

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL**

**EVALUACIÓN PATOLÓGICA DEL EDIFICIO DE LA POLICÍA
NACIONAL UBICADO EN LAS CALLES JORGE DROM Y UNIÓN
NACIONAL DE PERIODISTAS, EN LA CIUDAD DE QUITO**

NOMBRE: RAQUEL BEDOYA

DIRECTOR: ING. RODDY CABEZAS

QUITO, 2010

Dedicatoria

A mi hermano Rodrigo.

Agradecimientos

Mi agradecimiento a los Ingenieros Roddy Cabezas, Lauro Lara y Juan Carlos Montero por su incondicional apoyo durante mi carrera así como durante el desempeño de esta tesis de grado.

A mi tío Andres y Dianita Cavero por su preocupación y generosidad que hicieron que la finalización de esta tesis de grado haya sido posible.

Resumen

Se realizó un estudio patológico de los materiales del edificio de la policía nacional, ubicado en las calles Jorge Drom y Unión Nacional de Periodistas, en la ciudad de Quito. Este edificio fue escogido debido a que se encuentra abandonada por más de veinte años, por lo que se vio la necesidad de hacer una evaluación del estado de los materiales, hormigón y acero.

La Patología es la parte de la ingeniería que estudia los procesos y características de los defectos de las obras civiles, sus causas, orígenes, consecuencias y sus remedios

En un estudio patológico se debe considerar que existen factores externos que provocan el deterioro de los materiales que conforman la estructura, por la acción del medio ambiente (en mayor magnitud el contaminado), ataques químicos, abrasión, y otros. Otras posibilidades de un deterioro temprano de los materiales son: el incumplimiento de las especificaciones técnicas por parte del constructor, y la falta de mantenimiento de la estructura durante su vida útil.

La durabilidad de la estructura está determinada por el diseño, calidad de los materiales, práctica constructiva, control de calidad durante el proceso de construcción, y protección durante la vida útil.

En el estudio se realizaron ensayos en campo y ensayos en laboratorio. Los ensayos en campo realizados fueron: pachometro, carbonatación, velocidad de corrosión, resistividad del hormigón, esclerométrico, prueba de velocidad de ultrasónico, mientras que en laboratorio se realizaron los ensayos de tracción de varillas, y compresión de núcleos.

El hormigón de los diferentes elementos de la estructura está en buenas condiciones, tiene profundidades de carbonatación de hasta 4 mm lo que significa que el hormigón está cumpliendo su función pasivadora. Se recomienda retirar la capa la capa de macillado en los elementos que lo posean y colocar una nueva capa.

La resistencia del hormigón a la compresión de los núcleos extraídos es de 348 kg/cm² siendo este hormigón de resistencia mediana. Con las pruebas realizadas in situ para encontrar una resistencia referencial del hormigón se obtuvieron valores

menores que los obtenidos en el ensayo de compresión de núcleos; así en el ensayo esclerométrico se obtuvo un promedio de 240 kg/cm² y de 254kg/cm² en el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico, con factores de correlación de 1.48 y 1.37 respectivamente.

Cabe recalcar que los ensayos realizados in situ para determinar la resistencia del hormigón son recomendados únicamente para comprobar la uniformidad de resistencias entre los elementos ensayos, debido a que este tipo de ensayos como el esclerométrico y el de velocidad de pulso ultrasónico tienen un error mínimo del 10% que depende de varios factores, es por eso la prueba de compresión de núcleos deberá ser reemplazada por ninguno de estos ensayos.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico nos proporciona la calidad del hormigón mediante la velocidad de pulso, es así que este hormigón se considera de buena calidad ya que se obtuvo un promedio de las velocidades de onda de 3487 m/s, según los estudios realizados por Leslie y Cheesman.

En los ensayos realizados en el acero se pudo determinar que únicamente un elemento de la estructura, la losa de cubierta, presenta un nivel medio de corrosión obteniéndose valores de velocidad de corrosión de 0.68 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Las pruebas realizadas en los otros elementos de la estructura nos indican que el riesgo de corrosión en la estructura es muy bajo, por lo que únicamente se deberían tomar precauciones en la losa de cubierta de la estructura colocando algún tipo de protección que no cargue en forma significativa a la estructura. Estos ensayos son complementados y respaldados con los resultados del ensayo de resistividad del hormigón en los que se obtuvieron valores desde 42 k Ωcm hasta 138 k Ωcm .

El 75% de varillas ensayadas cumplen estas cumplen con las especificaciones de la Norma INEN 2167 para esfuerzos a la fluencia, teniendo con valores de resistencias dentro de los límites de 412 MPa y 539 MPa; mientras que todas las varillas cumplen con las especificaciones para resistencia a la tracción teniendo resistencias de 750 MPa en promedio de resistencias mayores a 549 MPa.

Los datos obtenidos en este trabajo tendrán utilidad para realizar un análisis estructural de la estructura en su estado actual.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Resumen..... | IV |
| Capitulo 1 | 1 |
| GENERALIDADES | 1 |
| 1.1 Introducción | 1 |
| 1.2 Objetivos y alcance | 2 |
| 1.3 Antecedentes | 2 |
| Capitulo 2 | 5 |
| PATOLOGÍA DEL HORMIGÓN | 5 |
| 2.1 Definición y alcance de la Patología..... | 5 |
| 2.1.1 Ley de Sitter | 7 |
| 2.1.2 Ley de Sitter | 7 |
| 2.1.3 Importancia de la Patología | 8 |
| 2.2 Rehabilitación y Refuerzo | 10 |
| 2.2.1 Terapia | 11 |
| 2.3 Vida útil | 11 |
| 2.3.1 Vida útil del proyecto | 11 |
| 2.3.2 Vida útil de servicio | 12 |
| 2.3.3 Vida útil última o total | 12 |
| 2.3.4 Vida útil residual | 13 |
| 2.4 Agresividad del medio ambiente | 15 |
| 2.4.1 Clasificación de la agresividad del medio ambiente | 15 |
| 2.4.1.1 Ambiente ligero y débil | 16 |
| 2.4.1.2 Ambiente moderado | 16 |
| 2.4.1.2 Ambiente severo | 16 |
| 2.4.1.3 Ambiente muy severo | 17 |
| 2.5 Factores que afectan el deterioro de las estructuras de hormigón | 18 |
| 2.5.1 Humedad..... | 18 |

