreto endurecido	43
6.3.1.	Relación agua/cemento	43
6.3.2.	Tamaño máximo nominal del agregado	44
6.3.3.	Porosidad	44
6.3.4.	Microfisuras.....	44
6.3.5.	Condición de curado.....	45
6.3.6.	Arcillas adheridas	45
7.	Metodología.....	46
7.1.	Tipo de investigación	46
7.2.	Nivel de investigación.....	46
7.3.	Diseño de investigación.....	46
7.4.	Método de investigación.....	47
7.5.	Población de estudio	47
7.6.	Muestra	47
7.7.	Variables.....	48

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

7.8.	Procedimiento.....	48
7.8.1.	Observación y sistematización de informes petrográficos	49
7.8.2.	Construcción del Índice	49
8.	Análisis de datos.....	53
8.1.	Relación agua/cemento	56
8.1.1.	Tendencia en el IPC	56
8.2.	Tamaño Máximo Nominal de agregado y porcentaje de porosidad	57
8.2.1.	Tendencias interpretadas	58
8.3.	Microfisuras	59
8.3.1.	Tendencias interpretadas	59
8.4.	Condición de curado	60
8.4.1.	Tendencias interpretadas	61
8.5.	Arcillas adheridas / partículas deleznales.....	61
8.5.1.	Tendencias interpretadas	62
9.	Resultados y discusión.....	63
10.	Conclusiones	65
11.	Recomendaciones.....	68
12.	Referencias	69
13.	Anexos	73
	Tabla recopilatoria de variables para construcción de IPC	73



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 23 de febrero de 2026

Número de control: ICBI-D/286/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Marco Antonio Meza Mondragón**, quien presenta el trabajo de titulación "**Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Mtra. Valeria Volpi León

Secretario: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Vocal: Dr. Luis Daimir López León

Suplente: Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

Agradecimientos

A mi madre, Isabel, quien me ha brindado su apoyo y amor incondicional en cada momento de mi vida; sin ella nada de esto pudiese ser posible. Con ella siempre estaré en una deuda eterna por todo lo que me ha dado, alentándome a ser mejor persona y apoyando cada decisión que he tomado.

A mi padre, Francisco, que, a pesar de las diferencias que pudimos haber tenido, siempre se tomó el tiempo para escucharme y aconsejarme de la mejor manera, ofreciendo su amor, paciencia y sabiduría.

A mi novia, Ximena, que me ofreció su cariño y paciencia durante todo mi camino universitario, siendo un pilar en mi vida para salir adelante, aun a la distancia, y a quien agradezco por su apoyo incondicional en cada momento.

A mis hermanos, Miguel y Francisco, que siempre me alentaron en la realización de este trabajo y me dedicaron todo el tiempo que estuvo en sus posibilidades para escucharme.

A mi asesor de tesis, el Dr. Daimir, por sus consejos, su paciencia, su apoyo y su orientación, ayudándome a mejorar de manera significativa esta tesis.

A todas aquellas personas que contribuyeron a la culminación de este trabajo, les expreso mi más sincera gratitud.

Índice de tablas, figuras y gráficos

Tabla No. 1: Examen visual de concreto

Tabla No. 2: Esquema para el examen del concreto con un estereomicroscopio

Tabla No. 3: Esquema para el examen del concreto en secciones delgadas, microscopio estereoscópico, microscopio petrográfico y microscopio metalográfico.

Tabla No. 4: Características del concreto observadas con microscopios.

Tabla No. 5: Límites de porcentaje de aire en mezcla sin aire incluido.

Tabla No.6. Registro de resultados del Índice de Potencial de Contracción

Tabla No.7. Distribución de muestras según TMN, cumplimiento de porosidad y el IPC promedio

Tabla No.8. Número de muestras e IPC promedio basado en los tipos de microfisuras

Tabla No.9. Número de muestras e IPC promedio, con relación a la condición de curado.

Figura 1: Fases del desarrollo de la contracción autógena en el concreto

Figura 2: Representación del proceso de contracción plástica

Figura 3: Representación del proceso de contracción por secado

Figura No. 4. Diagrama de flujo adaptado del modelo PRISMA.

Gráfico No. 1. Distribución de los especímenes evaluados según el Índice de Potencial de Contracción (IPC)

Gráfico No. 2. Comportamiento del IPC promedio con respecto a la relación agua / cemento

Gráfico No. 3. Distribución de muestras y cumplimiento del porcentaje de porosidad según el Tamaño Máximo Nominal (TMN)

Gráfico No. 4. Comportamiento del IPC respecto al tipo de microfisuramiento

Gráfico No. 5. IPC promedio con respecto a la presencia de arcillas o partículas deleznales en especímenes de concreto

1. **Glosario de términos**

- **Aglomerante:** material capaz de endurecerse a corto o largo plazo, y, en consecuencia, se vuelve capaz de unir otros materiales, dando cohesión y resistencia a la mezcla.
- **Agregados:** Materiales sólidos y granulares, que actúan como componentes dinámicos dentro de una mezcla.
- **Álcali:** Compuesto químico de propiedades básicas y un pH elevado, que genera patologías dañinas en estructuras de concreto.
- **Auto-dsecación:** Fenómeno interno del concreto en el cual se disminuye la humedad interna del concreto durante el proceso de hidratación del cemento.
- **Carbonatación:** Proceso químico en el que el CO₂ del aire reacciona con los compuestos hidratados del cemento, reduciendo su pH y haciendo más susceptible la corrosión del acero de refuerzo.
- **Cemento:** Polvo fino y gris que se obtiene al moler una mezcla de piedra caliza y arcilla a altas temperaturas. Está compuesto por Clinker, yeso y determinados aditivos químicos.
- **Clinker:** Materia en forma de gránulos o esferas pequeñas, que se forma a partir de la calcinación de caliza y arcilla
- **Concreto:** Mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, funge como ligante con los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a una roca (Hidratación)
- **Contenido de humedad:** Cantidad de agua presente en la superficie y dentro de las partículas de los agregados al momento de usarlos en una mezcla de concreto.
- **Contracción:** Proceso del concreto en el cual este sufre un cambio de volumen debido a una pérdida acelerada de humedad durante el proceso de fraguado o endurecimiento.
- **Corrosión:** Proceso de deterioro del acero de refuerzo donde la exposición a factores ambientales como oxígeno, humedad y reacciones químicas, degradan el acero.
- **Curado:** Proceso de mantener las condiciones óptimas de humedad y temperatura al concreto, permitiendo una hidratación completa, mejorando su desempeño mecánico.

- Delaminación: Patología o defecto superficial que ocurre cuando se forman capas dentro del concreto separadas una de la otra, afectando la apariencia o integridad de la mezcla.
- Durabilidad: Capacidad del concreto para resistir las condiciones ambientales o procesos de deterioro durante un periodo de tiempo, sin perder o sacrificar sus propiedades mecánicas.
- Estereomicroscopía: Tipo de microscopía capaz de observar objetos en 3 dimensiones a bajos aumentos.
- Exudación: Acumulación de agua en la superficie de la mezcla de concreto, observada en durante el fraguado del concreto en la fase de endurecimiento.
- Factor de gruesos: Parámetro utilizado en el diseño de mezclas, el cual evalúa las proporciones relativas del agregado grueso y fino dentro de una mezcla de concreto.
- Factor de trabajabilidad: Parámetro que representa la relación entre la cantidad de material que pasa el tamiz No.8 y la cantidad de cemento utilizada para una mezcla de concreto.
- Fisuras: Rupturas que aparecen únicamente en la superficie de los elementos de concreto, suceden por el paso del tiempo, agentes climáticos o variaciones de temperatura y humedad.
- Fraguado: Proceso que indica de forma aproximada cuando inicia la hidratación del cemento, por lo que comienza a endurecerse, pasando del estado plástico a un estado sólido.
- Grietas: Rupturas que se adentran en la superficie de elementos de concreto, propiciando daños y suponiendo un riesgo para la integridad de la estructura.
- Hidratación: Proceso químico en los componentes del cemento reaccionan al entrar en contacto con el agua, generando su endurecimiento y desarrollo de la matriz cementante en una mezcla.
- Litología: Rama de la geología dedicada al estudio de las características físicas y composicionales de las rocas, contribuyendo a su descripción y clasificación.
- Microscopía polarizada: Técnica óptica que se utilizará para observar materiales anisotrópicos (sus propiedades varían dependiendo de la dirección en la que se

midan) por medio de luz polarizada, determinando así sus propiedades ópticas de los minerales.

- Microscopio: Instrumento óptico que permite ampliar la imagen de objetos pequeños, permitiendo el estudio a detalle de características no observables a simple vista.
- Morfología: Características específicas de cada tipo de agregado utilizado dentro de la construcción, incluye: forma, tamaño, distribución, textura de las partículas, origen del material, entre otras.
- Patología: Hace referencia a cualquier alteración, defecto, deterioro o daño que afecta el comportamiento estructural, funcional o estético de un elemento de concreto.
- Porosidad capilar: Espacios vacíos o poros que se encuentran interconectados dentro de una matriz cementante, siendo producto de la hidratación del cemento y la evaporación del agua.
- Pozolanas: Material natural o artificial que contiene sílice y/o alúmina, por sí solo posee escaso o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en un medio húmedo, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un compuesto con propiedades cementantes.
- Relación a/c: Parámetro utilizado en el diseño de mezclas para definir las propiedades que puede obtener un concreto, entre ellas: la resistencia, trabajabilidad y durabilidad. Siendo definida como la razón entre el peso del agua y el peso del cemento en una mezcla.
- Retemplado: Proceso en el cual se adiciona agua o un aditivo superplastificante a una mezcla premezclada con el objetivo de mejorar su trabajabilidad y alcanzar el asentamiento permitido por el diseño de mezcla.
- Segregación: Es la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de modo que su distribución ya no es uniforme.
- Tamiz: Malla con diferentes tamaños de abertura, utilizada en laboratorios de pruebas o control de calidad de agregados, para separar partículas de diferentes tamaños en materiales como gravas o arenas.
- Partículas deleznales: terrones de material frágil encontrados dentro de los agregados, los cuales se desintegran fácilmente bajo la acción de tránsito o carga, disminuyendo la resistencia y/o durabilidad del concreto.

2. Resumen

En México, la aplicación de técnicas petrográficas en el estudio del concreto endurecido es escasa a pesar de su capacidad para diagnosticar patologías del concreto por medio de la observación micro y macroscópica, entre ellas la susceptibilidad del material frente a la contracción. La presente investigación planteó la **construcción de un Índice de Potencial de Contracción (IPC)**, basado en la **sistematización y análisis de 83 informes petrográficos** elaborados conforme a la norma ASTM C 856, con el propósito de **identificar e integrar variables petrográficas** que permitan **estimar de manera cualitativa y cuantitativa, el riesgo de contracción en pisos industriales de concreto.**

En este trabajo se identificó la relación entre los parámetros observables en el concreto endurecido (relación agua – cemento [a/c], tamaño máximo nominal del agregado [TMN], porcentaje de porosidad, microfisuramiento, condición de curado y presencia de arcillas o partículas deleznable) y su comportamiento con relación a los diferentes tipos de contracción. Se estableció una metodología basada en la asignación de ponderaciones a las variables seleccionadas, con base en su incidencia sobre la contracción. Se obtuvo un valor numérico del IPC para cada espécimen analizado en los informes petrográficos, correspondientes exclusivamente a concretos empleados en pisos industriales y de este modo clasificarlos según el nivel de riesgo de contracción (bajo, medio y alto). Facilitando la identificación de tendencias de la contracción. La relevancia del estudio radica en la posibilidad de identificar de manera más sencilla el comportamiento del concreto endurecido frente a los distintos tipos de contracción mediante dicha herramienta (Índice IPC)

Los resultados demostraron que, si bien las variables como relación a/c, la porosidad y el TMN, influyen en el desempeño del concreto, no resultan tan determinantes como el proceso de curado, el microfisuramiento y la presencia de arcillas. El análisis de estas características evidencia que, a medida que su incidencia aumenta, el valor del IPC tiende a disminuir, reflejando un mayor potencial de contracción. En particular, el curado deficiente se asocia con una mayor propensión a la contracción y a la delaminación temprana en losas y pisos industriales. El IPC se plantea como una herramienta para la industria del concreto, correlacionando observaciones petrográficas con el **comportamiento de la contracción, contribuyendo con una base técnica al fortalecimiento de los procesos de control de calidad, diagnóstico y prevención de la fisuración en la industria del concreto.**

En conclusión, se buscó que el estudio sentará las bases para el desarrollo de metodologías que integren a la petrografía como una técnica confiable a la hora de evaluar el desempeño del concreto endurecido.

Palabras clave: Contracción, concreto endurecido, petrografía, pisos industriales, relación agua/cemento

3. Abstract

In Mexico, the application of petrographic techniques on the study of hardened concrete it's scarce in despite of his capacity to diagnose pathologies of concrete through the observation micro and macroscopy, including the material susceptibility in the face of retraction. Faced with this situation, the present investigation raises the construction of a Shrinkage Potential Index (IPC for its Spanish acronym) based on systematization and analysis of 83 petrographic reports carried out in accordance with the standard ASTM C 856, with the purpose of identifying and integrating the petrographic variables to allow the qualitative and quantitative estimation, the risk of shrinkage in industrial floors and slabs.

In this study, the relationship between observable parameters in the hardened concrete was identified (w/c ratio, maximum nominal size of aggregate, porosity percentage, microcracking, curing condition and presence of clays or despicable particles) and the material's behavior with the different types of shrinkage.

Establishing a methodology based on the assigning weights to the selected variables, based on their impact on shrinkage. This allows a numerical value of the IPC to be obtained for each specimen and thus classify them according to the level of risk (low, medium and high). Facilitating the identification of contraction trends.

The results showed that, although variables such as w/c ratio, porosity and maximum nominal size of aggregate influence the performance of concrete, are not as decisive as the curing process, microcracking, and the presence of clays. Analysis of these characteristics revealed that, as their incidence increases, the IPC value tends to decrease, reflecting a greater potential for shrinkage. In particular, poor curing is associated with a greater propensity for shrinkage and early delamination in slabs and industrial floors. The IPC is designed as a tool for the concrete industry, correlating petrographic observations with shrinkage behavior,

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

contributing with a technical foundation to the strengthening of quality control, diagnosis, and crack prevention processes in the concrete industry.

In conclusion, the study sought to lay the foundations for the development of methodologies that integrate petrography as a reliable technique for evaluating the performance of hardened concrete.

Keywords: Shrinkage, hardened concrete, petrography, industrial floors, water/cement ratio

4. Introducción

4.1. Antecedentes

La petrografía, rama de la geología dedicada a la descripción y clasificación de rocas (del latín Petrus=piedra, roca; y del griego Graphe=dibujar, pintar, describir), ha evolucionado para incluir el análisis de materiales de construcción como el concreto (Castro, 2015). Esta disciplina permite caracterizar la microestructura de los agregados y la pasta de cemento, lo que contribuye a evaluar su durabilidad y comportamiento mecánico.

Los estudios iniciales en petrografía datan de finales del siglo XVIII, cuando investigadores alemanes y franceses comenzaron a examinar rocas con lupas. Sin embargo, el geólogo inglés Henry Clifton Sorby fue pionero en la aplicación de secciones delgadas de roca con fines científicos. Posteriormente, Ferdinand Zirkel y Auguste Michel-Lévy contribuyeron al desarrollo de la petrografía moderna mediante el uso del microscopio petrográfico en el estudio de minerales y rocas, estableciendo las bases de técnicas avanzadas aún vigentes (Rojas, 2017).

En 1954, la American Society for Testing and Materials (ASTM) estableció la norma ASTM C-295, referente a la petrografía de agregados. Luego, en 1977, publicó la norma ASTM C-856, que regula el análisis petrográfico del concreto endurecido, y en 2002 la ASTM C-1324, que amplía estos estudios al mortero. Estas normativas han sido fundamentales para la evaluación petrográfica de materiales cementantes (ASTM C856-22).

El desarrollo del microscopio óptico también ha sido clave para la evolución de la petrografía. Cornelius Drebbel trabajó con lentes y mejoró la óptica, aunque la invención del microscopio se atribuye a Galileo Galilei en 1609, quien diseñó un modelo simple con lentes convexas y cóncavas. Posteriormente, en 1665, Robert Hooke perfeccionó el diseño del microscopio compuesto, y para 1880 múltiples fabricantes producían microscopios petrográficos de alta precisión para estudios mineralógicos y de materiales (Sánchez & Oliva, 2015).

Las técnicas petrográficas han sido esenciales para comprender los procesos de hidratación del cemento, evaluar su durabilidad y analizar los fenómenos que conducen a su deterioro. Entre estos fenómenos destaca la contracción del concreto, definida como la

disminución de volumen del material tras el fraguado y endurecimiento, lo que puede generar fisuras y grietas en las estructuras.

De acuerdo con Maurello Porras, Mondragón Aguja y Romero Mora (2020), la contracción del concreto puede clasificarse en tres tipos principales, autógena, plástica y por secado.

Contracción autógena: Se presenta en las primeras horas tras la hidratación del cemento, debido a la reducción de volumen en la fase líquida de la pasta cementante.

Contracción plástica: Ocurre entre las primeras 24 horas y hasta los 28 días, generalmente por la evaporación del agua de mezclado en condiciones secas o con viento.

Contracción por secado: Se desarrolla desde los 28 hasta los 56 días, cuando el agua retenida en la estructura porosa del concreto se evapora, provocando reducción de volumen y tensiones internas.

Los tipos de contracción mencionados se pueden encontrar presentes en múltiples elementos estructurales, sin embargo, quienes más tienden a presentar este tipo de efectos son los pisos industriales, afectando la operación y características de este, perjudicando de manera significativa la durabilidad y produciendo un desbalance entre el costo y la funcionalidad que puede ofrecer un piso industrial.

El análisis petrográfico permite identificar factores que influyen en la contracción del concreto, tales como la composición mineralógica de los agregados, la porosidad del cemento y la distribución de fases en la pasta endurecida. Estudios recientes han demostrado que ciertos minerales en los agregados pueden incrementar la susceptibilidad a la contracción, por lo que su caracterización mediante técnicas petrográficas es esencial para detectar problemas de durabilidad (Maurello et al., 2020; Neville & Brooks, 2021).

En este sentido, se busca establecer una relación entre los hallazgos petrográficos y el comportamiento del concreto utilizado en pisos industriales, donde la planicidad, resistencia química, resistencia mecánica y el buen desempeño a largo plazo son críticos para su funcionamiento.

4.2. Planteamiento del problema

La contracción del concreto es uno de los principales factores que comprometen su durabilidad, ya que puede generar fisuración y pérdida de resistencia mecánica en las estructuras. Este fenómeno ocurre debido a la pérdida de agua durante la hidratación del cemento, un proceso químico clave en la formación de los productos de hidratación que otorgan resistencia al concreto.