| | |
|--|----|
| 2.5.2 Temperatura | 19 |
| 2.5.3 Presión | 19 |
| Capítulo 3 | 20 |
| DEFECTOS Y/O DAÑOS | 20 |
| 3.1 Clasificación de los defectos | 20 |
| 3.1.1 Congénitos | 20 |
| 3.1.2 Adquiridos | 21 |
| 3.1.3 Accidentales | 21 |
| 3.2 Descripción y orígenes de los daños | 22 |
| 3.2.1 Cambios de color..... | 22 |
| 3.2.2 Eflorescencia | 22 |
| 3.2.3 Disgregaciones | 23 |
| 3.2.4 Desagregaciones | 23 |
| CAPITULO 4 | 25 |
| FISURAS | 25 |
| 4.1 Introducción | 25 |
| 4.2 Tipos de fisuras | 26 |
| 4.2.1 Fisuras antes del endurecimiento | 26 |
| 4.2.1.1 Fisuras debido a la retracción plástica | 26 |
| 4.2.1.2 Fisuras debido asentamiento plástico | 28 |
| 4.2.1.3 Fisuras por heladas tempranas | 30 |
| 4.2.1.4 Fisuras debido al movimiento del encofrado | 30 |
| 4.2.1.5 Fisuras debido al movimiento de la base..... | 31 |
| 4.2.2 Fisuras después del endurecimiento | 31 |
| 4.2.2.1 Fisuras estructurales | 31 |
| 4.2.2.1.1 Fisuras por tracción..... | 32 |
| 4.2.2.1.2 Fisuras por flexión | 32 |
| 4.2.2.1.3 Fisuras por cortante | 33 |
| 4.2.2.1.4 Fisuras por torsión | 34 |
| 4.2.2.1.5 Fisuras por compresión simple | 34 |

| | |
|--|----|
| 4.2.2.1.6 Fisuras por punzonamiento | 35 |
| 4.2.3 Fisuras por cambio de humedad..... | 35 |
| 4.2.3.1 Fisuras por contracción por secado | 36 |
| 4.2.3.2 Fisuras capilares o cuarteadas | 37 |
| 4.2.4 Fisuras por cambio temperatura | 38 |
| 4.2.4.1 Fisuras por contracción térmica inicial | 38 |
| 4.2.4.2 Fisuras por dilatación y contracción de temperatura | 39 |
| 4.2.5 Fisuras por corrosión | 40 |
| 4.2.6 Fisuras por adherencia-anclaje | 41 |
| 4.2.7 Fisuras Alkali – Árido | 41 |
| 4.3 Reparación de fisuras..... | 44 |
| 4.3.1 Tipos de reparaciones de fisuras | 44 |
| 4.3.1.1 Cicatrización | 44 |
| 4.3.1.2 Ocratización | 45 |
| 4.3.1.3 Grapado | 45 |
| 4.3.1.4 Inyecciones..... | 46 |
| 4.3.1.4.1 Proceso de inyección de fisuras | 47 |
| 4.3.1.5 Inyecciones con pasta de cemento y morteros | 48 |
| Capítulo 5 | 50 |
| ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN..... | 50 |
| 5.1 Introducción | 50 |
| 5.1.1 Clasificación de las acciones sobre la estructura de hormigón: | 50 |
| 5.1.1.1 Acciones Externas | 50 |
| 5.1.1.2 Acciones Internas..... | 51 |
| 5.1.1.3 Acciones accidentales o extraordinarias..... | 51 |
| 5.2 Ciclos de congelamiento y deshielo | 52 |
| 5.2.1 Reparación de hormigones deteriorados por ciclos de congelamiento y deshielo | 54 |
| 5.3 Ataque por fuego | 54 |
| 5.3.1 Reparación de estructuras dañadas por fuego..... | 58 |
| 5.3.1.1 Materiales y aplicación de los mismos | 59 |

| | |
|---|----|
| 5.3.1.1.1 Hormigón tradicional | 59 |
| 5.3.1.1.2 Mortero de cemento Portland..... | 59 |
| 5.3.1.1.3 Hormigón o mortero proyectado..... | 60 |
| 5.3.1.1.4 Hormigón modificado con polímeros | 60 |
| 5.3.1.1.5 Hormigones y morteros de resinas sintéticas..... | 60 |
| 5.3.1.1.6 Yeso..... | 61 |
| Capítulo 6..... | 62 |
| ACCIONES QUÍMICAS | 62 |
| 6.1 Ataque de ácidos..... | 62 |
| 6.2 Ataque de sulfatos | 64 |
| 6.2.1 Agua del mar | 66 |
| 6.3 Reacción álcali agregado..... | 67 |
| 6.3.1 Tipos de reacciones álcali-agregado | 70 |
| 6.3.1.1 Reacción álcali – sílice | 70 |
| 6.3.1.2 Reacción álcali – silicato..... | 71 |
| 6.3.1.3 Reacción álcali – carbonato | 71 |
| 6.4 Lixiviación por aguas blandas o puras..... | 72 |
| 6.5 Carbonatación..... | 73 |
| Capítulo 7..... | 76 |
| CORROSIÓN..... | 76 |
| 7.1 Introducción | 76 |
| 7.2 Factores que inciden en la corrosión del acero de refuerzo..... | 78 |
| 7.2.1 Pérdida de alcalinidad en el hormigón | 78 |
| 7.2.2 Ataque por cloruros | 78 |
| 7.2.3 Permeabilidad del recubrimiento | 80 |
| 7.2.4 Espesor del recubrimiento | 81 |
| 7.2.5 Despasivación en el área de fisuras | 81 |
| 7.3 Tipos de corrosión electroquímica..... | 81 |
| 7.3.1 Corrosión Uniforme o Generalizada | 82 |
| 7.3.2 Corrosión localizada..... | 82 |

| | |
|--|-----|
| 7.3.3 Corrosión por picaduras..... | 83 |
| 7.3.4 Corrosión bajo esfuerzo | 83 |
| 7.3.5 Fragilización por hidrógeno | 83 |
| 7.3.6 Corrosión galvánica o bimetálica | 84 |
| 7.4 Daños causados por corrosión en la armadura | 84 |
| 7.5 Protección contra la corrosión de las armaduras | 86 |
| 7.5.1 Protección natural..... | 86 |
| 7.5.2 Protecciones complementarias | 86 |
| 7.5.3 Protección catódica..... | 86 |
| 7.5.4 Galvanización | 87 |
| 7.5.5 Recubrimientos de armaduras..... | 88 |
| 7.5.6 Inhibidores de corrosión | 88 |
| 7.5.7 Protecciones superficiales..... | 89 |
| Capítulo 8..... | 90 |
| ACCIONES MECÁNICAS | 90 |
| 8.1 Erosión | 90 |
| 8.1.1 Erosión por materiales abrasivos..... | 90 |
| 8.1.2 Erosión por cavitación..... | 91 |
| 8.1.3 Reparación de hormigones dañados por erosión..... | 91 |
| 8.2 Abrasión | 92 |
| 8.3 Fluencia | 93 |
| 8.4 Asentamientos | 94 |
| 8.5 Pretensado | 96 |
| 8.6 Fallas constructivas típicas..... | 97 |
| 8.6.1 Deficiencias en el detalle y/o posicionado de la armadura | 97 |
| 8.6.2 Deficiencias en la construcción o remoción de los encofrados | 98 |
| Capítulo 9..... | 100 |
| ENSAYOS EN EL ACERO DE REFUERZO | 100 |
| 9.1 Introducción..... | 100 |
| 9.2 Pachómetro..... | 100 |

| | | |
|--|---|-----|
| 9.2.1 | Equipo | 101 |
| 9.2.2 | Procedimiento..... | 101 |
| 9.3 | Análisis químico de acero..... | 102 |
| 9.4 | Geometría del corrugado..... | 102 |
| 9.5 | Toma de muestras de armaduras – Norma ASRM A 370..... | 102 |
| 9.6 | Calidad del acero mediante ensayos mecánicos | 104 |
| 9.6.1 | Equipo | 106 |
| 9.6.2 | Procedimiento..... | 106 |
| 9.6.3 | Interpretación de datos | 108 |
| 9.7 | Velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad del concreto | 110 |
| 9.7.1 | Equipo | 112 |
| 9.7.2 | Procedimiento..... | 114 |
| 9.7.3 | Interpretación de datos | 115 |
| Capítulo 10 | | 116 |
| ENSAYOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN..... | | 116 |
| 10.1 | Introducción | 116 |
| 10.2 | Carbonatación..... | 117 |
| 10.3 | Ensayo esclerométrico – Norma ASTM C 805..... | 118 |
| 10.3.1 | Equipo | 119 |
| 10.3.2 | Procedimiento..... | 120 |
| 10.3.3 | Interpretación de datos | 121 |
| 10.4 | Prueba de velocidad de pulso ultrasónico – Norma ASTM C 579-02 | 123 |
| 10.4.1 | Equipo | 123 |
| 10.4.2 | Procedimiento..... | 124 |
| 10.4.3 | Interpretación de datos | 126 |
| 10.5 | Extracción , compresión de núcleos y determinación del módulo de Elasticidad – Norma ASTM 39 y ASTM C42..... | 129 |
| 10.5.1 | Aspectos a considerar para la realización del ensayo:..... | 130 |
| 10.5.2 | Tipos de falla | 132 |
| 10.5.3 | Equipos..... | 133 |

| | |
|--|-----|
| 10.5.4 Procedimiento..... | 135 |
| 10.5.5 Interpretación de datos | 137 |
| 10.6 Compresión de núcleos con Strain Gauges para la determinación del módulo de elasticidad del hormigón y el módulo de Poisson | 138 |
| 10.6.1 Equipo | 138 |
| 10.6.2 Procedimiento..... | 139 |
| 10.6.3 Interpretación de datos | 140 |
| Capítulo 11 | 141 |
| CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL ACERO DE REFUERZO | 141 |
| 11.1 Ensayo de tracción de varillas..... | 141 |
| Capítulo 12..... | 147 |
| CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y EL MÓDULO DEL HORMIGÓN | 147 |
| 12.1 Carbonatación..... | 147 |
| 12.2 Resistencia a la compresión de núcleos de los núcleos de hormigón | 148 |
| 12.3 Determinación del Modulo de Elasticidad del Hormigón..... | 150 |
| 12.3.1 Cuadro de resumen con resultados Modulo de Elasticidad | 160 |
| 12.4 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico | 161 |
| 12.4.1 Resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido para determinar la resistencia referencial del hormigón | 162 |
| 12.4.1 Cuadro de resumen con resultados del ensayo de..... | 164 |
| ultrasonido | 164 |
| 12.5 Resultados obtenidos en el ensayo esclerométrico para determinar la resistencia referencial del hormigón | 166 |
| 12.5.1 Cuadro de resumen con resultados del ensayo esclerometrico..... | 174 |
| 12.6 Cuadro comparativos de las resistencias del hormigón | 175 |
| 12.7 Factores de correlación entre resistencias obtenidas con los diferentes ensayos.. | 175 |
| Capítulo 13 | 177 |
| CONCLUSIONES | 177 |
| Bibliografía | 180 |

Capítulo 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

Las estructuras de hormigón deben ser diseñadas y construidas para que tengan una vida útil de por lo menos 50 años, y durante ese tiempo deberán mantener condiciones de funcionalidad y seguridad, además de conservar un buen aspecto arquitectónico.

En la actualidad, existen factores externos que provocan el deterioro de los materiales que conforman la estructura, por la acción del medio ambiente (en mayor magnitud el contaminado), ataques químicos, abrasión, y otros.

Otras posibilidades de un deterioro temprano de los materiales son: el incumplimiento de las especificaciones técnicas por parte del constructor, y la falta de mantenimiento de la estructura durante su vida útil.

La durabilidad de la estructura está determinada por el diseño, calidad de los materiales, práctica constructiva, control de calidad durante el proceso de construcción, y protección durante la vida útil.

Cuando se observan condiciones de deterioro en una estructura, tales como agrietamientos, deflexiones, filtraciones de agua, presencia de hongos; se hace necesario un estudio más minucioso y profundo, lo que se conoce como evaluación patológica; la misma que, consiste en ensayos realizados en diferentes elementos y materiales de la estructura in situ y en el laboratorio, para posteriormente realizar una valoración estructural. Así se puede definir el estado en el que se encuentran los materiales y la edificación, como han sido afectados y si fuera del caso, determinar todos los procedimientos para reforzamiento y reparación de los mismos.

Como una aplicación práctica del tema, se decidió hacer un trabajo de evaluación patológica en una estructura que pertenece a la Policía Nacional del Ecuador, ubicada en las Calles Jorge Drom y Unión Nacional de

Periodistas, en la ciudad de Quito. La misma que se encuentra abandonada por cerca de 25 años, es de hormigón armado y está conformada por cuatro pisos altos y dos subsuelos; los mismos que presentan condiciones de deterioro visibles tanto en el hormigón como en el acero de refuerzo.

1.2 Objetivos y alcance

El estudio tiene como objetivo principal, determinar las condiciones de resistencia actuales de los materiales, además su grado de deterioro a través del tiempo, debido a la exposición al medio ambiente y a la falta de mantenimiento de la estructura; para lo cual se realizaron ensayos de campo y de laboratorio.

Además se realizó una valoración patológica que permite establecer las condiciones de los materiales, con el propósito de determinar su posible uso en trabajos de rehabilitación y reforzamiento de la estructura para su uso. La investigación no contempla la evaluación estructural.

1.3 Antecedentes

La estructura del edificio tiene aproximadamente 25 años de construcción, hasta ahora no se concluye la misma, debido a la falta de recursos económicos. Durante este tiempo la estructura ha permanecido abandonada y no ha tenido mantenimiento, ha estado expuesta a un medio ambiente moderado, lo que le ha hecho vulnerable a ciclos de humedecimiento y secado por temporadas de invierno y verano críticos, también a gases tóxicos como el smog, producto del tráfico alrededor al edificio.