La contracción del concreto está influenciada tanto por factores internos como externos. Entre los factores internos destacan la composición química de los agregados y del cemento, la distribución de poros, y la presencia de minerales reactivos o con alta absorción de agua. Entre los factores externos, influyen la temperatura ambiental, la humedad relativa y las condiciones de curado.

Para minimizar los efectos negativos de la contracción, se recomienda:

- Ajustar el diseño de la mezcla mediante la consideración de diversos parámetros que contribuyan a minimizar la contracción del concreto (Contenido de cemento máximo y mínimo, tamaño máximo de agregado, factor de gruesos, factor de trabajabilidad, etc.).
- Optimizar la relación agua-cemento, asegurando una adecuada hidratación sin exceder la cantidad de agua en la mezcla.
- Emplear aditivos reductores de contracción, que modifican la microestructura del concreto y reducen la pérdida de volumen.
- Seleccionar agregados finos y gruesos con características favorables, evitando aquellos que favorezcan una alta contracción.
- Aplicar análisis petrográficos, una herramienta clave para evaluar la microestructura del concreto, permitiendo:
 - Identificar minerales reactivos o con alta capacidad de absorción de agua.
 - Evaluar la porosidad y distribución de los poros, determinando la susceptibilidad del concreto a la contracción.

Este trabajo analiza los mecanismos de contracción en concretos para pisos industriales y caracteriza sus rasgos micro y macroestructurales mediante técnicas petrográficas. El propósito es identificar los factores que condicionan la contracción y, con base en esa

evidencia, proponer estrategias que mejoren la calidad y la durabilidad del concreto en el mediano y largo plazo.

4.3. Justificación

En México, la aplicación de técnicas petrográficas (examen macroscópico, examen con microscopio estereoscópico, examen con microscopio petrográfico, microscopio electrónico de barrido, difracción de rayos X, entre otras) en el estudio del concreto no ha sido ampliamente explorada, a pesar de su relevancia para evaluar la calidad de los agregados y la pasta cementante. La contracción del concreto es un fenómeno complejo que depende de múltiples factores, como la composición mineralógica de los agregados, la hidratación del cemento y las condiciones de curado. Sin embargo, la falta de estudios detallados que vinculen estos aspectos con el análisis petrográfico limita la capacidad de los laboratoristas y profesionales de la construcción para predecir y mitigar sus efectos.

Dada esta problemática, es necesario investigar cómo las técnicas petrográficas pueden emplearse para evaluar la susceptibilidad del concreto a la contracción, proporcionando información clave para mejorar los procesos de selección de materiales y producción en la industria de la construcción en México.

El desarrollo de metodologías basadas en análisis petrográficos permitirá:

- Comprender mejor los factores que influyen en la contracción del concreto, lo que beneficiará tanto a los laboratoristas como a los ingenieros.
- Mejorar los procedimientos de control de calidad en la industria de la construcción, minimizando la aparición de fisuras y el deterioro prematuro de las estructuras.

Desde una perspectiva científica, este estudio contribuirá al conocimiento sobre la interacción entre la mineralogía de los agregados y la pasta de cemento en la contracción del concreto en pisos industriales, abordando un tema poco explorado en el país.

Desde un punto de vista práctico, los resultados podrían utilizarse para:

- Estandarizar la manera de interpretar los informes petrográficos mediante la observación de las variables petrográficas en el concreto endurecido, con el propósito de reconocer tendencias y relaciones entre dichas variables.
- Optimizar la selección de materiales mediante criterios basados en el análisis petrográfico.
- Reducir la incidencia de fisuración en estructuras de concreto, mejorando su durabilidad.
- Desarrollar mejores estrategias de producción en la industria del concreto, con base en una evaluación más precisa de los materiales.

Por lo tanto, este estudio no solo fortalecerá el conocimiento técnico en el área de la construcción, sino que también pretende impulsar la adopción de herramientas petrográficas como un estándar en la evaluación del concreto en México.

4.4. Objetivos

4.4.1. Objetivo general

Diseñar un Índice de Potencial de Contracción (IPC) que integre parámetros representativos derivados del análisis petrográfico del concreto endurecido, conforme a la norma ASTM C856-22, con el fin de establecer un sistema integral de evaluación del riesgo de contracción.

4.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la estructura interna del concreto endurecido de pisos industriales mediante la aplicación de técnicas petrográficas, con el propósito de identificar las variables micro y macroestructurales asociadas a los distintos tipos de contracción y evaluar su influencia en la durabilidad del material.
- Examinar la relación entre las características micro y macroestructurales del concreto y su potencial de contracción, correlacionando los resultados petrográficos con los diferentes tipos de contracción identificados (autógena,

plástica y por secado), a fin de determinar su influencia sobre la durabilidad del material.

- Sistematizar e interpretar la información petrográfica obtenida, desarrollando criterios técnicos y recomendaciones prácticas para la industria de la construcción orientadas a mejorar la selección de materiales, el control de calidad y la mitigación de los efectos asociados a la contracción del concreto.

4.4.3. Alcance y limitaciones

Alcance:

1. Caracterización petrográfica: Se analizarán y sistematizarán estudios e informes de concreto endurecido, con el objetivo de identificar características micro y macroestructurales que puedan influir en su comportamiento mecánico y en su susceptibilidad a la contracción.
2. Relación entre propiedades petrográficas y contracción: Se evaluará si existe una correlación entre las características petrográficas de los agregados y los distintos tipos de contracción del concreto (autógena, plástica y por secado).
3. Enfoque territorial: El estudio se centrará en muestras de concreto utilizadas en México, proporcionando información relevante para laboratoristas y profesionales de la construcción en el ámbito nacional.

Limitaciones:

- Tamaño de muestra limitado: El análisis se realizará sobre un número restringido de muestras, lo que podría limitar la generalización de los resultados a otros tipos de concreto o a distintas regiones fuera de México.
- Normativa de referencia: Aunque se tomará como base la norma ASTM C856 y el comité ACI 302.1R-15, el estudio no abordará en profundidad otras normativas nacionales o internacionales que podrían influir en el análisis petrográfico del concreto.

- Factores externos no incluidos: Si bien se analizará la relación entre las propiedades petrográficas y la contracción del concreto en pisos industriales, otros factores como la dosificación de materiales, el uso de aditivos y las condiciones de curado no serán el enfoque principal de esta investigación.

4.4.4. Planteamiento del problema

Garantizar la durabilidad y el adecuado desempeño del concreto constituye uno de los principales objetivos en la ingeniería civil moderna. Sin embargo, la contracción se mantiene como uno de los mecanismos más perjudiciales que afectan sus propiedades, ya que puede originar fisuras, pérdida de adherencia entre materiales, reducción de la resistencia mecánica y deterioro prematuro de los elementos estructurales. Estos efectos, presentes incluso en las primeras edades del concreto, comprometen la integridad y la vida útil de las obras, especialmente en pisos industriales y losas expuestas a gradientes térmicos o de humedad (Yıldız et al., 2023; Neville & Brooks, 2021).

A pesar de que se reconocen diversos tipos de contracción (autógena, plástica y por secado), su identificación temprana continúa representando un reto técnico para la industria de la construcción en México, donde los mecanismos de control suelen limitarse a parámetros volumétricos o ensayos convencionales de laboratorio. En este contexto, las técnicas petrográficas se perfilan como una herramienta avanzada para el análisis micro y macroestructural del concreto endurecido, al permitir la observación directa de la composición mineralógica, la distribución de poros y la interacción pasta-agregado. Estas características resultan fundamentales para diagnosticar patologías asociadas a la contracción y establecer relaciones entre la microestructura y el desempeño mecánico (Sánchez et al., 2022; Koparan & Plevris, 2022).

No obstante, el uso de la petrografía aplicada al concreto aún es limitado en México. Su escasa implementación en laboratorios y centros de control de calidad restringe la capacidad de profesionales y técnicos para realizar diagnósticos precisos, así como para tomar decisiones informadas en el diseño, producción y rehabilitación de estructuras. Por ello, se hace necesario investigar la viabilidad de determinar el potencial de contracción del concreto mediante técnicas petrográficas, desarrollando un Índice de Potencial de Contracción (IPC)

que permita integrar variables mineralógicas, texturales y de porosidad, con el fin de predecir y/o mitigar el riesgo de fisuración en concretos para pisos industriales.

4.5. Pregunta de investigación

¿Qué características micro y macroestructurales identificadas mediante técnicas petrográficas, conforme a la norma ASTM C856-22, pueden asociarse con los diferentes tipos de contracción del concreto (autógena, plástica y por secado)?

¿De qué manera la aplicación sistemática de la norma ASTM C856 permite evaluar el potencial de contracción en muestras de concreto endurecido, y cómo contribuye a la validación de un Índice de Potencial de Contracción (IPC)?

¿Qué relación existe entre los componentes petrográficos del concreto —como el tipo y tamaño del agregado, la composición mineralógica, el contenido de pasta y la porosidad— y la susceptibilidad del material a desarrollar diferentes tipos de contracción?

4.6. Hipótesis

Al aplicar técnicas petrográficas conforme a la norma ASTM C856-22 en el análisis del concreto endurecido, bajo las condiciones establecidas por el ACI 302.1R-15, es posible identificar y cuantificar características micro y macroestructurales específicas (como la porosidad, la distribución de agregados, la textura de la pasta y la presencia de microfisuras) que, al integrarse en un Índice de Potencial de Contracción (IPC), permiten estimar con mayor precisión la propensión del concreto a los distintos tipos de contracción (autógena, plástica y por secado).

De esta forma, el IPC se propone como una herramienta de diagnóstico preventivo útil para predecir y mitigar la fisuración en elementos de concreto, fortaleciendo los procesos de control de calidad y durabilidad en la industria de la construcción en México.

5. Marco teórico

5.1. Fundamentos de la petrografía aplicada al concreto

La petrografía del concreto es una disciplina especializada que se centra en la descripción, identificación y análisis de las características litológicas, morfológicas y

texturales de los componentes del concreto endurecido. A través de esta metodología es posible evaluar la proporción relativa de los materiales, su distribución y la interacción entre la pasta de cemento y los agregados, proporcionando una visión integral del historial del concreto: desde su mezclado, colocación y curado, hasta su exposición ambiental y posibles manifestaciones de deterioro (Sánchez et al., 2022).

El análisis petrográfico permite inferir las causas de patologías estructurales al relacionar observaciones microscópicas con fenómenos físicos y químicos que afectan la durabilidad del concreto, siendo una herramienta clave para la toma de decisiones técnicas y la mejora de la calidad del material en futuras aplicaciones (Koparan & Plevris, 2022).

Objetivos fundamentales:

- Determinar la composición mineralógica de los materiales que integran el concreto, y cómo cada uno influye en sus propiedades físicas y mecánicas (Yıldız et al., 2023).
- Comprender la influencia de la mineralogía y la estructura cristalina de los agregados sobre la resistencia, contracción y durabilidad del concreto (Leemann, 2025).
- Estimar las proporciones relativas de los constituyentes del concreto endurecido: cemento, agregados, adiciones y porosidad.
- Identificar posibles mecanismos de deterioro como la reacción álcali-agregado, ataques por sulfatos u otras interacciones químicas perjudiciales (Yu & Shui, 2021).

La norma ASTM C856 proporciona las directrices técnicas para la ejecución del examen petrográfico de concreto endurecido, estableciendo procedimientos para la preparación de muestras, los métodos de observación (estereomicroscopía, microscopía polarizada), así como la interpretación cualitativa y cuantitativa de las observaciones.

5.2. Composición y comportamiento del concreto

El concreto es un material compuesto que resulta de la mezcla de cemento, agua, agregados finos y gruesos, una pequeña cantidad de aire, y en algunos casos, aditivos. La proporción y calidad de estos componentes determinan en gran medida sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

Agregados (60%-75% vol.)

Los agregados constituyen entre el 60% y 75% del volumen del concreto. Su naturaleza mineralógica, tamaño, forma y textura superficial influyen significativamente en la trabajabilidad, resistencia, contracción y durabilidad del material. Una caracterización petrográfica adecuada debe centrarse en la identificación de componentes potencialmente dañinos como arcillas, micas, yeso o materiales reactivos a los álcalis, los cuales pueden inducir reacciones expansivas o comprometer la integridad estructural del concreto (Mindeguia et al., 2019).

Agua (15%-22% vol.)

El agua de mezclado cumple una doble función: activa la hidratación del cemento y proporciona la trabajabilidad inicial. Idealmente, debe ser potable; sin embargo, en algunos casos se emplean aguas recicladas o tratadas, cuyo contenido de sales o contaminantes puede alterar los tiempos de fraguado, reducir la resistencia o acelerar la corrosión de las armaduras, además de favorecer la aparición de reacciones expansivas como la álcali-sílice. (Akhavan & Maraghechi, 2022).

Cemento (7%-15% vol.)

El cemento portland, principal aglomerante hidráulico, se obtiene de la calcinación de mezclas de caliza y arcillas, formando clínker que posteriormente se muele junto con adiciones como yeso, puzolanas, escorias o cenizas. Su composición química y finura afectan directamente la velocidad de hidratación, generación de calor, resistencia inicial y durabilidad del concreto (Imbabi et al., 2019).

Aditivos (trazas o $<1\%$ vol.)

Los aditivos se incorporan en pequeñas cantidades con el objetivo de modificar propiedades específicas del concreto. Entre ellos destacan los retardantes, acelerantes, plastificantes y fibras sintéticas. Estos últimos, por ejemplo, pueden reducir la aparición de fisuras asociadas a la contracción plástica o por secado (Khan & Ali, 2018).

Relación agua/cemento

La relación agua/cemento es uno de los parámetros más influyentes en la microestructura del concreto. Estudios petrográficos permiten estimar visualmente si una mezcla presenta una relación a/c adecuada. Una relación elevada suele asociarse a porosidad capilar elevada, exudación excesiva, y segregación, lo cual compromete tanto la resistencia como la durabilidad del concreto (Zhang & Zhang, 2005)

Indicadores petrográficos comunes de una relación a/c inadecuada incluyen:

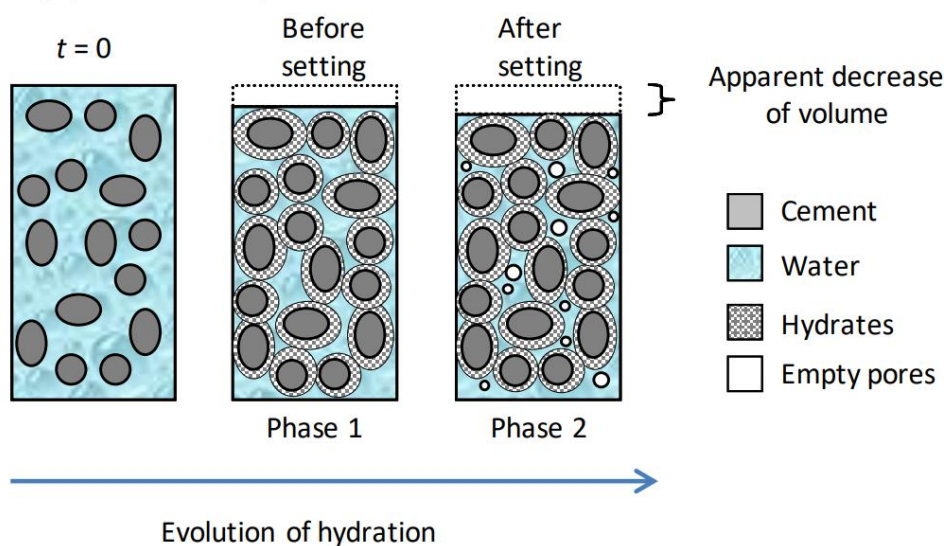
- Exudación o segregación excesiva: visibles como zonas enriquecidas en pasta o acumulación de finos, señalando una alta relación a/c que reduce la cohesión de la mezcla.
- Porosidad capilar: un mayor contenido de agua genera mayor volumen de poros, lo que intensifica la pérdida de agua y aumenta la susceptibilidad a la contracción por secado, fenómeno relevante en este estudio.

5.2.1. Tipos de contracción del concreto

5.2.1.1. Contracción autógena

La contracción autógena representa la primera etapa del proceso de contracción total del concreto y se manifiesta inmediatamente después de la mezcla de los componentes (cemento, agua y agregados), incluso antes del fraguado inicial. Esta forma de contracción se define como una reducción volumétrica interna y aparente, provocada por fenómenos fisicoquímicos propios de la hidratación del cemento, sin influencia de intercambios de humedad con el entorno externo (Giani & Bustos, 2021).

Figura 1: Fases del desarrollo de la contracción autógena en el concreto



Fuente: Benboudjema et al., 2019.

Este fenómeno obedece principalmente a dos mecanismos: la contracción química y la autodesecación. La contracción química resulta de la reducción del volumen absoluto al formarse productos de hidratación, principalmente el silicato cálcico hidratado (C-S-H), a partir de las fases anhidras del cemento y el agua. Los productos hidratados ocupan menos espacio que sus componentes originales, generando un vacío interno dentro de la matriz cementante (Liu et al., 2020).

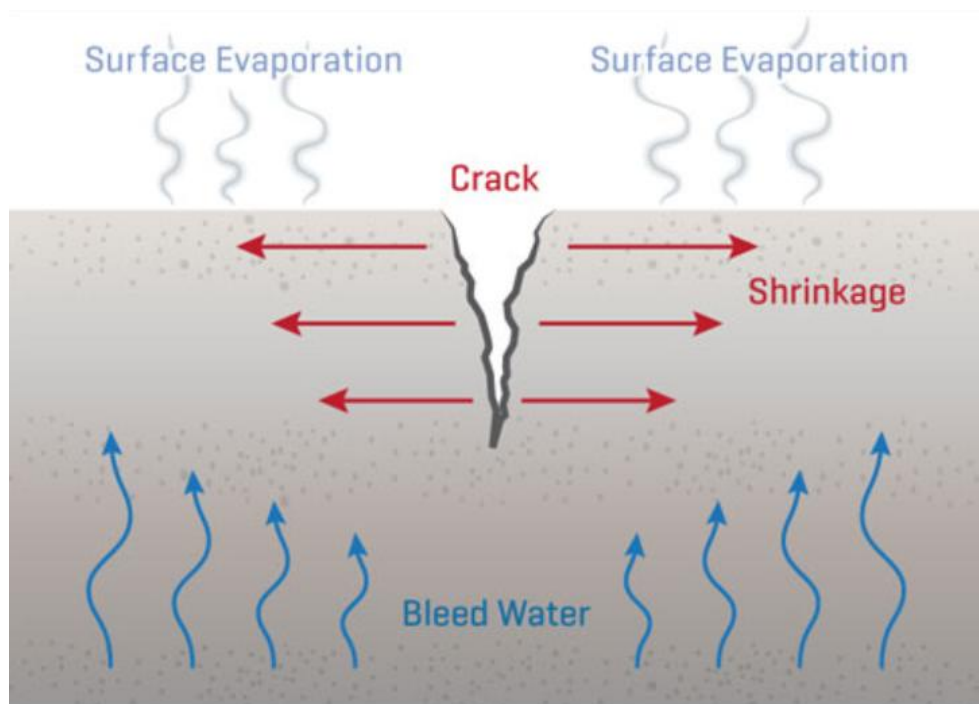
Una vez alcanzado el fraguado inicial, la matriz comienza a rigidizarse, limitando las deformaciones externas, pero permitiendo la generación de presiones capilares negativas. En esta fase predomina la autodesecación, en la que el agua remanente en la pasta es consumida

progresivamente para continuar la hidratación. Este proceso genera una disminución adicional del volumen efectivo, favoreciendo la aparición de microfisuras internas. Esta forma de contracción puede intensificarse en concretos de alta resistencia o con relaciones agua/cemento iguales o inferiores a 0.40, donde el contenido de agua es insuficiente para compensar el volumen de productos formados (Hu et al., 2022).

5.2.1.2. Contracción plástica

La contracción plástica ocurre en el concreto fresco, es decir, antes del fraguado inicial, y se origina cuando la velocidad de evaporación del agua superficial excede la tasa de ascenso del agua de sangrado. Este desequilibrio provoca tensiones de tracción en la superficie del concreto que, al superar la resistencia interna del material aún no endurecido, da lugar a la formación de fisuras superficiales conocidas como grietas por contracción plástica (Neville & Brooks, 2022).

Figura 2: Representación del proceso de contracción plástica.



Fuente: Global Gilson, s.f.

Este tipo de contracción es especialmente común en condiciones ambientales adversas, tales como viento moderado o fuerte, baja humedad relativa y temperaturas elevadas del aire o del concreto. Las fisuras resultantes, aunque generalmente superficiales y de corto alcance, pueden comprometer seriamente la durabilidad del concreto al facilitar la entrada de agentes agresivos como cloruros, sulfatos o dióxido de carbono, lo que incrementa el riesgo de corrosión del refuerzo y otras formas de degradación (Basheer & Khatib, 2020).

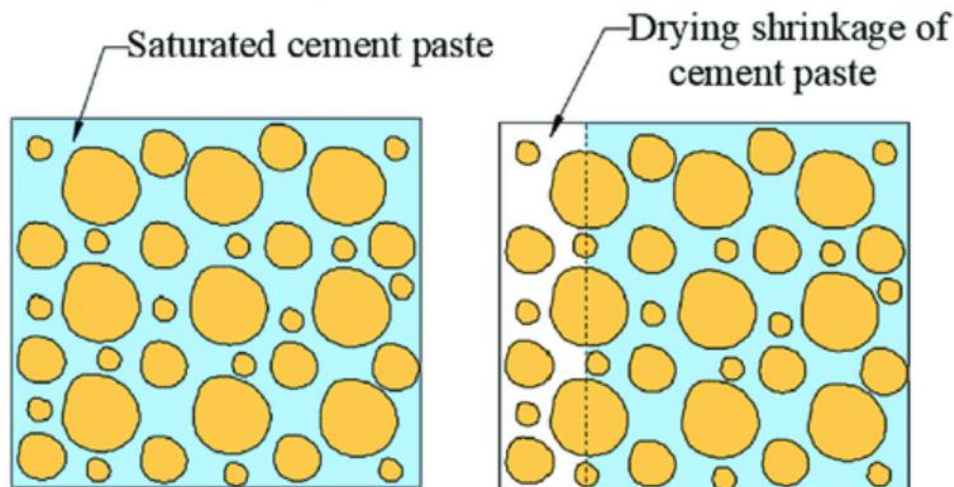
Para prevenir la aparición de este tipo de grietas, se recomienda implementar medidas de control ambiental y tecnologías complementarias, tales como:

- Uso de láminas plásticas o cubiertas temporales para reducir la evaporación;
- Instalación de pantallas cortaviento para mitigar la acción del viento;
- Aplicación de retardantes de evaporación sobre la superficie del concreto;
- Humedecimiento de la base previa a la colocación, a fin de evitar una absorción prematura de agua;
- Inclusión de fibras sintéticas, como fibras de polipropileno, que actúan como refuerzo disperso y ayudan a reducir la formación de fisuras por retracción plástica (Piñarreta, & Alemán, 2022).

5.2.1.3. Contracción por secado

La contracción por secado es frecuentemente considerada como la forma más significativa y representativa de contracción en el concreto endurecido. Este tipo de contracción ocurre cuando el concreto ha fraguado y comienza a perder humedad hacia el ambiente. Se trata de un proceso físico originado por la evaporación progresiva del agua contenida en la estructura porosa del material (Kazemi-Kamyab & Madandoust, 2022).

Figura 3: Representación del proceso de contracción por secado



Fuente: Wu et al., 2021.

El fenómeno inicia con la pérdida del agua libre contenida en los poros capilares, seguida por la evaporación del agua adsorbida en los poros de gel del silicato cálcico hidratado (C-S-H), que constituye el principal producto de hidratación del cemento. A medida que se forma una película de meniscos en estos poros, las fuerzas capilares inducidas por la tensión superficial del agua generan una atracción entre las paredes de los poros. Esta atracción provoca una reducción del volumen interno del concreto, lo que se manifiesta como contracción visible del material (Li et al., 2021).

Aunque el fenómeno es en parte reversible —es decir, el concreto puede experimentar expansión parcial si se rehidrata adecuadamente—, la recuperación total del volumen raramente se alcanza, especialmente si han ocurrido fisuras o si las condiciones de curado han sido deficientes. La contracción por secado es particularmente crítica en elementos delgados o con alta relación superficie-volumen, como pavimentos, losas y muros de fachada, donde la exposición directa al ambiente acelera la pérdida de agua (Bahaadinbeigy & Hassani, 2023).

Las consecuencias de este tipo de contracción pueden incluir fisuración superficial, reducción de la resistencia a flexión, pérdida de adherencia con el refuerzo y aumento en la permeabilidad del concreto, comprometiendo su durabilidad.

5.3. Factores que influyen en la contracción del concreto

La contracción del concreto es un fenómeno complejo influenciado por múltiples factores físicos, químicos y ambientales, los cuales afectan el comportamiento dimensional del material desde su estado plástico hasta endurecido.

5.3.1. Contracción autógena

- La contracción autógena es causada por la pérdida de humedad interna debido a la hidratación del cemento, especialmente en mezclas con baja relación agua-cemento (a/c). Esta se vuelve significativa cuando la relación a/c es menor a 0.42, ya que no hay suficiente agua para llenar completamente los poros creados durante la hidratación (Alshammari et al., 2022).
- La relación a/c es la principal variable que controla este tipo de contracción. Mezclas con alto contenido de cemento y baja a/c presentan una mayor contracción autógena debido al mayor consumo de agua interna durante la hidratación (Wu et al., 2017)
- Los cementos de alta reactividad (como el C3A alto o cementos Portland tipo III) generan mayor calor de hidratación, lo que puede inducir mayores tensiones internas y contracción temprana. Por ello, se han desarrollado cementos con baja generación de calor para mitigar este efecto (Meddah & Sato, 2010)
- El tamaño y proporción de agregados también afecta esta contracción. Agregados finos aumentan la superficie específica, elevando la demanda de agua, mientras que los agregados gruesos proporcionan una restricción interna que reduce la deformación del material (Zhu et al., 2023)

5.3.2. Contracción plástica

- Ocurre en las primeras horas tras el colado, cuando la velocidad de evaporación del agua en la superficie del concreto excede la velocidad de exudación del agua desde el interior. Esta diferencia puede generar agrietamiento superficial si no se toman medidas de prevención.
- Factores ambientales como la velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa influyen directamente en la tasa de evaporación. Una alta evaporación combinada con exudación insuficiente genera tensiones capilares que conducen a fisuración plástica (Boshoff & Combrinck, 2013).

- El uso de curado inicial adecuado y aditivos reductores de contracción puede minimizar los efectos negativos de este fenómeno en climas cálidos o secos (Liu et al., 2017).

5.3.3. Contracción por secado

- La contracción por secado es causada por la evaporación del agua retenida en los poros capilares del concreto ya endurecido, especialmente cuando el concreto se expone al ambiente sin curado adecuado.
- Inicialmente, el agua libre de los poros capilares grandes se evapora rápidamente. Luego, el agua adsorbida en los poros de gel también se pierde, lo que genera fuerzas de menisco que acercan las paredes porosas y reducen el volumen (Zhang et al., 2013)
- Este tipo de contracción depende en gran medida de la porosidad del concreto, de su contenido de pasta, del tamaño de los agregados, así como del ambiente en el que se encuentra expuesto (temperatura, viento, humedad relativa).

6. Técnicas petrográficas para el análisis del concreto

6.1. Conceptos de la petrografía aplicada al concreto

Las técnicas petrográficas permiten evaluar la composición, microestructura y estado de deterioro del concreto endurecido mediante observación macroscópica y microscópica. Esta disciplina, tradicionalmente empleada en geología, ha sido adaptada con éxito para el análisis forense de concretos dañados, así como en estudios preventivos de desempeño en servicio.

Composición

El análisis petrográfico proporciona información crítica sobre:

- La relación agua/cemento (a/c) estimada con base en la porosidad y densidad aparente de la pasta;
- La presencia de ataques químicos, como sulfatos o ácidos, observados por degradación localizada en la pasta;
- Signos de reacción álcali-sílice (ASR), como fisuras internas rellenas con gel reactivo;
- Delaminación entre fases de pasta y agregado, indicativa de deficiencias en adherencia o curado;

- Evidencias indirectas de corrosión de refuerzo, detectadas por manchas de óxidos o grietas longitudinales;
- Segregación de materiales, asociada a errores en colocación o compactación;
- La mineralogía de los agregados, útil para determinar su estabilidad química;
- Problemas de reemplado o mezcla inadecuada, reflejados en zonas de distinta coloración;
- Fallas en el curado inicial, evidenciadas por microfisuras superficiales;
- Presencia de carbonatación de la pasta, observada mediante colorimetría o pérdida de alcalinidad;
- Y finalmente, la detección de fracturas por contracción, especialmente atribuibles al secado no controlado.

Adicionalmente, el examen petrográfico permite inferir propiedades mecánicas indirectas como la resistencia al impacto, observando la forma de fractura bajo golpes con martillo, o la tenacidad de corte, evaluada durante el seccionamiento con disco diamantado. También se valora la calidad de la adherencia interfacial entre la pasta y los agregados finos y gruesos, fundamental en el comportamiento mecánico del concreto.

Descripción microscópica

El estudio detallado mediante microscopía óptica en secciones delgadas permite caracterizar individualmente cada fase constituyente del concreto:

- Pasta de cemento: Se describe su proporción relativa, tonalidad y homogeneidad de color, presencia de microfisuras, zonas reempladas o signos de hidratación incompleta. También se identifican productos secundarios como etringita, portlandita o geles de sílice reactiva.
- Agregado grueso: Se analiza su proporción en volumen, origen (natural o reciclado), forma y angulosidad, distribución espacial, tamaño máximo nominal, litología y propiedades fisicoquímicas asociadas a su durabilidad y posible reactividad. Las rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas presentan comportamientos muy distintos ante ciclos de humedad o reacciones expansivas.
- Agregado fino: Se estudia su redondez, textura superficial, distribución granulométrica, origen, orientación y características fisicoquímicas. Las arenas feldespáticas, por ejemplo, pueden contribuir a la reactividad álcali-sílice.

- Porosidad: Se determina el porcentaje de vacíos visibles, su forma (capilar, irregular o alveolar), distribución en la matriz cementicia y su estado (vacíos, parcial o totalmente rellenos con geles o productos de hidratación). La porosidad está íntimamente relacionada con la durabilidad del concreto, al facilitar o impedir el ingreso de agentes agresivos.

En conjunto, la petrografía del concreto proporciona una herramienta poderosa para el diagnóstico de fallas, evaluación de desempeño y validación de especificaciones técnicas en estructuras nuevas o en servicio. Su utilidad se ve potenciada cuando se combina con técnicas analíticas como la espectroscopía Raman, el análisis por dispersión de energía (EDS) o la difracción de rayos X, brindando una visión integral del material en estudio.

6.2. Norma ASTM C 856 “Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”.

La prueba consiste en establecer los procedimientos, técnicas, materiales y equipo necesario para la examinación del concreto endurecido mediante técnicas petrográficas, a nivel macro y microscópico, logrando identificar las características físicas, químicas y mineralógicas del concreto, lo que permite evaluar su composición, condiciones de fabricación, mecanismo de deterioro o causas de falla.

6.2.1. Alcance

El examen permite analizar muestras que pueden ser extraídas directamente del sitio, muestras de concreto o mortero expuestas a condiciones ambientales o muestras simuladas dentro de un laboratorio. La prueba será aplicable a todo tipo de mezclas endurecidas, tales como concreto, mortero, lechada, yeso, estuco y similares.

6.2.2. Intención

La intención y procedimientos para el examen se clasifican de la siguiente manera:

1. Calificaciones de Petrógrafos y Técnicos
2. Propósitos del Examen
3. Aparatos
4. Selección y uso del aparato
5. Muestras

6. Examen de muestras
7. Fotografías
8. Preparación de especímenes
9. Examen con microscopio estereoscópico
10. Examen con microscopio polarizador
11. Características de la pasta
12. Informe

6.2.3. Calificaciones de petrógrafos y técnicos

El examen debe ser realizado bajo la dirección y supervisión de un petrógrafo con al menos 5 años de experiencia en exámenes petrográficos en concreto y materiales relacionados al mismo. Así como contar con conocimientos en materiales constituyentes del concreto, dosificaciones, mezclado, manejo, colocación y acabado del concreto. La preparación de muestras debe ser realizada por petrógrafos de concreto o técnicos capacitados, sin embargo, la interpretación y análisis será desempeñada únicamente por petrógrafos calificados, teniendo la capacidad de proporcionar informes orales y/o escritos a clientes o personas que solicitaron el examen.

6.2.4. Propósitos

El propósito de este estudio es caracterizar las propiedades petrográficas del concreto endurecido mediante el análisis y sistematización de informes petrográficos existentes, con el fin de identificar las características que tengan más influencia en el potencial de contracción del material.

A partir de la aplicación sistemática de la norma ASTM C856-22, se busca identificar, clasificar e integrar las observaciones más representativas relacionadas con la microestructura del material, como la porosidad, la textura de la pasta cementante, la distribución de agregados y la presencia de fisuras microscópicas, dentro de un Índice de Potencial de Contracción (IPC).

La construcción de dicho índice se sustenta en la revisión sistemática de 134 informes petrográficos de concretos reales, lo que permitió identificar patrones microestructurales y establecer criterios de evaluación cuantitativos y visuales aplicables al diagnóstico de

patologías en pisos industriales de concreto. En este sentido, el estudio busca ofrecer una herramienta técnica confiable para la interpretación y estandarización de resultados petrográficos, favoreciendo la reducción de la fisuración asociada a la contracción y fortaleciendo los procesos de control de calidad dentro de la industria de la construcción.

6.2.5. Material para preparación

El siguiente material se considera como el habitual para la realización de especímenes, aunque para el caso de muestreo en campo, puede variar y ser adicionado el equipo necesario.

Para la preparación de especímenes:

- Sierra de diamante – lo suficientemente grande para realizar un corte de 175 mm en una pasada, junto con un lubricante para corte.
- Cortadora de diamante – horizontal o de mesa de al menos 400 mm de diámetro, capaz de cortar un espécimen de al menos 100 por 150 mm
- Máquina abrasiva libre – generalmente se usa para aumentar la preparación de las superficies.
- Rueda de pulido – de al menos 200 mm de diámetro, preferentemente de dos velocidades.
- Plato caliente u horno – para permitir el secado o impregnación de especímenes con resina o cera para preparación de secciones delgadas
- Pico pala o martillo de albañil – pueden ser ambos
- Abrasivos: granos de carburo de silicio, No. 100 (150 μm), No. 220 (63 μm), No. 320 (31 μm), No. 600 (16 μm), No. 800 (12 μm); polvos de acabado óptico, polvos para pulido según sea necesario.
- Platos de vidrio grueso, de entre 350 y 450 mm por lado y al menos 10 mm de espesor.
- Medio o medios adecuados para la impregnación de concreto en finas secciones, como bálsamo del Canadá neutro en xileno o aceite de inmersión con un índice igual o ligeramente inferior al índice más bajo del cuarzo (1,544).
- Realizar bajo campana de extracción – para no respirar los vapores.
- Portaobjetos de microscopio – de aproximadamente 24 mm de ancho y al menos 45 mm de largo, el espesor se puede especificar para el ajuste de las máquinas.
- Cubreobjetos – preferiblemente de 18 mm de grosor.

Para la examinación de especímenes

- Estereomicroscopio – que proporciona aumentos de 7x a 70x o más.
- Carretillas – con ruedas pequeñas, superficie plana y superficie curvada para mantener la sección del núcleo.
- Microscopio petrográfico o polarizado – que proporcione potencia de 3.5x, 10x y de 20x a 25x; de 43x a 50x con apertura número de 0.85 o más.
- Microscopio metalográfico – con iluminador vertical, capaz de proporcionar un rango de aumentos desde 25x hasta 500x,
- Micrómetro ocular.
- Micrómetro de platina – para calibrar micrómetros oculares.
- Lámparas para microscopio – en caso de requerirse.
- Sujetadores de agujas y puntas – además de ello, se debe de tener agujas de tipo para cocer No. 10
- Frascos con gotero – para guardar reactivos durante el examen.
- Pinzas variadas – preferiblemente de acero.
- Papel para lentes.
- Refractómetro – que cubran un rango de índices de refracción desde 1.410 hasta al menos 1.785 en incrementos no mayores a 0.005.

6.2.6. Selección y uso del equipo

Los laboratorios deben estar equipados para proporcionar fotografías, fotomicrografías que muestran las características significativas del concreto. De igual manera se recomienda contar con un entorno el cual tenga el equipo mínimo para la realización del examen petrográfico, seleccionando el equipo y suministros para la preparación de muestras

6.2.7. Muestras

El tamaño mínimo deseado de una muestra debe corresponder al menos a un núcleo de dimensiones: 150 mm de diámetro y 300 mm de longitud. Para los exámenes de especímenes de laboratorio se debe describir junto con los ensayos, la edad al momento de la prueba, las pruebas de ensayo para los agregados, cementantes y aditivos en caso de utilizarse.

6.2.8. Examen de muestras

Se inicia revisando toda la información que fue proporcionada al petrógrafo, después se realiza el examen visual y posteriormente la norma ASTM C856 proporciona las siguientes tablas las cuales ayudan a dar un enfoque distinto dependiendo de lo que se busque a través del examen petrográfico.

Espacio dejado en blanco intencionalmente.