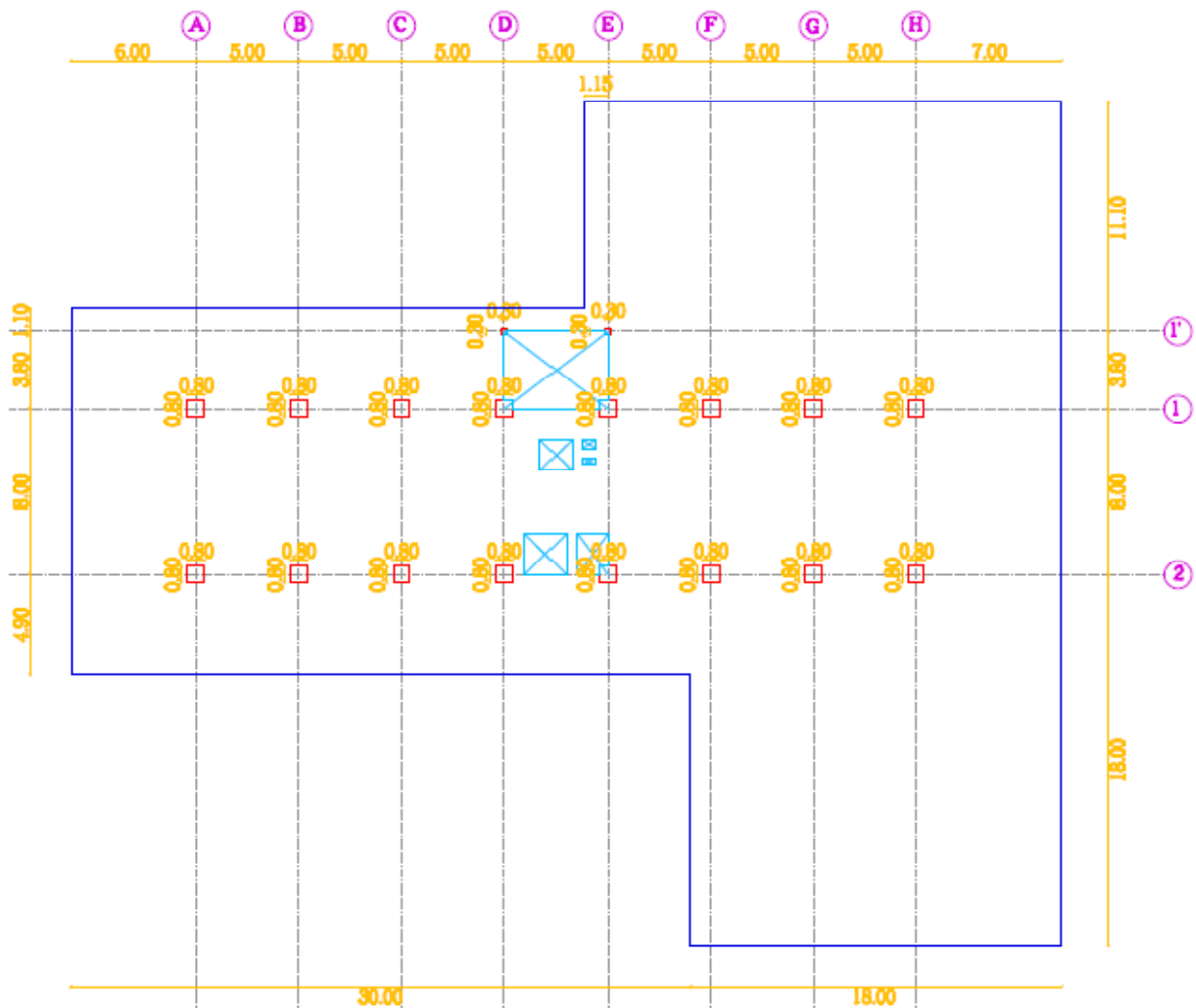
El edificio se encuentra localizado en el Norte de la ciudad de Quito, entre las calles Jorge Drom, Nuñez de Vela y Unión Nacional de Periodistas.



El edificio está conformado por una torre central con dos sótanos, una planta baja y tres plantas altas y dos bloques laterales de una sola planta de altura. La luz entre columnas es de 8.0m en dirección este-oeste y 5.0m en dirección norte-sur.

El área de construcción prevista del edificio es de 6525 m².

Gráfico 1.1 Primera planta edificio



Para el desarrollo de este trabajo es necesario presentar el marco teórico de la Patología del hormigón, estudiando las causas, origen y consecuencias de los fenómenos que se presentan comúnmente en estructuras, analizando factores como la agresividad del medio ambiente, calidad de los materiales, procesos constructivos, planificación de proyectos, control de calidad, entre otros.

Capítulo 2

PATOLOGÍA DEL HORMIGÓN

2.1 Definición y alcance de la Patología

El hormigón al ser una piedra artificial puede sufrir cambios en su estructura al estar en contacto con agentes internos o externos que con el paso de los años pueden hacer que el hormigón se deteriore, sobre todo cuando no ha recibido un mantenimiento sistemático y programado. Es por eso que en los últimos cincuenta años, en el campo de la ingeniería civil, se ha dado importancia a la conservación y a la reparación de las estructuras lo que ha hecho profundizar los estudios de la patología del hormigón y ahora con mayor énfasis en la prevención de los problemas.

La Patología es la parte de la ingeniería que estudia los procesos y características de los defectos de las obras civiles, sus causas, orígenes, consecuencias y sus remedios; el crecimiento aparente de la patología de la construcción se debe a factores como: el aumento del número de construcciones, se construye a gran velocidad, las construcciones son más complejas, se utilizan materiales por corto tiempo debido a la aparición de otros lo que ocasiona que no se llegue a adquirir experiencia acerca del uso de los mismos, cambio constante de procesos constructivos.

Todo problema patológico ocurre a través de un proceso, de un mecanismo por lo que es fundamental conocer el mecanismo del problema para poder dar una terapia adecuada, y no dar paso a equivocaciones como simples reparaciones superficiales, refuerzos injustificados o demoliciones.

Aunque el fenómeno y los síntomas sean los mismos, existe una terapia adecuada para cada caso dependiendo de su origen; una vez descubierto el origen de los daños de la estructura, se podrá determinar sobre quien recae la responsabilidad legal, si es sobre el Ingeniero consultor o el Ingeniero constructor.

En base al diagnóstico, se realiza un pronóstico del comportamiento futuro de la estructura y de sus elementos más afectados. En caso de que sea optimista se escogerá la terapia más adecuada y se realizará una intervención en la estructura, caso contrario, si es pesimista se procederá a la amputación de elementos o demolición de la estructura.

Las fallas en la etapa de planeamiento del proyecto son tan importantes como las que se puede tener en la ejecución de la obra, es por esto que se recomienda invertir más tiempo en los detalles del diseño de la estructura para así evitar problemas durante la etapa de construcción.

Cuadro 2.1 Origen de los problemas patológicos

| Origen de los problemas patológicos | Porcentaje de incidencia |
|--|---------------------------------|
| Diseño del proyecto | 40% |
| Ejecución | 28% |
| Materiales | 18% |
| Uso | 10% |
| Planeación | 4% |

Fuente Ing. Manuel Fernández Cánovas. Hormigón. Séptima Edición Octubre 2004

Los problemas patológicos empiezan manifestándose durante la construcción y con mayor incidencia durante la etapa de uso; las causas de estos pueden ser agentes internos o externos como: variaciones en las cargas, cambios de humedad, variaciones térmicas, agentes biológicos, incompatibilidad de materiales, agentes atmosféricos y otros; se debe tener presente que los peores problemas en estructuras se producen como consecuencia de un conjunto de fallas o defectos, por lo que se debe considerar la superposición de los efectos, que aunque sean menores, pueden tener consecuencias mayores sobre la estructura. Además los problemas patológicos son evolutivos, se agudizan con el transcurso del tiempo y lo más grave es que derivan en futuros

problemas patológicos, asociados al problema original que como ya se dijo sobrepondrán sus efectos empeorando cada vez más la situación.

Se debe tener estas dos consideraciones al momento de tratar los problemas patológicos de las estructuras:

1. Los que afectan las condiciones de seguridad de la estructura, que están asociadas al estado límite de resistencia.
2. Los que son parte de las condiciones de servicio y funcionamiento de la edificación, que están asociadas a los estados límites de utilización ó servicio.

2.1.2 Ley de Sitter

La ley prevé los costos crecientes según una progresión geométrica de quinto grado; mientras menos tiempo se toma para realizar la intervención, las reparaciones serán más durables, más efectivas, más fáciles de ejecutar y mucho mas económicas.

Esta ley divide la etapa de construcción y uso en cuatro periodos:

1. Período de diseño: se toman medidas en el diseño para incrementar la seguridad y poder obtener mayor protección y durabilidad de la estructura.
2. Período de ejecución: se toman medidas durante la etapa de construcción o cuando la obra está recién concluida.
3. Período de mantenimiento preventivo: se toma medidas preventivas durante los 5 primeros años de vida útil de la estructura aunque esta no presente síntomas de deterioros o de problemas patológicos.
4. Período de mantenimiento correctivo: se realizan trabajos de diagnóstico, pronóstico, reparación y protección de las estructuras que presentan problemas patológicos evidentes; se realiza una

restitución de materiales, cambios en la forma de la estructura o se reemplazan elementos defectuosos de la estructura.

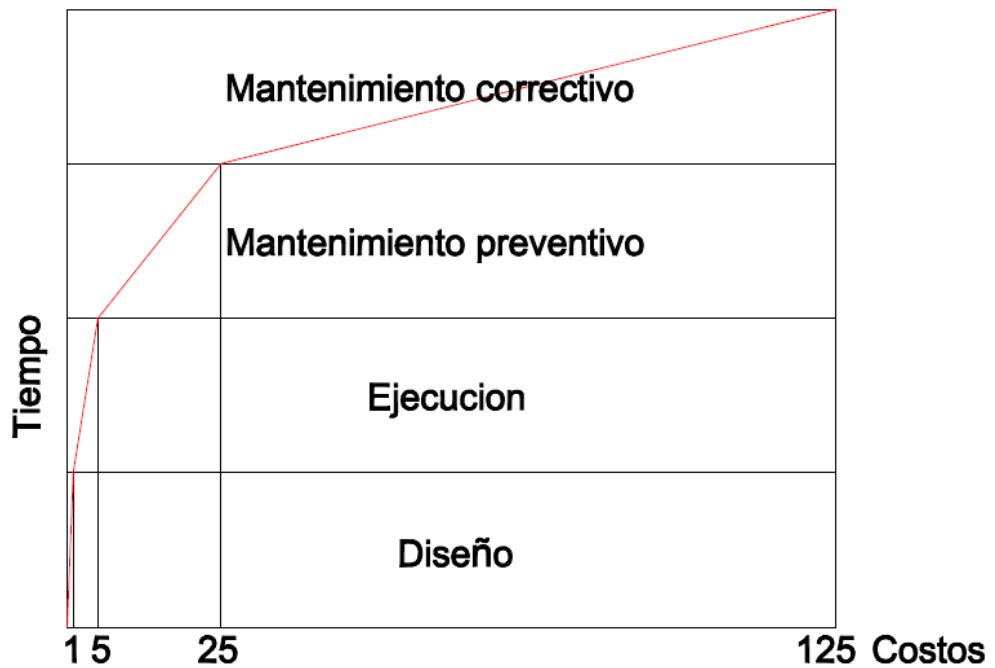
Relaciones de costos entre las cuatro etapas para obtener el mismo grado de protección y durabilidad:

Costos en ejecución = 5 costos en diseño

Costos en mantenimiento = (1/5) costos en diseño

Costos correctivos = 125 costos en diseño

Grafico 2.1 Ley de Sitter



2.1.3 Importancia de la Patología

A lo largo de la historia podemos ver la importancia que se le daba a la patología del hormigón sobre todo desde el punto de vista de la prevención, así hace cuatro mil años en Mesopotamia, el código Hammurabi indicaba cinco reglas para prevenir los defectos en edificaciones:

1. Si el constructor hace una casa para un hombre y no la hace firme y su colapso causa la muerte del dueño de la casa, el constructor deberá morir.
2. Si causa la muerte del hijo del dueño de la casa, el hijo del constructor deberá morir.
3. Si causa la muerte de un esclavo del propietario de la casa, el constructor deberá dar al propietario un esclavo de igual valor.
4. Si la propiedad fuese destruida, el deberá restaurar lo que fue destruido por su propia cuenta.
5. Si un constructor hace una casa para un hombre y no la hace de acuerdo con las especificaciones y una pared cae, el constructor reconstruirá la pared por su cuenta.

En la actualidad la importancia de la patología del hormigón continúa, ya que los accidentes catastróficos en una estructura no obedecen a una sola causa actuando de forma aislada sino a una combinación de las mismas con superposición lo que obliga el aumento de estudios patológicos ya que un diagnóstico a tiempo y correcto de una estructura que presente daños significará un gran ahorro.

El tiempo de vida útil en la que no presentará defectos dependerá de los cuidados que se hayan tenido durante cada etapa de la estructura, hay que tener especial cuidado en dar un mantenimiento adecuado, con revisiones periódicas, durante su etapa de uso además de no exceder las cargas para las que fue diseñada.

El deterioro de la obra es un proceso continuo de degradación que depende del medio y de la calidad de los materiales que se utilizaron para la construcción.

2.2 Rehabilitación y Refuerzo

Rehabilitación es la recuperación de la capacidad que tenían los elementos antes de sufrir un daño para poder soportar las solicitaciones para los que fueron diseñados, mientras que refuerzo es el incremento de la capacidad que tenían los elementos sin haber sufrido ningún daño para poder soportar las solicitaciones para los que fueron diseñados.

Las técnicas para rehabilitar y para reforzar se basan en: la tecnología de los materiales, métodos de ensayos destructivos y no destructivos, sistemas de medición de la geometría de la estructura, los sistemas de medición de deformaciones de todo tipo, los análisis físicos y químicos de los materiales y los recursos que brindan la resistencia de materiales y el cálculo estructural.

Previo al uso de cualquier técnica el estudio de la obra es fundamental contar con información de la estructura como: la fecha de su construcción, quien fue el ingeniero constructor, revisar el proyecto, conocer los materiales que se utilizaron (tipo de cemento, agregados, acero, aditivos), estudios de suelo, el uso que se le ha dado a la estructura, si ha tenido algún tipo de sobrecarga estática o dinámica, si ha estado expuesta a alguna acción accidental durante su tiempo de vida.

Antes de proyectar la rehabilitación o refuerzo de una estructura dañada es necesario conocer la capacidad resistente residual que posee la estructura dañada o envejecida definida como la aptitud para soportar las cargas que actúan sobre ella en el momento considerado. Es de mucha importancia conocer la relación existente entre la resistencia residual y la resistencia nominal de la estructura ya que nos brindará una idea del coeficiente de seguridad actual de la misma, esta relación se puede establecer para cada elemento estructural.

2.2.1 Terapia

Terapia es el estudio de la corrección y solución de problemas patológicos o problemas debido al envejecimiento natural de la estructura; su éxito depende en primer lugar de un diagnóstico acertado, aquel que esclarezca todos los aspectos del problema, además de conocer las ventajas y desventajas de materiales, sistemas y procedimientos de rehabilitación de estructuras, ya que la mejor intervención dependerá de cada situación patológica en forma particular.