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

Tabla No. 1: Examen visual de concreto

TABLA 1 Examen visual del concreto				
Agregado grueso	+ Agregado fino	+ Matriz	+ Aire	+Elementos incrustados
Composición: Dimensión máxima, ^A mm o in., en el rango > d> Tipo: 1. Grava 2. Piedra triturada 3. Mezcla de 1 y 2 4. Otro (nombre) 5. Mezcla 1 + /o 2 + /o 4 Si es del tipo 1, 2 o 4, homogéneo o heterogéneo. Tipos litológicos: Agregado grueso mayor que 20, 30, 40 o 50% del total Estructura: - o Forma - o Distribución - o Envoltura - o Clasificación (tamaño o tamaños uniformes, irregulares, excesivos o insuficientes) - o Paralelismo de los lados planos o ejes largos de las secciones expuestas, normal a la dirección de colocación +/o paralelo a las superficies conformadas y - o acabadas^B	Tipo: 1. Arena natural 2. Arena manufacturada 3. Mixto 4. Otro (Nombre) 5. Mezcla 1 + /o 2 + /o 4 Si es del tipo 1, 2 o 4, homogéneo o heterogéneo. Distribución Forma de la partícula Granulometría Orientación/alineación	Color, en comparación con la tabla de colores de rocas del Consejo Nacional de Investigación (1963) Color: 1. Moteado (abigarrado) 2. Uniforme 3. Cambios graduales Distribución	Mas del 3% del total, ¿Predominantemente huecos esféricos? Menos del 3% del total, ¿Abundantes huecos no esféricos? ¿Diferencias de color entre los huecos y la pasta? Huecos vacíos, llenos, revestidos o parcialmente llenos Huecos irregulares o capas de huecos: entre sí; con lados planos o ejes largos de agregados gruesos.	Tipo, tamaño, localización: tipos de metal, otros elementos Vacíos debajo de refuerzo horizontal o de bajo ángulo ¿Elementos limpios o corroídos? ¿Están las fisuras (o grietas) asociadas con los elementos embebidos?
Condición: ¿Suenan cuando se golpea ligeramente con un martillo o emite un sonido sordo y apagado? ¿Se puede romper con los dedos? ¿Hay grietas? ¿Cómo están distribuidas? ¿A través o alrededor del agregado grueso? Con núcleos o muestras aserradas, ¿se rompió el agregado durante la perforación o el aserrado? ¿Rellenos de grietas? ¿A través o alrededor del agregado grueso? Con núcleos o muestras aserradas, ¿se rompió el agregado durante la perforación o el aserrado? ¿Rellenos de grietas?				
^A Una parte sustancial del agregado grueso tiene dimensiones máximas dentro del rango indicado, medidas en superficies aserradas o rotas. ^B Las secciones aserradas o perforadas cerca y paralelas a las superficies encofradas suelen mostrar turbulencia local como resultado del uso de palas o varillas (compactación) cerca del encofrado. Las secciones aserradas en el plano de la estratificación (normal a la dirección de colocación) probablemente tendrán una orientación poco evidente. Las secciones rotas (fracturadas) normales a la colocación en concreto colocado convencionalmente con adherencia normal tienden a tener abundantes protuberancias de agregado en la parte inferior de la pieza superior (tal como fue vaciada) y abundantes alvéolos (o huecos) en la parte superior de la pieza inferior (tal como fue vaciada).				

Fuente: ASTM C856

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

Tabla No. 2: Esquema para el examen del concreto con un estereomicroscopio

TABLA 2 Esquema para el examen del concreto con un estereomicroscopio			
Nota 1 – Condición – Cuando se examine a 6 a 10× aumentos bajo buena luz, la superficie recién fracturada de un concreto en buenas condiciones físicas que aún conserva la mayor parte de su contenido natural de humedad tiene un brillo (lustre) que en termino mineralógicos es <i>vitreo, brillante y subtranslúcido</i>.^A Los bordes delgados de las astillas de la pasta transmiten luz; los reflejos parecen provenir de muchos puntos diminutos en la superficie, y la cualidad del brillo es similar al de un vidrio roto, pero menos intenso. El concreto en peores condiciones físicas es más opaco en una superficie recién fracturada, y el brillo es opaco, subvitreo y tiende a ser calcáreo (similar a la tiza)			
Agregado grueso	Agregado fino	Matriz	Vacíos
Tipos litológicos y mineralogía según sean perceptibles: Textura superficial Dentro de la pieza: ○ Forma del grano ○ Rango extremo de tamaño de grano observado, mm ○ Medida dentro del rango de ___ a ___ mm ○ Sin textura (demasiado fino para resolverse) ○ Uniforme o variable dentro de la pieza De pieza a pieza: ○ Enlace intergranular (o adherencia intergranular) ○ Porosidad y absorción^B Si el concreto se rompe a través del agregado ¿A través de cuanto y de que tipo? Si hay vacíos en el límite ¿A lo largo de que tipo de agregado? ¿En todos? ¿En un mismo tipo? ¿En más del 50% de un mismo tipo? ¿En varios tipos? Segregación	Tipos litológicos y mineralogía según sean perceptibles: ○ Forma ○ Textura superficial ○ Granulometría ○ Distribución	Color Fracturas alrededor o a través del agregado Contacto de la matriz con el agregado: ○ Cercano, sin abertura visible en la superficie aserrada o rota; agregado no se desprende con dedos o sonda; aberturas en el límite; frecuentes, comunes, raras ○ Ancho ○ Vacío ○ Relleno Fisuras (O grietas): presentes, ausentes, resultado de la preparación de la muestra, preexistentes a la preparación de la muestra Materiales cementantes suplementarios^C Contaminación Exudación (sangrado)	Graduación (o clasificación) Proporción de esféricos o no esféricos No esféricos: elipsoidales, irregulares, en forma de disco Camios de color desde la superficie interior a la matriz Brillo (lustre) de la superficie interior: como el resto de la matriz, opaco, brillante Revestimientos en los vacíos: ausentes, raros, comunes, en la mayoría completos, parciales, incoloros, coloreados, penachos, sedosos, tablas hexagonales. Geles, otros Vacíos inferiores o láminas de vacíos: poco comunes, pequeños, comunes, abundantes.
^A Dana, E. S., <i>Textbook of Mineralogy</i>, revisado por W. E. Ford, John Wiley & Sons, Nueva York, N. Y., 4th ed., 1932, pp. 273–274. ^B Poro visible a simple vista, o a $x \dots$, o que absorbe agua que se deja caer sobre él. ^C Esferas sólidas oscuras o esferas de vidrio con centros huecos, o de magnetita, o de una mezcla de vidrio y magnetita, reconocibles a una magnificación de $\times 9$ en superficies aserradas o rotas. Se pueden reconocer otras adiciones minerales con partículas características visibles a baja magnificación. La superficie pulida de concreto que contienen cemento de escoria de alto horno es inusualmente blanca cerca de las superficies libres, pero conserva parches verdosos o azul – verdoso, y las partículas de escoria se pueden ver con el estereomicroscopio o el microscopio polarizante.			

Fuente: ASTM C856

Tabla No. 3: Esquema para el examen del concreto en secciones delgadas

TABLA 3 Esquema para el examen del concreto en secciones delgadas		
Agregado grueso y fino	Granos de cemento relictos y productos de hidratación	Características de la pasta cementante
Mineralogía, textura, estructura, variable u homogéneo. Granulometría (gradación): el exceso o deficiencia de tamaños de arena debe juzgarse después de examinar una serie de secciones delgadas. Tamaño de grano y naturaleza de los límites internos en el agregado. Clasificación del agregado grueso y fino. Agregado mineral natural o piedra triturada; agregado fino natural o manufacturado. Adherencia con la matriz; fisuras periféricas dentro de los límites de los granos de agregado; fisuras internas. Microfisuras generales si se puede establecer que existían antes de la preparación de la sección delgada. Reacciones álcali – carbonato – si el agregado grueso es una o varias rocas carbonatadas, ¿existen bordes o bordes parcialmente bordeadas por pasta libre de hidróxido de calcio junto a la porción dolomítica, mientras que la pasta junto a la porción de piedra caliza es norma? Ver otros comentarios en la columna 3. Reacción álcali – sílice – ¿El agregado contiene partículas de tipos conocidos por ser reactivos (sílex, novaculita, vidrio volcánico ácido, cristobalita, tridimita, ópalo, vidrio de botella)? Si es cuarcita, subgrauvaca metamorfoseada, argilita, filita, o cualquiera de los enumerados en la frase anterior, ¿hay fisuras dentro de la periferia del agregado? ¿Se ha gelatinizado el agregado de tal manera que se ha desprendido durante el seccionamiento dejando solo un caso periférico adherido al mortero? (Este último fenómeno también ocurre en concreto con agregado de escoria enfriada por aire, donde indica reacción entre cemento y escoria). Las fisuras que parecen ser de tracción y que se estrechan desde el centro hacia el borde de la partícula también son evidencia de la reacción álcali-sílice (6).	En concreto de más de dos años de antigüedad y curado normalmente, los únicos granos de cemento residuales son aquellos que eran los más grandes, los cuales pueden estar compuestos de varios constituyentes o ser de alita o belita C_3S y C_2S sustituidos. Los dos últimos pueden estar bordeados por una o dos capas de gel con diferentes índices de refracción, o por una capa de hidróxido de calcio. Los granos relictos más grandes pueden estar verdaderamente sin hidratar y conservar la baja birrefringencia (gris oscuro) de la alita en secciones cuasihexagonales distorsionadas, y la birrefringencia visible hasta el amarillo de primer orden de las maclas lamelares en granos redondeados de belita. El aluminoferrito intersticial aparece como granos prismáticos que varían en color de marrón a marrón verdoso y a marrón rojizo, con un alto índice de refracción y un pleocroísmo enmascarado por el color del grano. El aluminato tricálcico no suele reconocerse en sección delgada porque la forma cúbica es isotrópica o porque se hidrata tempranamente en la historia de hidratación del concreto, formando etringita submicroscópica o hidrato de sulfato de aluminio y tetraóxido de calcio, u otros hidratos de aluminio y tetraóxido de calcio con o sin otros aniones. Estos pueden ser visibles en vacíos en concreto más antiguo, pero se discriminan mejor mediante difracción de rayos X. Los cementos de diferentes fuentes tienen distintos colores de aluminoferrito, y los silicatos de calcio tienen tonos verde pálido, amarillo o blanco. Debería ser posible hacer coincidir cementos de una misma fuente.	La pasta de cemento normal consiste, bajo luz transmitida plana, en una materia de color tostado pálido que varía ligeramente en índice de refracción y que contiene granos de cemento remanentes sin hidratar. En concreto seccionado a edad temprana o no curado adecuadamente, la pasta contiene granos de cemento sin hidratar que varían hasta unos pocos micrómetros (μm) de tamaño máximo, con un límite superior de hasta 100 μm de diámetro máximo si el cemento fue molido en molinos de circuito abierto o fue molido deliberadamente para obtener una baja área superficial y reducir el calor de hidratación. Bajo polarización cruzada, la pasta normal es negra o gris moteada muy oscura con cristales poiquilíticos anhedrales dispersos o pequeñas segregaciones de hidróxido de calcio y granos de cemento relictos dispersos. En concreto con una alta relación agua-cemento y agregado silíceo, los cristales de hidróxido de calcio son tan grandes como el tamaño máximo de los granos de cemento residuales, aproximadamente 100 μm. En concreto con una menor relación agua-cemento, mayor contenido de cemento y agregado silíceo o carbonatado, el tamaño máximo de los cristales de hidróxido de calcio es considerablemente menor. Independientemente de la relación agua-cemento y el tipo de agregado, los cristales de hidróxido de calcio ocupan espacio tangencial a las caras inferiores de las partículas de agregado. Donde todo el agregado es roca carbonatada, el tamaño máximo del hidróxido de calcio es menor que en concreto comparable con agregado silíceo. (El hidróxido de calcio es probablemente epitaxial sobre la calcita.) La pasta de cemento en concreto que ha sido sometida a lixiviación ácida prolongada es baja en hidróxido de calcio, el cual está presente como granos recristalizados virtualmente anhedrales precipitados cerca de las superficies exteriores. En concreto de más de dos o tres años de antigüedad fabricado con cemento Tipo I, II o III, es de esperar cierta etringita en forma de rosetas en los vacíos de aire. Este es un fenómeno normal; para demostrar un ataque por sulfato, debe establecerse que el contenido de SO_3 del concreto es mayor que el que habría sido suministrado por el contenido original de sulfato del cemento. La etringita en los vacíos no es la etringita que ha dañado el concreto, aunque puede acompañar a la etringita submicroscópica en la pasta que sí ha dañado el concreto.

Fuente: ASTM C856

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

Tabla No. 4: Características del concreto observadas con microscopios.

TABLA 4 Características del concreto observadas con microscopios			
Característica	Tipo de microscopio		
	Estereomicroscopio	Petrográfico	Metalográfico
Agregado			
1. Forma	1. X	1. X	1. X
2. Granulometría	2. X	2. ...	2. ...
3. Distribución	3. X	3. ...	3. ...
4. Textura	4. X	4. X	4. X
5. Composición	5. X	5. X	5. ...
6. Tipo de rocas	6. X	6. X	6. ...
7. Alteración	7. X	7. X	7. ...
a. Grado de productos	a. X	a. X	a. X
8. Recubrimientos	8. X	8. X	8. ...
9. Bordes	9. X	9. X	9. X
10. Fisuración interna	10. X	10. X	10. X
11. Contaminación	11. X	11. X	11. ...
Concreto			
1. Con o sin aire incorporado	1. X	1. X	1. ...
2. Vacíos de aire	2. ...	2. ...	2. ...
a. Forma	a. X	a. X	a. X
b. Tamaño	b. X	b. X	b. X
c. Distribución	c. X	c. ...	c. ...
3. Sangrado	3. X	3. ...	3. ...
4. Segregación	4. X	4. ...	4. ...
5. Adherencia agregado – pasta	5. X	5. X	5. X
6. Fracturas	6. X	6. X	6. X
7. Elementos embebidos	7. ...	7. ...	7. ...
a. Tamaño	a. X	a. ...	a. ...
b. Forma	b. X	b. ...	b. ...
c. Localización	c. X	c. ...	c. ...
d. Tipo	d. X	d. ...	d. ...
8. Alteración	8. ...	8. ...	8. ...
a. Grado y tipo de productos de reacción	a. X	a. X	a. X
b. Localización	b. X	b. X	b. X
c. Identificación	c. X ^A	c. X	c. ...
9. Naturaleza y condición de los tratamientos superficiales	9. X	9. X	9. ...
Pasta			
1. Color	1. X	1. X	1. ...
2. Dureza	2. X	2. ...	2. X
3. Porosidad	3. X	3. ...	3. X
4. Carbonatación	4. X	4. X	4. ...
5. Cemento residual	5. ...	5. ...	5. ...
a. Distribución	a. ...	a. X	a. X
b. Tamaño de partícula	b. ...	b. X	b. X
c. Abundancia	c. ...	c. X	c. X
d. Composición	d. ...	d. X	d. X
6. Materiales cementantes suplementarios	6. X ^B	6. X	6. X
a. Tamaño	a. ...	a. X	a. X
b. Abundancia	b. X	b. X	b. X
c. Identificación	c. X	c. X	c. X
7. Compuestos en cemento hidratado	7. X ^C	7. X	7. X
8. Contaminación	8. ...	8. ...	8. ...
9. Tamaño	9. X	9. X	9. X
10. Abundancia	10. X	10. X	10. X
11. Identificación	11. ...	11. X	11. X ^D

^A La etringita secundaria a veces puede reconocerse por el hábito cristalino y el brillo sedoso.

^B La ceniza volante puede detectarse por el color y la forma cuando hay esferas oscuras. En el concreto no se ha oxidado, la presencia de escoria puede inferirse por el color verde o azul de la pasta.

^C La etringita y el hidróxido de calcio en los vacíos puede reconocerse por sus hábitos cristalinos

^D El óxido de magnesio y el óxido de calcio deberían ser identificables en la sección pulida.

Fuente: ASTM C856

6.2.9. Microfotografías petrográficas

La documentación fotográfica constituye un componente esencial en el análisis petrográfico del concreto, ya que permite registrar visualmente el estado original y los cambios morfológicos de los especímenes durante su análisis. Las imágenes deben capturar tanto las características macroscópicas como microscópicas de las muestras, incluyendo secciones pulidas, láminas delgadas, superficies de fractura, y cualquier evidencia de daño estructural o reacción química.

Se recomienda que las fotografías se realicen antes y después de cualquier alteración física o química, con el fin de documentar el proceso de análisis y permitir comparaciones objetivas. Es fundamental incluir escalas gráficas o referencias de medida visibles en cada imagen, a fin de asegurar la reproducibilidad y la cuantificación precisa de características como el tamaño de poros, fisuras o partículas.

6.2.10. Preparación de especímenes

La norma ASTM C856 establece directrices detalladas para la preparación de especímenes destinados al análisis petrográfico de concreto endurecido. Si bien estas especificaciones están principalmente orientadas a muestras extraídas de estructuras en servicio, también pueden adaptarse al estudio de especímenes fabricados en laboratorio. En este caso, se sugiere organizar las muestras en un orden lógico que facilite su comparación en cuanto a composición, estado físico y condiciones de exposición.

El examen visual se hace con base a las Tablas 1 y 2, diferenciando si hubo una discrepancia de materiales, proporciones, exposición o una combinación de ambos. Tomando fotografías antes y después de alterar las muestras.

Para las láminas delgadas, se cortan los especímenes a manera de obtener láminas de 2mm (1/16”) pudiendo utilizar alguna resina epóxica de ser necesario si parece que antes de cortarlo puede sufrir una desintegración. Colocándose sobre el portaobjetos utilizando resina epóxica flexible, puliendo las placas con abrasivos hasta que alcancen un espesor de 30 μ m o menos.

6.2.11. Examen con microscopio estereoscópico

El examen con microscopio estereoscópico permite observar características morfológicas y texturales del concreto endurecido, utilizando aumentos que oscilan entre 5x y 150x, tal como se especifica en las Tablas 1 y 2 del protocolo. Esta técnica complementa el examen visual convencional y suele realizarse de manera alternada para confirmar hallazgos o detectar irregularidades adicionales no visibles a simple vista.

La observación bajo aumento facilita la detección de grietas superficiales generadas durante la formación, acabado, corte o lijado de los especímenes. Estas grietas pueden posteriormente abrirse de manera controlada para analizar la presencia de productos asociados a reacciones deletéreas, como la formación de gel de sílice en reacciones álcali-sílice, productos de carbonatación o señales de corrosión incipiente en el acero de refuerzo

6.2.12. Examen con microscopio petrográfico

Características de buenas secciones delgadas en concreto

La superficie inferior montada está libre de abrasivos y ha sido pulida hasta obtener un mate liso. La superficie inferior del portaobjeto está completa; los vacíos de aires tienen perímetros completos; existe un límite nítido entre el vacío y la pasta

El espesor deseable para secciones delgadas varía entre 40 y 20µm. Si la muestra presenta demasiados vacíos, es recomendable aumentar el espesor de las secciones. En los casos donde se busque preservar el contacto entre la pasta y agregados gruesos, se podrá dejar que las secciones sean más gruesas de lo normal.

6.2.13. Características de la pasta

Muchas características físicas y mineralógicas de la pasta se encuentran influenciadas o parcialmente gobernadas por la relación agua/cemento (a/c), dentro de ellos se podrá evaluar:

- Color, dureza, densidad, porosidad
- Textura de superficies de fractura
- Tamaño, abundancia, color y mineralogía de materiales cementantes
- Tamaño, abundancia y morfología de hidróxido de calcio, como producto de la hidratación.
- Grado de hidratación de los cementantes.

- Intensidad del color de pastas impregnadas con colorante.
- Magnitud de sangrado y segregación de materiales.

Debido a la naturaleza variable de las pastas, su edad y la exposición a diversos agentes externos, no existe un procedimiento estándar generalmente aceptado que use métodos microscópicos para determinar la relación a/c del concreto endurecido, este se atribuye más a comparaciones con otros tipos de pasta con un determinado porcentaje de a/c, como una guía de identificación

6.2.14. Informe

El informe del examen debe incluir lo siguiente:

- Tipo y nomenclatura de los especímenes.
- Historial de las muestras, en la medida que esté disponible.
- Ensayos físicos y químicos realizados a las muestras, con sus resultados.
- Descripción de las muestras y un informe de proporciones de mezcla, si están disponibles o si se pueden estimar, prácticas constructivas, y calidad original del concreto en la construcción, según la información disponible.
- Interpretación, en la medida de lo posible, de la naturaleza de los materiales y de los eventos químicos y físicos que hayan llevado al éxito o deterioro del concreto.

6.3. Identificación de parámetros críticos de diseño observables mediante petrografía en concreto endurecido

El concreto consta de múltiples parámetros los cuales tienen influencia a la hora de mitigar los efectos por contracción en el concreto, permitiendo evaluar la distribución y proporción de sus componentes.

6.3.1. Relación agua/cemento

La cantidad de agua y cemento que son utilizadas para formar una mezcla trabajable debe ser especificada desde el apartado de diseño, si la relación entre estos materiales no fuese precisa, las características que se pretenden alcanzar podrían variar. Por ello cabe

resaltar que el contenido de agua puede tener un impacto significativo en la exudación del concreto y su potencial de contracción (Lema & Castillo, 2018).

Por medio del examen petrográfico ASTM C856 es posible dictaminar el valor para la relación a/c gracias a una examinación visual y con ello saber si los especímenes analizados caen dentro de los valores sugeridos por el ACI 302 (0.47 a 0.55).

6.3.2. Tamaño máximo nominal del agregado

El tamaño del agregado es un parámetro clave en el diseño de mezclas de concreto y puede ser determinado a través del análisis petrográfico. A medida que su tamaño incrementa, su **superficie específica** disminuye, lo que reduce la **cantidad de pasta** necesaria para cubrir las partículas (Burga, 2022). Esto, a su vez, permite utilizar **menos cemento**, lo que se traduce en una menor generación de calor, menor exudación y una disminución del potencial de contracción del concreto. Sin embargo, es importante cuidar el tamaño máximo del agregado, el cual, de acuerdo con las recomendaciones del comité ACI 302, no debe exceder 1½” o 38.1 mm.

6.3.3. Porosidad

La porosidad se define como el volumen de vacíos o espacios interconectados presentes en la matriz cementante del concreto. Durante el proceso de endurecimiento y secado, el agua alojada en estos poros comienza a evaporarse, generando tensiones capilares que inducen esfuerzos de compresión interna. Esta tensión superficial promueve la formación de grietas por contracción, las cuales pueden comprometer la integridad del material. Además, la porosidad determina el grado de exposición ambiental del concreto, influyendo en su permeabilidad y en la susceptibilidad a la penetración de agentes agresivos. Una porosidad elevada, especialmente cuando los poros se encuentran interconectados, incrementa la magnitud y la velocidad de la contracción, afectando la durabilidad y el desempeño a largo plazo del material (Yıldız et al., 2023; Sánchez et al., 2022).

6.3.4. Microfisuras

Las microfisuras son discontinuidades microscópicas que aparecen de manera común en el concreto, pero su presencia no debe considerarse inocua. Estas microfisuras pueden evolucionar hacia fisuras visibles y de mayor amplitud, comprometiendo la resistencia

mecánica y la cohesión interna del material. Generalmente se originan por procesos de contracción plástica o por secado, aunque también pueden deberse a prácticas inadecuadas de curado, reemplado excesivo o variaciones térmicas abruptas. Su desarrollo progresivo constituye un indicio temprano de patologías relacionadas con la contracción y la pérdida de integridad estructural (Koparan & Plevris, 2022; Neville & Brooks, 2021).

6.3.5. Condición de curado

El curado es una condición fundamental que controla el grado de hidratación del cemento y la evolución de la microestructura del concreto. Un curado adecuado mantiene el material húmedo durante el tiempo necesario para completar las reacciones de hidratación, asegurando un desarrollo óptimo de la resistencia mecánica y una reducción de la porosidad. Por el contrario, un curado deficiente puede ocasionar una evaporación prematura del agua, promoviendo la contracción y la aparición de microfisuras superficiales. En este sentido, las condiciones de curado determinan la densidad, durabilidad y desempeño general del concreto endurecido (Zhao et al., 2023; ASTM C511-19).

6.3.6. Arcillas adheridas

La presencia de partículas de arcilla adheridas a los agregados naturales es un factor adverso en la fabricación del concreto, ya que altera la capacidad de absorción y la adherencia pasta-agregado. Estas partículas incrementan la demanda de agua en la mezcla y favorecen una mayor contracción por secado, además de reducir la permeabilidad y afectar la cohesión interna del material. Asimismo, las arcillas pueden interferir en el proceso de hidratación y en la formación de los productos de reacción del cemento, provocando zonas de debilidad dentro de la matriz cementante. Su control mediante lavado o selección de agregados limpios resulta esencial para garantizar la calidad del concreto (Li et al., 2022; Neville & Brooks, 2021).

7. Metodología

7.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como propósito la creación de un Índice de Potencial de Contracción (IPC) que permita evaluar el riesgo de contracción en concretos endurecidos en función de variables determinadas por estudios petrográficos. Asimismo, se considera una investigación descriptiva y correlacional, dado que busca identificar las características petrográficas más relevantes en el concreto endurecido y establecer su relación con el fenómeno de la contracción.

7.2. Nivel de investigación

El estudio posee un enfoque exploratorio y descriptivo, debido a que en México la aplicación de la petrografía en el análisis del concreto endurecido ha sido escasamente abordada. Por ello, se pretende abrir camino a esta metodología mediante la sistematización de informes petrográficos elaborados bajo la norma ASTM C856.

El nivel correlacional se justifica porque la construcción del IPC busca identificar y asociar las variables petrográficas observables en el concreto endurecido con el fenómeno de la contracción.

Además, el estudio no se limita a la sistematización y análisis documental, sino que integra un proceso de correlación y ponderación de las variables, encaminado a establecer relaciones cuantitativas de las características micro y macroestructurales y el potencial de contracción del concreto. Contribuyendo a la consolidación del análisis petrográfico como una herramienta de diagnóstico en la ingeniería del concreto.

7.3. Diseño de investigación

El diseño es no experimental, ya que no se manipulan las variables de estudio, sino que se analizan los especímenes previamente elaborados y documentados. A su vez, el estudio tiene un carácter documental, pues se emplea un método de revisión estructurada que permite extraer de manera sistemática las variables petrográficas más representativas. Esta información se utiliza para construir un índice compuesto (IPC) que cuantifica, de forma relativa, la influencia de cada variable sobre el potencial de contracción.

7.4. Método de investigación

El método adoptado es cuantitativo, ya que se estructura el IPC con base en datos medibles provenientes de los especímenes, tales como porcentajes, frecuencias y relaciones determinadas mediante la norma ASTM C856-22. El razonamiento es predominantemente inductivo, partiendo de los resultados obtenidos en las muestras para generar un modelo generalizable de evaluación del riesgo de contracción.

7.5. Población de estudio

La población de estudio está constituida por especímenes de concreto endurecido evaluados mediante técnicas petrográficas conforme a la norma ASTM C856 en el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.

7.6. Muestra

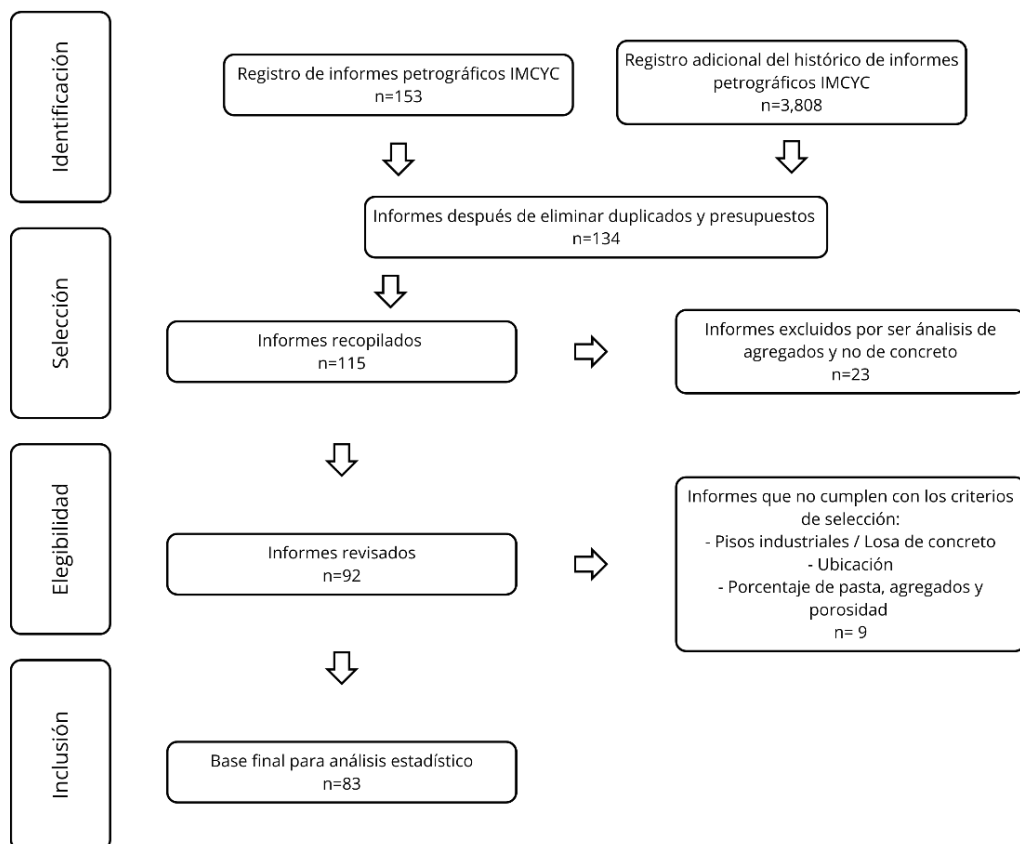
Se recopilaron 134 informes petrográficos elaborados entre los años 2015 y 2023. A partir de ellos, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión, seleccionando únicamente aquellos informes que:

1. Utilizan la metodología ASTM C856,
2. Corresponden a pisos industriales o losas de concreto,
3. Indican la ubicación de la obra,
4. Incluyen información sobre el porcentaje de pasta, agregados y porosidad, y
5. Presentan la relación agua/cemento.

Después de aplicar dichos criterios, se seleccionaron 83 informes que contenían un total de 182 especímenes para su análisis. El procedimiento de selección se documentó mediante un diagrama de flujo (Figura No. 4), adaptado del modelo PRISMA, el cual permite representar de manera sistemática el proceso de filtrado y depuración de la muestra.

Cada informe fue revisado individualmente, y de cada uno se extrajeron los datos necesarios para la construcción del Índice de Potencial de Contracción. Para garantizar la uniformidad en el tratamiento de la información, se estableció un código de lectura estandarizado, que permitió clasificar de manera sistemática las características de cada variable reportada. Finalmente, las variables fueron jerarquizadas en orden de importancia para su incorporación en el IPC.

Figura No. 4. Diagrama de flujo adaptado del modelo PRISMA.



Fuente: Elaboración propia

7.7. Variables

- Variable dependiente: Índice de Potencial de Contracción (IPC).
- Variables independientes: Relación agua/cemento, tamaño máximo nominal del agregado grueso, porcentaje de porosidad, condición de curado y presencia de arcillas o partículas deleznales.

7.8. Procedimiento

Para alcanzar los objetivos de esta investigación, la metodología se desarrolló en tres etapas principales:

1. Observación y sistematización de informes petrográficos
2. Construcción del Índice de Potencial de Contracción (IPC)
3. Análisis e interpretación de resultados

7.8.1. Observación y sistematización de informes petrográficos

En esta primera etapa se llevó a cabo la compilación, depuración y organización de la información contenida en los informes petrográficos, correspondientes a especímenes de concreto elaborados bajo distintas condiciones de fabricación, exposición y servicio, con procedencias que abarcan desde Chihuahua hasta Campeche. Esta diversidad geográfica permitió disponer de un conjunto representativo de concretos reales utilizados en diversas regiones del país.

Una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión, se procedió a la construcción de una base de datos en la que cada espécimen fue registrado y evaluado de acuerdo con sus principales características petrográficas. Este proceso permitió estandarizar la información y garantizar la comparabilidad entre los distintos informes analizados.

El propósito central de esta etapa fue establecer la base documental y analítica para el desarrollo del Índice de Potencial de Contracción (IPC), mediante la identificación de tendencias, patrones y relaciones entre las variables petrográficas observadas y los distintos tipos de contracción presentes en los concretos endurecidos. Esta sistematización proporcionó los elementos necesarios para comprender cómo las propiedades micro y macroestructurales influyen en el comportamiento volumétrico del material y, en consecuencia, en su susceptibilidad a la contracción.

7.8.2. Construcción del Índice

- a. Mediante la recopilación y revisión de 182 especímenes de concreto endurecido, evaluados bajo los lineamientos de la norma ASTM C856, se registraron las variables petrográficas observables que inciden en la contracción.
- b. A partir de la revisión bibliográfica y del análisis de los informes petrográficos, se seleccionaron los parámetros con mayor influencia en la contracción del concreto. Jerarquizándolos mediante escalas de ponderación que asignaban si se tiene mayor o menor influencia.
- c. Se integran los parámetros seleccionados en un modelo de suma ponderada, dando origen al IPC. Este índice permite cuantificar el riesgo de contracción en un concreto endurecido en función de las características petrográficas observadas.
- d. Las variables se designaron de la siguiente manera:

1. Relación agua/cemento: Los valores óptimos especificados por el ACI 302.1R se encuentran dentro del rango de 0.47 a 0.55. Una vez que se realizó la revisión de los informes se determinó lo siguiente:
 - a. Si el valor de la relación a/c se encuentra por debajo de 0.35 o por encima de 0.7 no se asignan puntos para el IPC.
 - b. Si el valor de la relación a/c se encuentra entre 0.35 y 0.47, los puntos asignados para el IPC subirán de manera lineal de 0 a 25 puntos.
 - c. Si el valor de la relación a/c se encuentra entre 0.47 y 0.55 se asignan 25 puntos para el IPC.
 - d. Si el valor de la relación agua/cemento se encuentra entre 0.55 y 0.7, los puntos asignados para el IPC disminuirán de manera lineal de 25 a 0.
2. Tamaño Máximo Nominal del agregado: El límite máximo establecido por el ACI 302.1R es de 38.1 mm (1 ½”) mientras que el límite mínimo para una mezcla será de 9.5 mm (3/8”).
 - a. Si el valor de TMN es menor que 9.5 mm no se asignan puntos para el IPC.
 - b. Si el valor de TMN se encuentra entre 9.5 mm y 38.1 mm, los puntos asignados al IPC subirán de manera lineal de 0 a 20.
 - c. Si el valor de TMN es mayor a 38.1 mm se topará a 20 puntos.
3. Porcentaje de porosidad: Para este caso únicamente se consideró el porcentaje de porosidad en función del TMN para mezclas sin aire incluido, establecido en el ACI 302.1R.

Tabla No. 5: Límites de porcentaje de aire en mezcla sin aire incluido.

TMN	Límite
9.50	0.030
12.70	0.025
19.05	0.020
25.40	0.015
38.10	0.010

Fuente: ACI 302.1R

- a. Si el porcentaje de porosidad supera el límite dado por su TMN no se asignan puntos para el IPC.
 - b. Si el porcentaje de porosidad se encuentra en el límite, es adecuado y se asignan 15 puntos para el IPC.
 - c. Si el porcentaje de porosidad se encuentra por debajo se asignarán puntos de manera proporcional del 0 al 15 para el IPC.
4. Microfisuras: Los reportes petrográficos que utilizan la norma ASTM C 856, establecen un apartado para describir las fisuras presentes, a partir de dicho apartado se generó un código de lectura el cual otorga una ponderación en función del daño observado.
 - a. Ninguna / trazas imperceptibles, otorga 15 puntos para el IPC: No se observan fisuras en la matriz cementante ni en la zona de transición, en el caso de que existan, son tan finas y aisladas que no representan afectaciones a la matriz.
 - b. Trazas detectables puntuales, otorga 9 puntos para el IPC: Se presentan microfisuras aisladas, visibles con aumento, pero sin interconexión o continuidad, considerándose defectos menores y puntuales.
 - c. Microfisuras moderadas, otorga 6 puntos para el IPC: Se observa una cantidad intermedia de fisuras distribuidas en la matriz cementante, algunas de ellas pueden mostrar interconectarse, indican un inicio de posible deterioro.
 - d. Microfisuras generalizadas, otorga 3 puntos para el IPC: Gran número de fisuras presentes en la matriz, las cuales se encuentran con un nivel alto de conexión entre sí, señal de daño avanzado en la estructura.
 - e. Microfisuras extensas severas, no otorga puntos para el IPC: Fisuras generalizadas y continuas en toda la matriz, las grietas están conectadas y abiertas.
5. Condición de curado: Los informes petrográficos que utilizan la norma ASTM C 856 establecen las afectaciones que puede tener un curado deficiente en una mezcla de concreto.