2.3 Vida útil

El concepto más importante a definir antes de empezar con un estudio patológico, es el de la vida útil de una estructura, que se entiende como el período de tiempo en el que la estructura mantiene y cumple los requisitos de seguridad, funcionalidad, y estética para los que fue diseñada y construida, sin gastos de mantenimiento significativos.

2.3.1 Vida útil del proyecto

Es el período previsto por el diseñador de la estructura, para que debido a la acción de agentes externos esta empiece a presentar deterioros sin afectar el comportamiento y el aspecto de la misma. En esta etapa, se deberá tener una estrategia de mantenimiento de la estructura, que incluirá inspecciones periódicas, mantenimiento de juntas, limpieza del hormigón visto en ambientes contaminados, etc. Normalmente la vida útil del proyecto es de 50 años para obras comunes, mientras que para obras de mayor importancia social debe ser de 100 años.

2.3.2 Vida útil de servicio

Es el de tiempo que va desde el inicio de la construcción de la estructura hasta que llega a presentar un nivel de deterioro aceptable, vale la pena mencionar que cada estructura tiene un nivel de aceptación diferente; el mismo que está definido por el diseñador, y depende de varios factores como: la calidad de los materiales, la exposición al medio ambiente, su importancia, y de la magnitud en que estos deterioros afecten a la funcionalidad de la estructura. La vida útil de servicio se considera como la suma del período de iniciación y el período de propagación del agente causante del deterioro de la estructura; en este tiempo se empezarán a presentar los síntomas de los daños, tales como: manchas superficiales, desintegración del hormigón, fisuras, hongos.

Finalmente, la seguridad establece límites de resistencia previstos bajo la aplicación de cargas de servicio y sollicitaciones mecánicas, en la figura 2.1 se presentan varios ejemplos de vida útil de servicio.

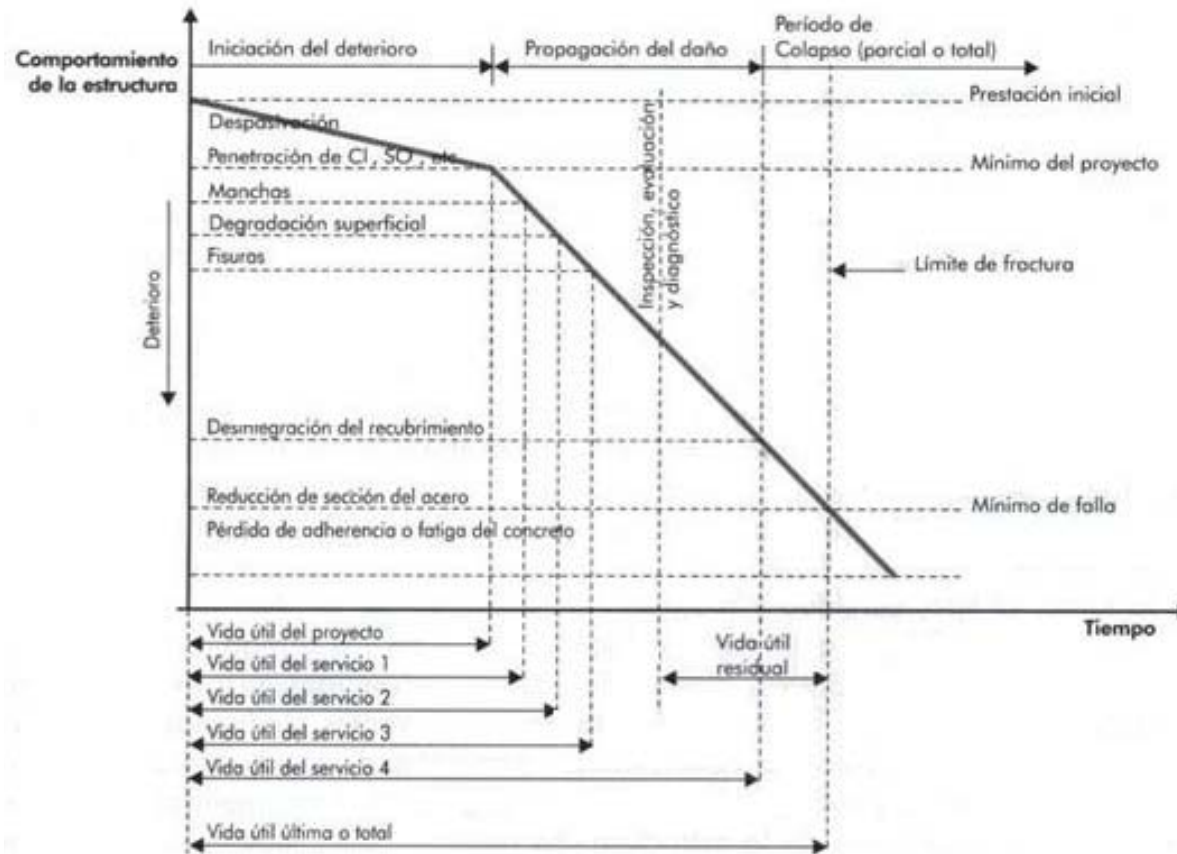
2.3.3 Vida útil última o total

Es el período que va desde el inicio de la construcción de la estructura hasta el colapso parcial o total de la misma; es la suma del período de iniciación del deterioro más el período de propagación del agente causante del deterioro de la estructura y el período de colapso. En esta etapa se presentan roturas, colapsos parciales, reducciones significativas de las secciones de hormigón y acero, pérdida de adherencia entre el hormigón y el acero, y reducción de la capacidad resistente del hormigón.

2.3.4 Vida útil residual

Es el período que va desde la realización de un estudio patológico de la estructura, que consiste en una inspección, evaluación y el diagnóstico, hasta que es capaz de cumplir con los requerimientos y funciones para los cuales fue diseñada; las evaluaciones pueden ser realizadas en cualquier momento de la vida útil de la estructura, por lo que una estructura puede tener algunas vidas útiles residuales, las mismas que dependen del número de inspecciones y estudios que han sido necesarios realizar para reforzamientos, reparaciones y mantenimientos.

Figura 2.1 Relación entre el comportamiento del concreto y el concepto vida útil de la estructura.



Fuente Ing. Diego Sánchez de Guzmán. Durabilidad y Patología del concreto.

2.4 Agresividad del medio ambiente

El medio ambiente se define como el conjunto de elementos abióticos (suelo, agua, aire) y bióticos (seres vivos) que integran la biósfera, es decir, el ecosistema. La biósfera está conformada por la litósfera, hidrósfera y atmósfera.

En un estudio patológico, es necesario hablar únicamente de la atmósfera, capa de 800 km de espesor, constituida por un conjunto de gases; está formada por cinco capas: Tropósfera, Estratósfera, Mesósfera, Termósfera, Exósfera; la que tiene una mayor incidencia sobre el deterioro de las estructuras es la Tropósfera ya que aquí suceden los fenómenos componentes del tiempo meteorológico.