- a. Curado conforme a especificación, otorga 10 puntos para el IPC: Se garantizo el mantenimiento de humedad necesaria, presentando partículas de cemento hidratadas correctamente.
 - b. Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente, otorga 8 puntos para el IPC: La evidencia de curado en el concreto es correcta, pero no existe evidencia o registro completo en el informe. Aunque no presenté daños, la falta de control documentado genera incertidumbre.
 - c. Curado inadecuado, otorga 6 puntos para el IPC: Se observan coloraciones distintas en múltiples zonas del espécimen de concreto, además de tener presentes microfisuras en la superficie.
 - d. Curado insuficiente / Curado excesivo, otorga 4 puntos para el IPC: el curado insuficiente viene plasmado en los informes como una pérdida acelerada de humedad, mientras que el curado excesivo genera lixiviación en la pasta.
 - e. Evidencia de curado nulo, no otorga puntos para el IPC: El concreto no tiene presencia de ningún procedimiento de curado, además de presentar una alta porosidad y fisuración temprana.
6. Presencia de arcillas o partículas deleznales
- a. Ninguna, otorga 10 puntos para el IPC: No se observa presencia de arcillas en el agregado o en la pasta, además de presentar una correcta adherencia pasta – agregado.
 - b. Presencia de trazas /ligera, otorga 6 puntos para el IPC: Se detectan pequeñas partículas aisladas de arcillas, pueden reducir ligeramente la adherencia pasta – agregado, pero no se compromete el desempeño.
 - c. Moderada, otorga 3 puntos para el IPC: Se identifica la presencia de múltiples terrones de arcilla dispersas en la matriz, pudiendo afectar la trabajabilidad, incrementando el consumo de agua y con ello el potencial de contracción.

- d. Alta, no otorga puntos para el IPC: Las arcillas se encuentran en cantidades altas, incluso generando recubrimiento en los agregados, haciendo que la adherencia pasta – agregado disminuya.

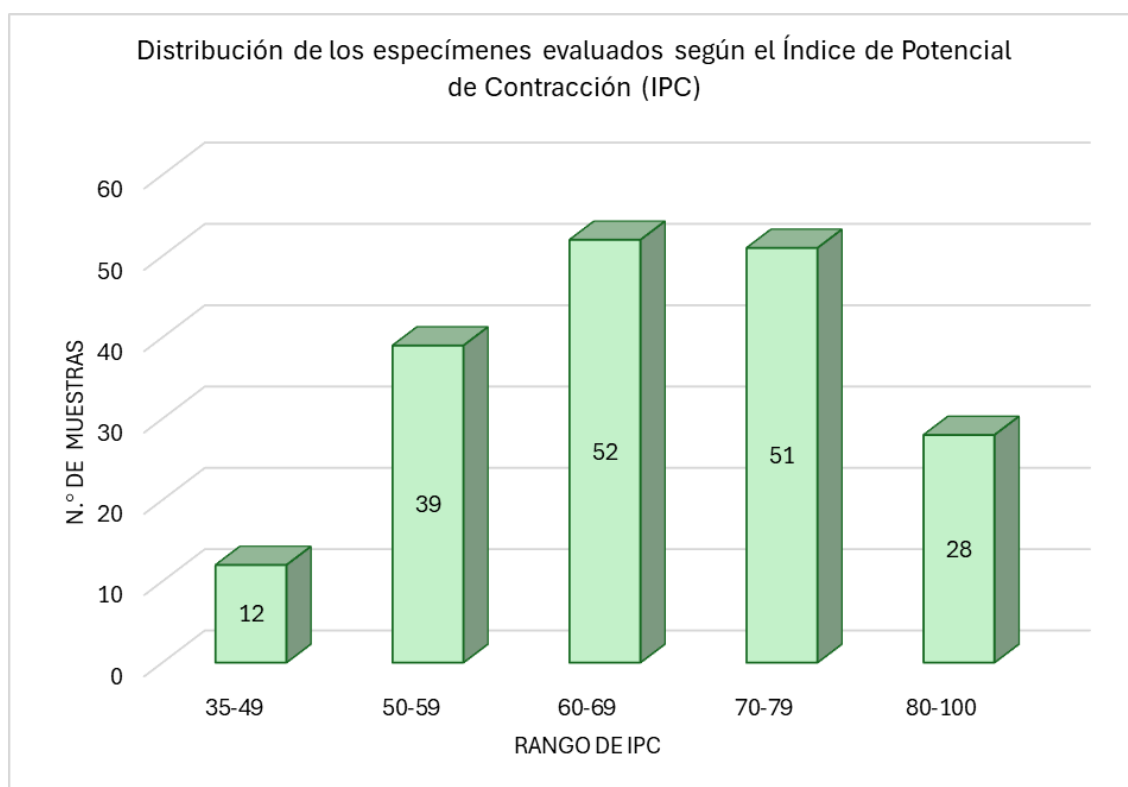
8. Análisis de datos

En la Tabla No. 6 se presentan los resultados del Índice de Potencial de Contracción (IPC) correspondientes a cada una de las muestras analizadas. Para su determinación se consideraron las variables más relevantes que, de acuerdo con la literatura científica y las normas de referencia, influyen en el comportamiento de contracción del concreto. Estas variables incluyen la relación agua/cemento, el tamaño máximo nominal de los agregados, el porcentaje de porosidad, la presencia de microfisuras, la condición de curado y el contenido de arcillas o partículas deleznales.

La integración de estos parámetros permitió obtener un valor cuantitativo único del IPC para cada espécimen, el cual representa su nivel de susceptibilidad a la contracción. A partir de este valor, los especímenes fueron clasificados en categorías de bajo, medio o alto riesgo, lo que facilitó el análisis comparativo entre las variables petrográficas evaluadas y permitió identificar tendencias generales en el comportamiento de los concretos endurecidos. Esta clasificación contribuyó a comprender de manera más precisa cómo interactúan las características micro y macroestructurales en la manifestación de los distintos tipos de contracción.

La tabla completa con el detalle individual de cada parámetro evaluado, así como los valores parciales y las ponderaciones empleadas, se incluye en el apartado de Anexos, con el propósito de documentar de manera transparente el procedimiento de cálculo y asegurar la trazabilidad de los resultados obtenidos.

Gráfico No.1. Distribución de los especímenes evaluados según el Índice de Potencial de Contracción (IPC)



Fuente: Elaboración propia

La distribución de los 182 especímenes evaluados se concentra principalmente en dos intervalos del IPC: 60–69 (28.57%) y 70–79 (28.02%), seguidos por el rango 50–59 (21.43%), lo que indica que más del 75% de los concretos analizados presentan un nivel posible de contracción medio a moderado. Solo el 15.38% alcanzó un IPC superior a 80, considerado como de bajo riesgo de contracción.

Tabla No.6. Registro de resultados del Índice de Potencial de Contracción

Índice de Potencial de Contracción en especímenes de concreto endurecido, analizado mediante técnicas petrográficas.																									
No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC	No.	IPC
1	78.00	15	64.01	29	67.00	43	78.00	57	58.68	71	59.12	85	64.68	99	86.68	113	67.90	127	60.09	141	64.68	155	76.68	169	63.12
2	58.68	16	72.34	30	67.00	44	68.68	58	58.68	72	78.68	86	64.68	100	68.34	114	74.00	128	61.65	142	66.34	156	41.79	170	63.12
3	64.68	17	53.68	31	66.00	45	68.68	59	58.68	73	60.68	87	56.67	101	78.68	115	78.00	129	55.65	143	66.34	157	44.45	171	69.12
4	58.68	18	51.68	32	63.00	46	68.68	60	66.68	74	74.68	88	52.34	102	84.68	116	63.34	130	73.83	144	66.34	158	45.45	172	84.68
5	64.68	19	76.68	33	78.00	47	71.68	61	66.68	75	70.51	89	52.34	103	84.68	117	70.34	131	54.54	145	60.79	159	45.45	173	84.68
6	58.68	20	86.68	34	72.00	48	60.34	62	59.12	76	70.51	90	74.34	104	64.68	118	72.07	132	73.83	146	84.68	160	45.45	174	66.34
7	64.68	21	51.68	35	72.24	49	50.34	63	48.01	77	76.34	91	74.34	105	64.68	119	72.07	133	68.07	147	50.34	161	46.34	175	76.34
8	58.68	22	62.68	36	80.00	50	70.34	64	39.68	78	54.45	92	75.83	106	72.00	120	39.09	134	61.65	148	78.68	162	64.01	176	84.68
9	78.00	23	51.68	37	56.34	51	84.68	65	59.12	79	46.12	93	45.65	107	50.68	121	72.07	135	61.65	149	84.68	163	55.57	177	72.09
10	74.68	24	54.68	38	63.34	52	72.00	66	59.12	80	66.68	94	45.65	108	74.00	122	72.07	136	78.00	150	84.68	164	59.12	178	82.45
11	78.00	25	54.68	39	65.68	53	58.95	67	58.68	81	75.68	95	86.68	109	76.34	123	72.07	137	78.00	151	84.68	165	69.12	179	51.33
12	74.68	26	54.68	40	68.68	54	58.68	68	84.68	82	86.68	96	80.68	110	76.34	124	61.65	138	78.00	152	84.68	166	69.12	180	59.79
13	80.68	27	63.00	41	82.68	55	76.34	69	59.12	83	86.68	97	86.68	111	76.34	125	61.07	139	64.68	153	84.68	167	69.12	181	58.68
14	74.68	28	70.00	42	68.68	56	58.68	70	69.12	84	58.68	98	86.68	112	76.34	126	70.51	140	84.68	154	84.68	168	69.12	182	98.00

Fuente: Elaboración propia

El análisis de 182 especímenes de concreto endurecido, arrojó valores del Índice de Potencial de Contracción (IPC) que oscilan entre los 39.09 (mínimo) y 98.00 (máximo), con un promedio de 67.62. Solo el 43% de las muestras, tuvieron un IPC superior a los 70 puntos, por lo que la cantidad de especímenes que tienen una fuerte tendencia a sufrir problemas por contracción es mayor.

8.1. Relación agua/cemento

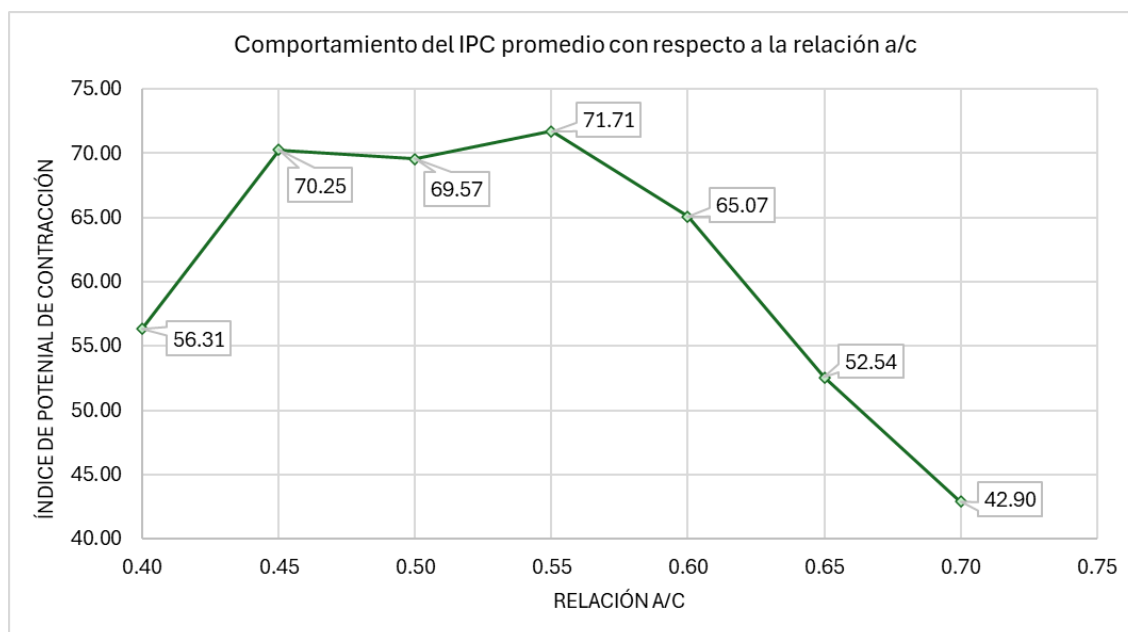
Los valores proporcionados en los informes petrográficos oscilan entre 0.40 (mínimo) y 0.70 (máximo), con un promedio de 0.54. Además de ello, de los 182 especímenes de concreto, 114 se encuentran dentro de los rangos recomendados por el ACI 302 (0.47 – 0.55), concluyendo que el 62.6% de las mezclas tienen un valor óptimo para concretos en pisos industriales y/o losas.

8.1.1. Tendencia en el IPC

Los resultados muestran que la relación agua/cemento guarda una relación indirecta con el Índice de Potencial de Contracción (IPC). Se observa que las relaciones a/c intermedias (entre 0.45 y 0.55) benefician el desempeño del concreto frente a la contracción, reflejado en los valores más altos del IPC.

Por el contrario, se observó que las relaciones a/c elevadas presentan una mayor tendencia a presentar mayores porcentajes de porosidad, reduciendo el IPC y favoreciendo a la contracción por secado. Adicionalmente, relaciones a/c bajas también reducen el IPC, este proceso se podría asociar mayormente a la contracción autógena, asociado a mezclas con alta demanda de agua por hidratación y baja trabajabilidad. Teniendo comportamientos que coinciden con lo reportado en la literatura, donde se sugiere que existe un intervalo óptimo de diseño para minimizar el fenómeno de contracción en mezclas de concreto.

Gráfico No. 2. Comportamiento del IPC promedio con respecto a la relación a/c



Fuente: Elaboración propia

8.2. Tamaño Máximo Nominal de agregado y porcentaje de porosidad

El análisis de los informes petrográficos permitió determinar que dentro de los 182 especímenes de concreto revisados, únicamente 25 muestras (13.74%) emplearon un tamaño máximo nominal recomendado por el ACI 302 para pisos y losas (1 ½" o 38.1 mm). Aunado a ello, dentro de este subconjunto, solo un espécimen cumplió simultáneamente con el porcentaje de porosidad considerado aceptable para garantizar un desempeño adecuado frente a la contracción.

Tabla No.7. Distribución de muestras según TMN, cumplimiento de porosidad y el IPC promedio

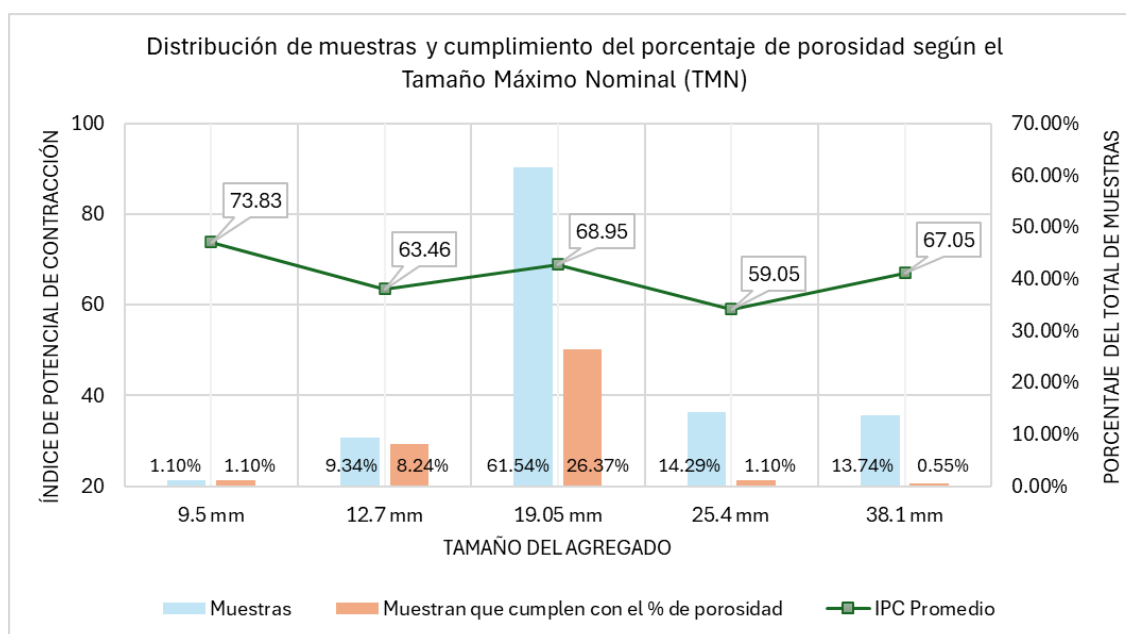
TMN	No. Muestras	% Respecto al total de muestras	No. Muestras que cumplen con él % de porosidad	% Respecto al total de muestras	IPC Mínimo	IPC Máximo	IPC Promedio
9.5 mm	2	1.10%	2	1.10%	73.83	73.83	73.83
12.7 mm	17	9.34%	15	8.24%	45.65	72.24	63.46
19.05 mm	112	61.54%	48	26.37%	39.09	86.68	68.95
25.4 mm	26	14.29%	2	1.10%	41.79	82.45	59.05
38.1 mm	25	13.74%	1	0.55%	51.33	98	67.05
Total	182	100%	68	37%			

Fuente: Elaboración propia

8.2.1. Tendencias interpretadas

En cuanto al cumplimiento del porcentaje de porosidad, se aprecia que, a medida que aumenta el TMN, el número de especímenes que cumplen con el requisito de porosidad disminuye. Esto sugiere que los concretos elaborados con agregados de mayor tamaño presentan mayores dificultades para ajustarse a los límites de porosidad establecidos. Mientras que los concretos elaborados con agregados de menor tamaño tienen un mejor control sobre el cumplimiento de la porosidad, pero esto no garantiza una mejora en el IPC.

Gráfico No. 3. Distribución de muestras y cumplimiento del porcentaje de porosidad según el Tamaño Máximo Nominal (TMN)



Fuente: Elaboración propia

A diferencia de lo que establece la recomendación general del ACI 302 – donde un mayor TMN del agregado suele asociarse con una menor susceptibilidad a la contracción – los resultados obtenidos no reflejan esta tendencia en el IPC. En la gráfica se aprecia las variaciones ascendentes y descendentes entre las categorías del TMN, lo que sugiere que en este conjunto de muestra, el TMN no representa un factor determinante por sí solo. Para la relación de la porosidad con el IPC, no se encontró una relación directa entre “cumplir con el límite de porosidad establecido en norma” y un menor IPC. El comportamiento del IPC

para estas variables, puede verse modificado por otras variables microestructurales y condiciones de elaboración del concreto.

8.3. Microfisuras

Se determinó que 110 especímenes (60.44%) no presentaron evidencia de microfisuramiento, o bien solo tuvieron presencia de trazas imperceptibles bajo observación microscópica. Este comportamiento se vio reflejado directamente en el Índice de Potencial de Contracción (IPC), puesto que los especímenes comprendidos en este grupo registraron el valor promedio más alto del IPC, indicando una menor susceptibilidad a la contracción, por lo tanto una estructura interna más estable y compacta, en comparación con el resto de los especímenes evaluados.

Tabla No.8. Número de muestras e IPC promedio basado en los tipos de microfisuras

Tipo de microfisuras	Nomenclatura	No. Muestras	IPC Promedio
Ninguna / trazas imperceptibles	NTI	110	71.57
Trazas detectables puntuales	TDP	47	61.84
Microfisuras moderadas	MM	15	59.97
Microfisuras generalizadas / conectadas	MGC	8	65.14
Microfisuras extensas severas	MES	2	53.74

Fuente: Elaboración propia

8.3.1. Tendencias interpretadas

Los especímenes sin microfisuras presentan el mayor IPC promedio, indicando una baja contracción potencial, así como una mejor integridad estructural del concreto.

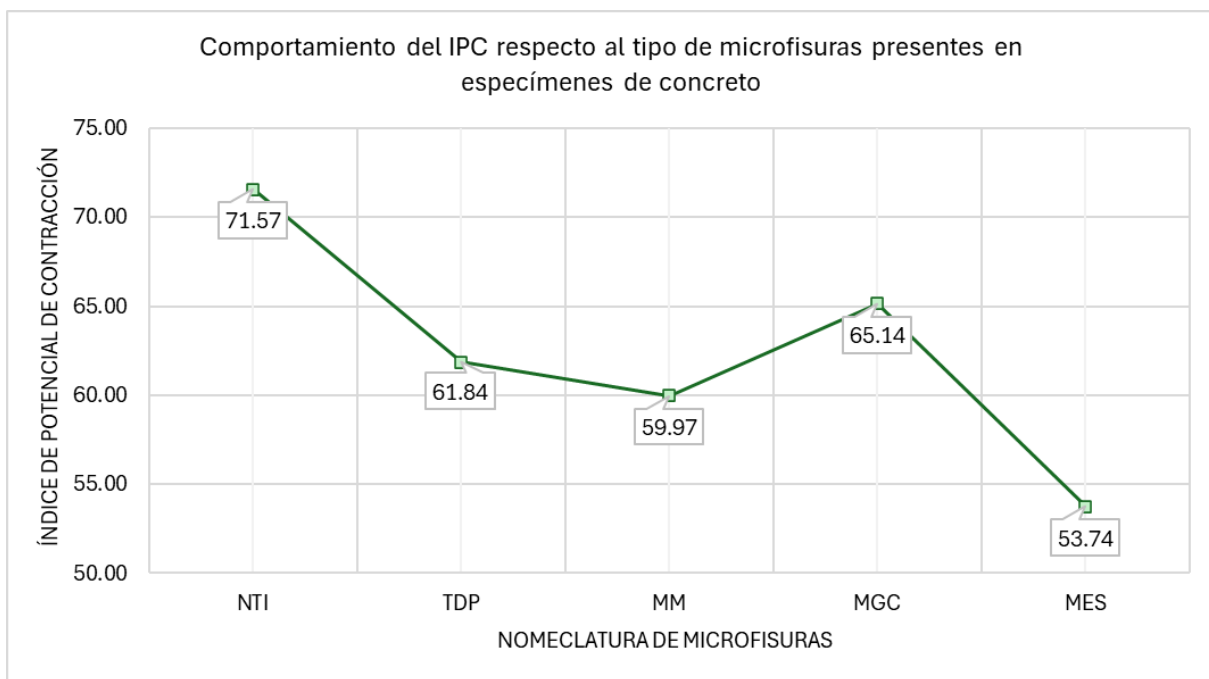
Las trazas detectables y las fisuras moderadas se encuentran en valores muy cercanos, teniendo una disminución progresiva, reflejando el inicio de un proceso de deterioro microestructural.

Las microfisuras generalizadas rompieron de manera pequeña la tendencia decreciente que estaba siguiendo el IPC, pero en este conjunto se puede observar que las variables de relación a/c, tamaño máximo nominal de agregado y porcentaje de porosidad se encuentran dentro de rangos adecuados y consistentes con mezclas de comportamiento estable. Sin embargo, los valores de IPC relativamente bajos indican que los factores con mayor

incidencia en la disminución de su desempeño fueron el microfisuramiento generalizado, las condiciones de curado y, en menor medida, la presencia de arcillas o partículas deleznables. Estos resultados apuntan a que, aun cuando el diseño de mezcla cumple con los parámetros establecidos en normativa, la deficiencia en procesos de curado se ve traducida en presencia de discontinuidades microestructurales, aumentando el potencial de contracción, evidenciando la importancia del control de estas variables durante la etapa de producción y postcurado.

Finalmente, las microfisuras severas exhiben el menor IPC promedio, a pesar de que la muestra se ve reducida, se puede seguir apreciando esta tendencia decreciente, justificando una alta posibilidad de sufrir problemas por contracción y pérdida significativa de cohesión interna.

Gráfico No. 4. Comportamiento del IPC respecto al tipo de microfisuramiento



Fuente: Elaboración propia

8.4. Condición de curado

Se identificó que 125 especímenes (68.68%) registraron un curado generalmente adecuado, aunque no completamente documentado. Esta clasificación indica que, si bien las características observadas sugieren que el proceso de curado fue apropiado, la ausencia de

un registro detallado por parte del solicitante de la prueba impide otorgar una calificación más precisa dentro del Índice de Potencial de Contracción (IPC). Dicha falta de documentación introduce un grado de incertidumbre en la evaluación, siendo que no es posible verificar con certeza las condiciones reales bajo las cuales se llevó a cabo el curado

Tabla No.9. Número de muestras e IPC promedio, con relación a la condición de curado.

Condición de curado	No. Muestras	IPC Promedio
Curado conforme a especificación	21	73.70
Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	125	68.51
Curado inadecuado	15	62.25
Curado insuficiente/Curado excesivo	21	60.13
Total de muestras	182	

Fuente: Elaboración propia

8.4.1. Tendencias interpretadas

Se observa una tendencia clara entre la calidad del curado y el comportamiento del IPC. Los especímenes que reportaron un curado conforme a especificación presentaron un valor promedio mayor (73.70), lo que indica una menor predisposición a la contracción y con ello un mejor desempeño microestructural.

Por otro lado, a medida que las condiciones de curado disminuyen, tornándose inadecuadas o insuficientes, el IPC disminuye significativamente (62.25 a 60.13), haciendo evidente un incremento en el potencial de contracción, y por ende, una mayor vulnerabilidad a la fisuración en el concreto.

8.5. Arcillas adheridas / partículas deleznales

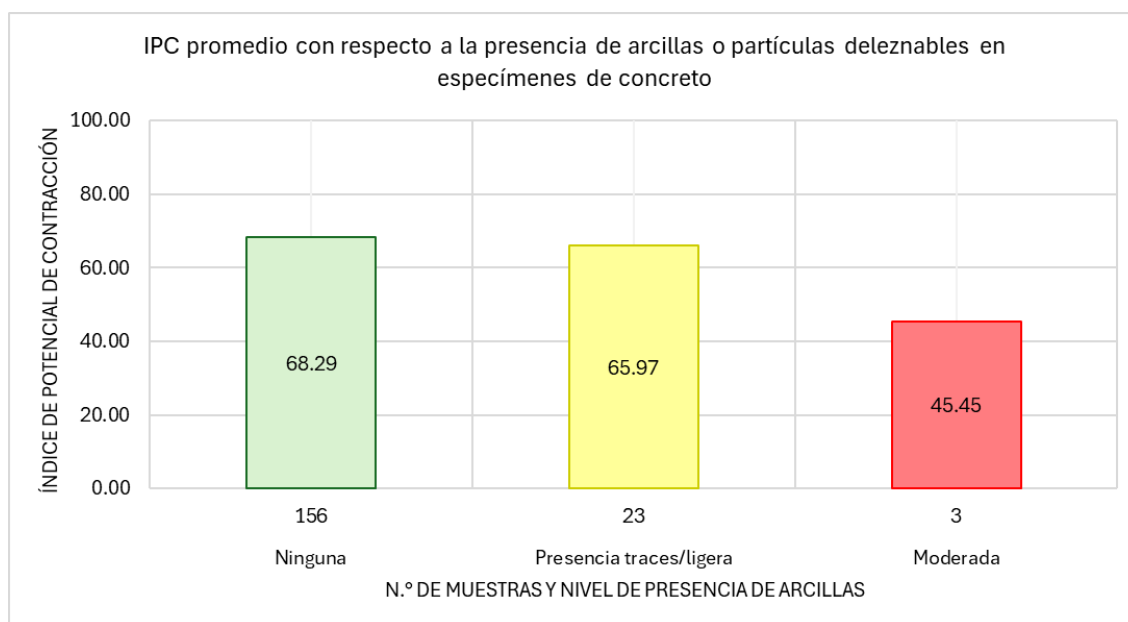
Para este último apartado, los análisis petrográficos permitieron observar que 156 especímenes (85.7%) no presentaron indicios de alguna clase de contaminante. Registrando un Índice de Potencial de Contracción (IPC) promedio de 68.29, lo cual sugiere un comportamiento relativamente estable con respecto al potencial de contracción. Por otro lado, 23 especímenes (12.6%) mostraron presencia de arcillas en trazas o en cantidades ligeras, con un IPC promedio de 65.97, lo que representa una disminución del desempeño frente de los concretos libres de impurezas. Finalmente, 3 especímenes (1.6%) presentaron

una presencia moderada de partículas deleznales, alcanzando el IPC promedio más bajo (45.45) reflejando una tendencia clara entre el incremento del contenido de arcillas y el aumento del potencial de contracción.

8.5.1. Tendencias interpretadas

A medida que aumenta la presencia de arcillas y partículas deleznales en los agregados, el Índice de Potencial de Contracción (IPC) disminuye de forma progresiva, lo que indica una mayor susceptibilidad a problemas de contracción y una menor estabilidad microestructural del concreto. En contraste, los valores más altos de IPC se encuentran en los especímenes libres de contaminantes, demostrando la relación inversa entre la pureza de los agregados y la susceptibilidad del material a la contracción.

Gráfico No. 5. IPC promedio con respecto a la presencia de arcillas o partículas deleznales en especímenes de concreto



Fuente: Elaboración propia

9. Resultados y discusión

El análisis de la relación agua/cemento mostró que los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo recomendado por las normas de diseño de mezclas, lo cual contribuye positivamente a reducir el potencial de contracción sin comprometer la trabajabilidad ni la durabilidad del concreto. No obstante, esta variable por sí sola no determina el comportamiento final del material, ya que su efecto puede verse modificado por factores adicionales como la condición de curado, la presencia de microfisuración o la calidad de los agregados. En consecuencia, aunque la relación agua/cemento constituye un parámetro fundamental en el diseño de mezclas, en el análisis petrográfico debe evaluarse de forma conjunta con el resto de las variables que integran el Índice de Potencial de Contracción (IPC) para lograr una evaluación más precisa del desempeño del concreto frente a la contracción.

En cuanto al tamaño máximo nominal (TMN) de los agregados, los resultados no indican que exista un tamaño específico incorrecto, sino que, a medida que el tamaño de las partículas disminuye, su superficie específica aumenta, lo que demanda una mayor cantidad de pasta para lograr un recubrimiento adecuado. Este incremento en el contenido de pasta implica un mayor consumo de cemento y agua, lo que puede favorecer la exudación y elevar la temperatura de hidratación. El análisis en conjunto con el porcentaje de porosidad permitió observar que los agregados con TMN intermedio (25.4 mm) tienden a presentar valores menores de IPC, mientras que el cumplimiento de los límites de porosidad disminuye conforme aumenta el tamaño del agregado. Sin embargo, no se identificó una relación directa entre la porosidad y los valores elevados de IPC, lo que sugiere que la contracción no depende exclusivamente del TMN ni del contenido de poros, sino de su interacción con otros factores microestructurales.

Respecto al microfisuramiento, se observó que el incremento en su severidad está directamente asociado con una disminución del IPC, reflejando un mayor potencial de contracción en el concreto. Este comportamiento confirma que la evaluación petrográfica del microfisuramiento constituye un indicador confiable del grado de susceptibilidad del material a la contracción, especialmente cuando se complementa con un análisis detallado de las condiciones de curado. De esta manera, es posible reflejar con mayor precisión el deterioro microestructural que compromete la capacidad del concreto para resistir deformaciones derivadas de los procesos de contracción.

Los resultados relacionados con la condición de curado evidencian que este factor es determinante para la estabilidad dimensional y la integridad microestructural del concreto. La falta de precisión en la documentación del proceso de curado limita la confiabilidad del análisis del IPC, dado que pequeñas variaciones en la temperatura, humedad o tiempo de exposición pueden producir cambios significativos en la evolución microestructural del material. Por lo tanto, aun cuando los especímenes presentan parámetros adecuados para minimizar la contracción y aparenten haber sido correctamente curados, la ausencia de un control y registro sistemático puede generar diferencias en la contracción por secado o en el desarrollo de microfisuras, afectando el valor final del IPC. La verificación y documentación rigurosa de las condiciones de curado resultan, por tanto, esenciales para garantizar la consistencia y representatividad de los resultados petrográficos.

El análisis de la presencia de arcillas o partículas deleznable permitió concluir que su existencia en los agregados incide de forma negativa en las propiedades microestructurales del concreto. Estas partículas generan superficies de adherencia deficientes entre la pasta cementante y los agregados, lo que reduce la cohesión interna y favorece la formación de microfisuras durante los procesos de secado o cambios de humedad. Los especímenes que no presentaron indicios de contaminación por arcillas registraron valores promedio de IPC más altos, lo cual coincide con las exigencias de control de calidad establecidas en las normas de diseño de mezclas, que recomiendan el uso de agregados limpios y libres de materiales deleznable para garantizar una adecuada adherencia pasta-agregado. El cumplimiento de estas condiciones minimiza el riesgo de contracción y fisuración en el concreto.

En síntesis, los resultados obtenidos a partir del análisis petrográfico de 82 informes técnicos de concreto endurecido elaborados bajo la norma ASTM C856-22 permiten concluir que el comportamiento del material frente a la contracción responde a una interacción compleja entre sus propiedades intrínsecas y las condiciones de exposición y curado. La estimación del Índice de Potencial de Contracción (IPC) demostró que ningún parámetro es determinante por sí solo; por el contrario, es la combinación de múltiples variables la que define el desempeño final del material. La tendencia observada confirma que la contracción es un fenómeno acumulativo y prevenible, siempre que se mantenga un adecuado control de calidad desde el diseño de mezcla hasta el proceso constructivo. Estos resultados respaldan

la pertinencia del desarrollo e implementación del IPC como una herramienta técnica para el diagnóstico de patologías en el concreto, al permitir jerarquizar la influencia de cada variable observable mediante el análisis petrográfico.

10. Conclusiones

En este trabajo se analizó el potencial de contracción del concreto endurecido mediante técnicas petrográficas mediante la evaluación de características micro y macro estructurales observadas en informes petrográficos elaborados conforme a la norma ASTM C856. Mediante el análisis de sus variables más representativas (relación agua – cemento [a/c], tamaño máximo nominal del agregado [TMN], porcentaje de porosidad, microfisuramiento, condición de curado y presencia de arcillas o partículas deleznales) se desarrolló un Índice de Potencial de Contracción (IPC), el cual permitió clasificar especímenes de concreto utilizados en pisos industriales según su nivel de riesgo de contracción. Las derivaciones obtenidas evidencian la utilidad del enfoque petrográfico como herramienta para la evaluación del desempeño del concreto frente a los distintos mecanismos de contracción.

Con base en los resultados obtenidos al analizar la base de datos generada para el IPC, se presentan los siguientes apartados de conclusiones y recomendaciones.

- El Índice de Potencial de Contracción (IPC) permitió establecer la relación entre las variables observables en el concreto endurecido, mediante la sistematización y análisis de informes petrográficos elaborados conforme a la norma ASTM C856. Permitiendo observar de manera cuantitativa y comparativa, la susceptibilidad del material frente a los efectos de la contracción.
- La aplicación del IPC a 83 informes petrográficos realizados, permitió observar y establecer tendencias representativas entre las variables contempladas. Evidenciando al microfisuramiento, el proceso de curado y presencia de arcillas en el concreto, como los factores que más estimulan a la presencia de la contracción en el concreto. Este comportamiento se mantuvo presente incluso en casos donde las demás características eran adecuadas (relación a/c, tamaño máximo nominal del agregado, porcentaje de porosidad) y sin embargo, el IPC de las muestras, seguía presentando valores bajos. Se concluyó que el proceso de curado representa uno de los factores más determinantes en el control de la contracción, ya que aun cuando los concretos tengan relaciones a/c

adecuadas y presenten un contenido de agua óptimo para que el cemento se hidrate, factores como la temperatura, la prematura desecación, entre otros, pueden generar una reducción del agua, a niveles donde la hidratación será incompleta.

- Asimismo, se destacó que, si bien las medidas de curado deben de considerarse en todo momento, para el caso específico de pisos industriales y losas, se debe de tener extremo cuidado con el curado cuando estos presenten un proceso de exudación, cuidando la calidad de los agregados o la adición de agua, de lo contrario la degradación o delaminación de la superficie se verá presente de manera precoz. Un buen y oportuno curado aumenta la resistencia a la abrasión en los pisos de concreto, disminuye la posibilidad del surgimiento de grietas por contracción plástica, y aunque no se puede evitar, retarda/reduce la contracción por secado haciendo que se desarrolle a una edad del elemento tal que la resistencia mecánica, especialmente la tensión, haya alcanzado un nivel suficientemente elevado para que pueda auxiliar al control del agrietamiento.
- Para el caso de las demás variables analizadas dentro del IPC se pudo observar que, de manera individual no son capaces de definir con precisión el nivel de potencial de contracción, sin embargo, analizadas de forma conjunta, se observa cómo se desarrollan múltiples tendencias entre los factores microestructurales y su influencia en el riesgo de fisuración.
- El análisis petrográfico toma un papel de mayor relevancia para diagnosticar el estado microestructural del concreto y lograr anticipar su comportamiento frente a la contracción. La identificación de texturas en la pasta, microfisuras, porosidad y presencia de contaminantes en los agregados, proporciona información clave que permite comprender las causas de deterioro y que directrices tomar en cuanto al control de calidad en obra y en laboratorio.
- La principal contribución que buscó dar esta investigación radica en generar un procedimiento capaz de lograr cuantificar en qué medida se puede catalogar el potencial de contracción del concreto. Presentando un avance metodológico que sirva como base para estudios posteriores enfocados en la validación experimental del IPC mediante la elaboración y monitoreo de mezclas controladas. Planteando al IPC como una herramienta complementaria de diagnóstico preventivo, útil para la evaluación de concretos, la comparación de materiales y la identificación de condiciones que puedan

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

inducir a la contracción excesiva. Auxiliando en el fortalecimiento de procesos de control de calidad y mejorar la durabilidad de estructuras de concreto en México, particularmente en pisos industriales.