La agresividad del medio ambiente es consecuencia de las acciones ambientales de naturaleza física, química y/o física-química, que pueden ocasionar el deterioro y degradación de las estructuras.

2.4.1 Clasificación de la agresividad del medio ambiente

La clasificación está basada por las condiciones de exposición de la estructura, el macro clima, el clima local y el microclima; el macro clima se caracteriza por las condiciones atmosféricas que rodean a la estructura; el clima local es el que rodea a la estructura a pocos metros en sentido horizontal de 100 m a 10000 m y en sentido vertical de 5 m a 1000m, está definido por grandes cambios topográficos y geográficos ; y el microclima es el más cercano a la estructura, es decir, el que se encuentra a milímetros o centímetros de la misma.

El macro clima no tiene mayor incidencia en el deterioro de la estructura al menos que exista la presencia de lluvias acidas (pH entre 5.5 y 5.7) o smog; mientras que el microclima es un factor preponderante para un mayor grado de deterioro de la estructura.

2.4.1.1 Ambiente ligero y débil

Dentro de esta clasificación se encuentran los ambientes secos e interiores de las estructuras, o ambientes exteriores donde la humedad relativa no sea mayor al 60%. En estos ambientes el hormigón no está expuesto a ciclos de humedecimiento y secado, ni congelamiento; además, no debe estar en contacto con sustancias químicas agresivas.

2.4.1.2 Ambiente moderado

Dentro de esta clasificación, se encuentra el interior de edificaciones con ambientes húmedos, en donde la humedad relativa se encuentra entre el 60% y el 98%, debido a vapores de agua temporales, condensación del vapor de agua; dentro de esta clasificación, se incluyen estructuras que están en contacto con agua dulce en movimiento ó suelos ordinarios (sin ningún tipo de componente químico) y los ambientes exteriores lluviosos en donde se producen ciclos de humedecimiento y secado.

2.4.1.2 Ambiente severo

Dentro de esta clasificación se encuentran ambientes húmedos, donde la humedad relativa está entre 60% y el 98%, combinado con otros agentes degradantes, como el hielo de agua dulce, agentes de deshielo (sales), ambientes marinos ó industriales, condensación de gases contaminantes, y contacto

con suelos agresivos (contienen sulfatos solubles o componentes químicos) .

Los ciclos de humedecimiento y secado son los más degradantes dentro de esta clasificación, ya que en la mayoría de casos el agua tiene un alto contenido de sales, sulfatos y cloruros.

2.4.1.3 Ambiente muy severo

Dentro de esta clasificación se encuentran las zonas industriales, marítimas, congeladas; además zonas en las que la estructura va a tener una exposición directa a líquidos tóxicos, ácidos, gases agresivos, suelos contaminados y aguas fuertemente oxigenadas.

Cuadro 2.2. Clasificación de la agresividad del medio ambiente en base a la durabilidad de la armadura.

| Clase de agresividad | Macro clima | Micro clima | Riesgo de deterioro de la estructura |
|-----------------------------|-------------------------------|---|---|
| Ligera | Atmósfera Rural | Humedad relativa $\leq 60\%$ interiores secos | Insignificante |
| Moderada | Atmosfera Urbana | Humedad relativa de 60% a 98% Humedecimiento y secado | Pequeño |
| Severa | Atmosfera marina o industrial | Humedad relativa de 60% a 98% Congelamiento y deshielo | Grande |
| Muy Severa | Polos industriales | Zonas húmedas o industriales y altos agentes agresivos | Elevado |

Fuente Ing. Diego Sánchez de Guzmán. Durabilidad y Patología del concreto.

Cuadro 2.3 Clases de hormigones según la agresividad del medio ambiente

| Clases de hormigones según la agresividad del medio ambiente | | | |
|---|--|-----------------------------|--------------------|
| Agresión del medio ambiente | Clase de hormigón por durabilidad | Nivel de resistencia | |
| | | MPa | kg/cm ² |
| Ligera | Pobre | 21-Oct | 100 - 210 |
| Moderada | Normal | 21 - 28 | 210 - 280 |
| Severa | Resistente | 28 - 35 | 280 - 350 |
| Muy severa | Durable | > 35 | > 350 |

Fuente Ing. Diego Sánchez de Guzmán. Durabilidad y Patología del concreto.

2.5 Factores que afectan el deterioro de las estructuras de hormigón

2.5.1 Humedad

El factor principal es la humedad dentro del concreto, sin dejar de importar la humedad del medio ambiente que rodea la estructura, especialmente si en este se presentan ciclos de humedecimiento y secado.

Tabla 2.4 Efecto de la humedad relativa efectiva sobre la durabilidad del concreto y de las armadura.

| Humedad relativa efectiva dentro del concreto | | Mecanismos de daño en el concreto | | | | |
|---|----------|-----------------------------------|----------------|----------------|-----------------------|--------------|
| | | Congelamiento | Carbonatación | Ataque químico | Corrosión de armadura | |
| | | | | | Carbonatado | Con cloruros |
| Muy baja | < 45% | Insignificante | Ligero | Mínimo | Mínimo | Mínimo |
| Baja | 45%- 65% | Insignificante | Alto | Mínimo | Ligero | Ligero |
| Media | 65%-85% | Ligero | Medio | Mínimo | Alto | Alto |
| Alta | 85%-98% | Medio | Ligero | Ligero | Medio | Alto |
| Saturación | >98% | Alto | Insignificante | Alto | Ligero | Ligero |

Fuente Ing. Diego Sánchez de Guzmán. Durabilidad y Patología del concreto.

2.5.2 Temperatura

La importancia de la temperatura radica en su influencia sobre la velocidad de avance de los fenómenos de deterioro en la estructura, ya que un aumento de temperatura en 10 °C dobla la velocidad de reacción de una reacción química.

En el análisis del efecto de los cambios de temperatura no se toman en cuenta situaciones excepcionales como un incendio o una helada. El rango del análisis normalmente está entre -3°C a + 70°C.

2.5.3 Presión

Las estructuras que se encuentran sobre la superficie se ven afectadas por la presión atmosférica y los vientos, que provocan erosión por causa del arrastre de partículas; mientras que las estructuras sumergidas en el agua ó en el suelo son más vulnerables a la penetración de sustancias que pueden percolar el hormigón causando un mayor deterioro.

Capítulo 3

DEFECTOS Y/O DAÑOS

3.1 Clasificación de los defectos

Los defectos de las estructuras son evolutivos con el paso del tiempo, por lo que es fundamental detectar las fallas a tiempo antes de que se llegue a un estado crítico lo que incrementará considerablemente los costos de las reparaciones.

3.1.1 Congénitos

Son aquellos defectos que se presentan desde la construcción de la estructura.

La primera razón de la presencia de estos defectos se debe a errores en el diseño del proyecto, los que se llegan a presentar debido a la falta de actualización en códigos y reglamentos, por la realización de estructuras cada vez más esbeltas con factores de seguridad más bajos que afectan directamente a la durabilidad de la estructura. Por parte de los diseñadores se presentan errores de concepción al diseñar la estructura, debido a la ausencia de cálculos, diseños arquitectónicos no adecuados, falta de drenajes dentro del proyecto, ausencia de juntas de construcción y dilatación, tolerancia excesiva de deformaciones en el diseño, escasez de detalles constructivos.