11. Recomendaciones

- Con la finalidad de profundizar en la investigación, se recomienda validar la aplicabilidad del IPC mediante un análisis comparativo de mezclas diseñadas en laboratorio, en donde se pueda observar el comportamiento en mezclas elaboradas bajo parámetros orientados a mitigar los efectos de la contracción y mezclas convencionales, de esta manera se podrá conocer la correspondencia del IPC con el comportamiento observado en campo. Permitiendo contrastar los resultados del IPC obtenido de informes petrográficos, con el comportamiento real del concreto frente a la contracción, proporcionando evidencia empírica que pueda otorgar mayor validez a la propuesta del índice.
- A su vez, se recomienda someter a las mezclas elaboradas, al ensayo de contracción establecido en la norma NMX-C-173-ONNCCE-2010, Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Determinación de la variación en longitud de especímenes de mortero de cemento y de concreto endurecidos. Haciendo uso de la información proporcionada y poder validar experimentalmente el IPC, diferenciando los valores teóricos derivados del análisis petrográfico con las mediciones reales de contracción en laboratorio
- Al realizar un examen petrográfico, se sugiere solicitar al cliente o responsable del ensayo, información detallada acerca del proceso de curado – incluyendo el momento de inicio, la duración del periodo de curado, la temperatura al colado y la diferencia entre la temperatura del concreto y el agua utilizada –. Contar con estos datos permite evaluar y ponderar con mayor precisión este parámetro dentro del IPC en conjunto con el microfisuramiento del concreto, reduciendo la incertidumbre asociada a su estimación.

12. Referencias

1. Akhavan, B., & Maraghechi, M. (2022). Effects of wastewater reuse in concrete: Microstructure and durability implications. *Materials*, 15(7), 2523.
2. Alshammari, T. O., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2022). The effect of harsh environmental conditions on concrete plastic shrinkage cracks: case study Saudi Arabia. *Materials*, 15(23), 8622.
3. American Concrete Institute (ACI). (2015). ACI 302.1R-15: Guide for Concrete Floor and Slab Construction. ACI Committee 302.
4. ASTM International. (2019). ASTM C511-19: Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. ASTM International.
5. ASTM International. (2022). ASTM C856-22: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. ASTM International.
6. Bahaadinbeigy, M., & Hassani, A. (2023). Evaluation of drying shrinkage behavior in concrete with supplementary cementitious materials. *Materials*, 16(2), 554.
7. Basheer, P. A. M., & Khatib, J. (2020). Influence of environmental parameters on plastic shrinkage cracking in concrete: A review. *Materials*, 13(12), 2784.
8. Benboudjema, F., Carette, J., Delsaute, B., Honorio de Faria, T., Knoppik, A., Lacarrière, L., de Mendonça Lopes, A. N., Rossi, P., & Staquet, S. (2019). Mechanical properties. En E. Fairbairn, M. A. Azenha & E. Dias (Eds.), *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures* (pp. 69–114). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1_4
9. Boshoff, W. P., & Combrinck, R. (2013). Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 48, 34-39.
10. Burga Arango, W. M. (2022). Influencia de la superficie específica de los agregados; de río y de cerro, en la resistencia a la compresión de un concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en Cajamarca.
11. Castro Dorado, A. (2015). Petrografía de rocas ígneas y metamórficas. Ediciones Paraninfo.
12. Giani, R., & Bustos, J. (2021). Autogenous shrinkage in concrete: Mechanisms and mitigation. *Materials*, 14(24), 7725.

13. Global Gilson. (s.f). Understanding Concrete Plastic Shrinkage Cracking. Recuperado de <https://www.globalgilson.com/blog/plastic-shrinkage-in-concrete>.
14. Hu, X., Li, W., & Dong, Z. (2022). Role of water-to-cement ratio in autogenous shrinkage and internal curing of high-performance concrete. *Materials*, 15(19), 6764.
15. Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2019). Energy efficiency and environmental impact of sustainable Portland cement production. *Materials*, 12(6), 1032.
16. Kazemi-Kamyab, H., & Madandoust, R. (2022). Drying shrinkage in concrete: Effect of mineral additions and curing conditions. *Materials*, 15(14), 4790.
17. Khan, M., & Ali, M. (2018). Use of hybrid fibers to improve mechanical performance of concrete: A review. *Materials*, 11(12), 2468.
18. Koparan, E., & Plevris, V. (2022). Assessment of deterioration in concrete structures using petrographic examination and ultrasonic pulse velocity. *Buildings*, 12(10), 1582. <https://doi.org/10.3390/buildings12101582>
19. Leemann, A. (2025). Alkali-silica reaction—the mechanism leading to concrete deterioration. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 52. 1615-1629. 10.1139/cjce-2024-0517.
20. Lema, W. B., & Castillo, E. (2018). Relaciones agua-cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9(1), 125-140.
21. Li, W., Long, G., & Shi, C. (2021). Mechanisms and influencing factors of drying shrinkage in cementitious materials: A review. *Materials*, 14(5), 1106.
22. Li, Y., Wang, C., & Xu, Z. (2022). Influence of clay-contaminated aggregates on mechanical and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 337, 127584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127584>
23. Liu, J., Shi, C., Ma, X., Khayat, K. H., Zhang, J., & Wang, D. (2017). An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high-performance cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 146, 702-712
24. Liu, Y., Wang, Q., & Yu, X. (2020). Influence of hydration products on volume change and porosity in cement pastes. *Materials*, 13(7), 1715.
25. Maurello Porras, J. F., Mondragón Aguja, K. N., Romero Mora, J. C. (2020). Principales tipos de contracción, efectos sobre el concreto y sus métodos de mitigación.

26. Meddah, M. S., & Sato, R. (2010). Effect of Curing Methods on Autogenous Shrinkage and Self-Induced Stress of High-Performance Concrete. *ACI materials journal*, 107(1).
27. Mindeguia, J., Duthoit, B., Noumowe, A., & Pimienta, P. (2019). Influence of constituent materials on the performance of concrete: A review. *Materials*, 12(4), 572.
28. Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2021). *Concrete Technology*. Pearson Education.
29. Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2022). Plastic shrinkage and its mitigation strategies in exposed concrete structures. *Materials*, 15(8), 2904.
30. Piñarreta, I., & Alemán, M. (2022). Use of polypropylene fibers to mitigate plastic shrinkage cracking in concrete. *Materials*, 15(12), 4216.
31. Rojas Dueñas, D. K. (2017). *Caracterización de concretos asfálticos y sus agregados con la aplicación de técnicas de análisis de imagen* (Doctoral dissertation).
32. Sánchez Lera, R. M., & Oliva García, N. R. (2015). Historia del microscopio y su repercusión en la microbiología. *Humanidades Médicas*, 15(2), 355-372.
33. Sánchez, L. F., Restrepo-Baena, O. J., & Tobón, J. I. (2022). Microstructural analysis and durability of mortars with reactive aggregates using petrographic techniques. *Materials*, 15(1), 214. <https://doi.org/10.3390/ma15010214>
34. Wu, F., Yu, Q., & Liu, C. (2021). Durability of thermal insulating bio-based lightweight concrete: Understanding of heat treatment on bio-aggregates. *Construction and Building Materials*, 269, 121800. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121800>
35. Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., & Wang, H. (2017). Autogenous shrinkage of high-performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 149, 62-75.
36. Yıldız, S., Şahmaran, M., & Kurnaz, A. (2023). Influence of petrographic features of aggregates on shrinkage and mechanical properties of concrete. *Materials*, 16(3), 1048
37. Yu, R., & Shui, Z. (2021). Durability performance of concrete: The role of aggregate characteristics studied via petrography. *Applied Sciences*, 11(18), 8524.
38. Zhang, S., & Zhang, M. (2005). Application of petrography for determining the quality of concrete cured in tropical environment. *Cement and Concrete Research*, 35, 1377-1384. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.034>
39. Zhang, W., Zakaria, M., & Hama, Y. (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and building materials*, 49, 500-510.

40. Zhao, W., Lu, C., & Wang, H. (2023). Effect of curing regimes on shrinkage and microstructure of cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 77, 107648. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107648>
41. Zhu, L., Zhang, M., Zhang, Y., Yao, J., Yang, G., Guan, X., & Zhao, Y. (2023). Research progress on shrinkage properties of extruded 3D printed cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 77, 107394.

13. Anexos

Tabla recopilatoria de variables para construcción de IPC

Código	Muestra	Fecha	Relación a/c	TMN	Contenido aire	Microfisuras	Condición de curado	Arcillas adheridas / partículas deleznales	IPC
GCC-CJ-CH	1	jul-15	0.50	38.10	0.04	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
	2	nov-15	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
NM-CC-CA	3	nov-15	0.50	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
	4	nov-15	0.50	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
NM-MO-GU	5	nov-15	0.50	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	74.68
	6	dic-15	0.50	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencias trazas/ligera	80.68
CE-CO-CM	7	dic-15	0.50	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencias trazas/ligera	74.68
	8	nov-15	0.50	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
NM-MO-GU-2	9	nov-15	0.50	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	74.68
	10	oct-15	0.55	19.05	0.05	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
IN-SNG-NL	11	oct-15	0.55	19.05	0.05	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
	12	oct-15	0.55	19.05	0.05	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
	13	oct-15	0.55	19.05	0.05	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
	14	oct-15	0.55	19.05	0.05	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
SIC-LC-VR	15	ago-16	0.60	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	56.34
	16	ago-16	0.60	19.05	0.02	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	63.34
CR-TR-H	17	may-16	0.50	38.10	0.03	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Presencias trazas/ligera	63.00
	18	may-16	0.50	38.10	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado inadecuado	Ninguna	70.00
	19	may-16	0.55	38.10	0.03	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Ninguna	67.00
	20	may-16	0.55	38.10	0.03	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Ninguna	67.00
	21	may-16	0.50	38.10	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado inadecuado	Presencias trazas/ligera	66.00
	22	may-16	0.55	38.10	0.03	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Presencias trazas/ligera	63.00
GCC-CJ-CH-1	23	abr-16	0.50	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68
DCC-C-QR	24	mar-16	0.65	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencias trazas/ligera	64.01
	25	mar-16	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencias trazas/ligera	72.34
NM-C-VR	26	abr-16	0.55	19.05	0.04	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	51.68
	27	abr-16	0.55	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado inadecuado	Ninguna	62.68
	28	abr-16	0.55	19.05	0.03	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	51.68
NM-Z-J	29	jun-16	0.55	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencias trazas/ligera	72.24
CDO-SI-GU	30	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras extensas severas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	65.68
	31	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	68.68
	32	sep-16	0.50	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado inadecuado	Ninguna	82.68
	33	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	68.68
CCG-C-VR	34	abr-16	0.55	19.05	0.04	Trazas detectables puntuales	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	54.68
	35	abr-16	0.55	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	54.68
	36	abr-16	0.55	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	54.68
CIO-T-EM	37	sep-16	0.55	38.10	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
	38	may-16	0.55	38.10	0.04	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

NIT-SJR-QU	39	may-16	0.55	38.10	0.04	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
TR-NA-SN	40	jul-16	0.55	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	72.00
CDO-SI-GU	41	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	80.00
	42	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	68.68
	43	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	68.68
	44	sep-16	0.50	19.05	0.02	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	68.68
NM-MH-CM	45	sep-16	0.60	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	60.34
CR-ME-BC	46	mar-16	0.55	19.05	0.03	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Ninguna	53.68
	47	mar-16	0.55	19.05	0.03	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	51.68
	48	mar-16	0.55	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado inadecuado	Ninguna	76.68
NM-MP-VR	49	nov-17	0.50	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
NM-LR-EM	50	dic-17	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
GS-AG-AG	51	oct-17	0.45	25.40	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.95
CJV-T-EM	52	may-17	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
NM-C-QR	53	ene-17	0.60	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	50.34
	54	ene-17	0.60	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	70.34
NM-T-BC	55	jun-17	0.55	38.10	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.00
CMX-SPG-NL	56	oct-18	0.55	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	60.68
	57	oct-18	0.55	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	74.68
NM-C-QR	58	ene-18	0.55	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
	59	ene-18	0.55	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
CP-TZ-J	60	dic-18	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
CMM-CI-EM	61	jun-18	0.50	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.68
L-CI-EM	62	may-18	0.50	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
	63	may-18	0.50	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
AF-CM	64	abr-18	0.50	25.40	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	59.12
NM-NM-NM	65	mar-18	0.50	25.40	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	59.12
	66	abr-18	0.50	25.40	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	59.12
GCC-CH-CH2	67	may-18	0.55	25.40	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	59.12
	68	may-18	0.55	25.40	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	69.12
	69	may-18	0.55	25.40	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	59.12
IIP-ZA-MO	70	dic-18	0.65	25.40	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	54.45
	71	dic-18	0.70	25.40	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	46.12
CDI-MI-VR	72	nov-18	0.45	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	70.51
	73	nov-18	0.45	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	70.51
CMX-PV-J	74	mar-18	0.65	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	48.01
	75	mar-18	0.70	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	39.68
CMX-C-QR	76	feb-18	0.55	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
	77	feb-18	0.55	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
GCC-CM-CH	78	feb-18	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	66.68
	79	feb-18	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	66.68
NM-MA-SLP	80	sep-19	0.55	19.05	0.02	Microfisuras moderadas	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	75.68
GCC-CH-CH3	81	ago-19	0.50	19.05	0.02	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado inadecuado	Presencia trazas/ligera	66.68
NM-PZ-PU	82	dic-19	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68
	83	dic-19	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

CC-PA-HI	84	abr-20	0.60	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado conforme a especificación	Ninguna	52.34
	85	abr-20	0.60	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado conforme a especificación	Ninguna	52.34
DIDI-V-SLP	86	ago-20	0.60	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	68.34
GMAJ-FR-ZA	87	abr-20	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Presencia trazas/ligera	74.34
	88	abr-20	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Presencia trazas/ligera	74.34
CM-GU-J	89	may-20	0.45	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	75.83
SI-MC-VR	90	mar-20	0.60	38.10	0.03	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	56.67
CM-TL-EM	91	jun-20	0.40	12.70	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	45.65
	92	jun-20	0.40	12.70	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	45.65
CMX-AO-CM	93	feb-20	0.50	19.05	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
	94	feb-20	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
	95	feb-20	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
FAS-HE-SO	96	jul-20	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68
	97	jul-20	0.55	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado conforme a especificación	Ninguna	80.68
	98	jul-20	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68
	99	jul-20	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68
	100	jul-20	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	86.68
IEAC-CU-CM	101	dic-20	0.55	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.68
	102	dic-20	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	103	dic-20	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
ARC-GAM-CM	104	mar-21	0.55	38.10	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.00
BA-OL-VR	105	abr-21	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
CMX-CS-H	106	mar-21	0.55	19.05	0.03	Microfisuras generalizadas / conectadas	Curado inadecuado	Ninguna	50.68
CMX-SMA-GU	107	may-21	0.50	38.10	0.04	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	74.00
	108	may-21	0.55	38.10	0.04	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
CMI-CE-GU	109	sep-21	0.50	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.68
	110	sep-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	111	sep-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	112	sep-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	113	sep-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	114	sep-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	115	sep-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
CP2-AG-AG	116	jun-21	0.55	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
	117	jun-21	0.55	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
	118	jun-21	0.55	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	78.00
EU-TU-EM	119	ene-21	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
	120	ene-21	0.50	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
GCC-CH-CH4	121	mar-21	0.55	38.10	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	74.00
HOL-IZ-CM	122	may-21	0.60	19.05	0.02	Microfisuras moderadas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	63.34
	123	may-21	0.60	19.05	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	70.34
HOL-HE-SO	124	jun-21	0.55	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
	125	jun-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	126	jun-21	0.55	19.05	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	64.68
DOZ-CE-GU	127	ago-21	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	128	may-21	0.45	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.07
	129	may-21	0.45	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.07

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

CMI-IZ-CM	130	may-21	0.40	19.05	0.03	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Ninguna	39.09
	131	may-21	0.45	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.07
	132	may-21	0.45	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.07
	133	may-21	0.45	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	72.07
	134	may-21	0.40	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	61.65
	135	may-21	0.45	12.70	0.02	Microfisuras moderadas	Curado inadecuado	Ninguna	61.07
	136	may-21	0.45	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	70.51
	137	may-21	0.40	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	60.09
	138	may-21	0.40	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	61.65
	139	may-21	0.40	12.70	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	55.65
	140	may-21	0.45	9.50	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	73.83
	141	may-21	0.40	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	54.54
	142	may-21	0.45	9.50	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	73.83
	143	may-21	0.45	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	68.07
	144	may-21	0.40	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	61.65
	145	may-21	0.40	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	61.65
CM-TO-EM	146	ago-21	0.60	19.05	0.04	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	50.34
CCP-CE-GU	147	abr-21	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
	148	abr-21	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
	149	abr-21	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
	150	abr-21	0.60	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	67.90
IEAC-CU-CM1	151	jun-21	0.60	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	66.34
	152	jun-21	0.60	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	66.34
	153	jun-21	0.60	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	66.34
CMX-CE-GU	154	jul-21	0.60	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	60.79
CMX-AG-AG	155	abr-22	0.60	25.40	0.05	Microfisuras extensas severas	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	41.79
	156	abr-22	0.65	25.40	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado inadecuado	Ninguna	44.45
LEI-CJ-QH	157	mar-22	0.55	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	76.68
HOL-C-QR	158	jun-22	0.60	19.05	0.04	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	46.34
CRJS-STT-EM	159	nov-22	0.55	25.40	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado insuficiente/Curado excesivo	Ninguna	59.12
	160	nov-22	0.55	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	69.12
	161	nov-22	0.55	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	69.12
	162	nov-22	0.55	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	69.12
	163	nov-22	0.55	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	69.12
	164	nov-22	0.55	25.40	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	63.12
	165	nov-22	0.55	25.40	0.03	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	63.12
	166	nov-22	0.55	25.40	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	69.12
MF-LU-VR	167	ago-22	0.65	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	64.01
	168	ago-22	0.65	12.70	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia trazas/ligera	55.57
APE-AZ-CM	169	abr-22	0.65	25.40	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Moderada	45.45
	170	abr-22	0.65	25.40	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Moderada	45.45
	171	abr-22	0.65	25.40	0.03	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Moderada	45.45
NM-EN-BJ	172	feb-23	0.40	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado conforme a especificación	Ninguna	72.09
COS-LV-EM	173	mar-23	0.55	25.40	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	82.45
	174	ene-23	0.50	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68

Determinación del potencial de ocurrencia de la contracción del concreto en pisos industriales, a partir de técnicas petrográficas

ACL-ME-YU	175	ene-23	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
	176	ene-23	0.60	19.05	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	66.34
	177	ene-23	0.60	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	76.34
NM-CJ-CH	178	ene-23	0.55	19.05	0.02	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	84.68
CMX-AG-AG1	179	may-23	0.65	38.10	0.02	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Presencia traces/ligera	51.33
	180	may-23	0.65	25.40	0.01	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	59.79
GCC-CH-CH5	181	jun-23	0.50	19.05	0.05	Trazas detectables puntuales	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	58.68
PRC-VR-VR	182	sep-23	0.55	38.10	0.01	Ninguna / trazas imperceptibles	Curado generalmente adecuado pero no documentado completamente	Ninguna	98.00