La segunda razón es durante la etapa de construcción que es consecuencia de malas prácticas constructivas, el no cumplimiento o mala interpretación de las especificaciones y de los planos entregados por el ingeniero diseñador, de un escaso control de calidad durante la ejecución de la obra. Entre los errores más comunes se encuentran: cambio de las dimensiones de los elementos, encofrados mal

diseñados y colocados, mala colocación y aseguramiento del acero de refuerzo, mala compactación del hormigón, mal curado del hormigón, realización de conductos una vez fundido el hormigón.

La tercera razón se debe a la mala calidad de los materiales empleados en la construcción; además de que no siempre se realiza una dosificación para el hormigón, considerando la humedad ni las propiedades del material que se va a utilizar, no se respeta el tamaño máximo de los agregados, se utiliza acero inadecuado para la estructura, ó se usa agua con alto contenido de cloruros en la mezcla, entre otros.

3.1.2 Adquiridos

Son aquellas que las estructuras adquieren durante el transcurso de su vida útil.

Estos defectos pueden producirse debido a agentes externos que se encuentran en el medio ambiente, y en ciertos casos, al mal uso que se le da a la estructura, sin respetar las solicitaciones para las cuales fue diseñada (sobre cargas) ó simplemente al envejecimiento de la misma y a la falta de mantenimiento.

3.1.3 Accidentales

Son aquellas que se producen en casos inesperados y no previstos tanto en la etapa constructiva como en la etapa de operación de la estructura. El mayor porcentaje de estos daños son debidos a fenómenos naturales como terremotos, huracanes, tornados, y deslizamientos de tierra.

3.2 Descripción y orígenes de los daños

3.2.1 Cambios de color

Normalmente el hormigón a lo largo de su vida útil cambia su color debido a la agresión del medio ambiente y a los ataques biológicos, la aparición de estos defectos afecta a la apariencia y a la durabilidad del hormigón.

La reparación de este daño se lo realiza mediante el uso de pulidoras mecánicas o del picado manual del hormigón, evitando parcheos que posteriormente se desprenderán con mucha facilidad; por lo que se recomienda utilizar morteros, con la misma dosificación arena cemento de consistencia cremosa, que será colocado y compactado en capas de 10 mm, esperando uno o dos días en estado húmedo dependiendo el clima, antes de colocar la siguiente capa para así asegurar la adherencia entre capas y curarlas durante siete o diez días. Una de las desventajas de las reparaciones, sobre todo en hormigones vistos, es que el color de la zona reparada tiene un color más oscuro a lo largo de los años (se desconoce la razón) lo que afecta sin duda alguna la estética de la estructura.

3.2.2 Eflorescencia

Las eflorescencias son depósitos de sales (sulfatos y carbonatos de sodio, potasio o calcio) , usualmente de color blanco, que son lixiviadas fuera del hormigón, que se cristalizan luego de la evaporización del agua que las transportó o por la interacción con el dióxido de carbono de la atmósfera; frecuentemente ocurren cuando el agua tiene la posibilidad de moverse en el medio poroso a través del material de forma intermitente o continúa, o cuando se da el proceso de humedecimiento y mojado en forma alternativa. La eflorescencia

de carbonato de calcio es la más agresiva para el hormigón debido a que tiene una solubilidad muy baja en el agua y eso hace que se mantenga en el hormigón más que las otras sales y que no se la pueda remover con facilidad.

La forma de prevenir las eflorescencias es curando al hormigón durante dos días con una humedad relativa alrededor de 87% y con una temperatura de 20°C; en el caso de que la humedad relativa sea menor se deberá curar al hormigón por varias semanas.

Las eflorescencias pueden ser removidas sin mayor dificultad utilizando cualquier tipo de ácido débil preferiblemente los orgánicos seguido de un lavado con agua.

3.2.3 Disgregaciones

Las disgregaciones son roturas que se producen desde el interior del hormigón a causa de esfuerzos internos de tracción que el hormigón no está en capacidad de resistir. Las causas más comunes para que se presenten este tipo de daños en el hormigón son: la corrosión del acero, grandes deformaciones, congelamiento del agua que se encuentra en los poros del hormigón, entre otros.

3.2.4 Desagregaciones

La desagregación es la degradación del cemento que ha dejado de cumplir su función de aglomerante, lo que provoca que los agregados queden libres. Este daño ocurre mediante un proceso lento que comprende cambio de coloración del hormigón, formación de fisuras entrecruzadas que aumentan en el transcurso del tiempo y finalmente el desprendimiento y desintegración del hormigón.

La causa principal para que ocurra este tipo de daño son los ataques químicos, especialmente de sulfatos y cloruros.

Las recomendaciones para atenuar este tipo de daños son:

- Realizar hormigones muy compactos
- Utilizar cementos con poco contenido de aluminio tricálcico
- Aislar los elementos de la estructura que se encuentran con mayor exposición mediante barreras de diferentes materiales

CAPITULO 4

FISURAS

4.1 Introducción

Es uno de los mayores indicativos para determinar el estado en el que el hormigón se encuentra, son muy útiles el momento de dar un diagnóstico; las causas de su aparición son múltiples; se las puede definir dependiendo su forma, tiempo de aparición, y espesor. Las fisuras deben ser corregidas a tiempo ya que estas además de afectar la estética de las estructuras, dan una sensación de inseguridad, son las que facilitan la entrada de sustancias nocivas y agresivas en el hormigón, acelerando su deterioro especialmente en medio ambientes severos y muy severos. Las fisuras se pueden producir antes o después del endurecimiento del hormigón.

Por su espesor se las puede clasificar en:

- Micro fisuras: tienen un espesor menor a 0.05 mm, no son perceptibles a la vista, no tienen mayor importancia pero afectan la permeabilidad del hormigón.
- Fisuras: tienen un espesor entre 0.1 y 0.2 mm, pueden llegar a producir daños en el hormigón por corrosión si este se encuentra en ambientes severos o muy severos.
- Macro fisuras: tienen un espesor mayor a 0.2 mm, normalmente ocasionan daños estructurales considerables.

Cuadro 4.1 Espesor tolerable de fisuras sobre superficies de estructuras de hormigón armado

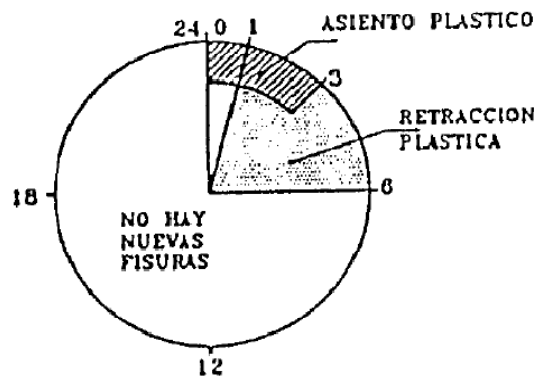
| Condición de exposición | Espesor tolerable |
|---|-------------------|
| En aire seco o con membrana de protección | 0.4 |
| En ambiente húmedo: aire húmedo o suelo saturado | 0.3 |
| Con agentes químicos que impiden el congelamiento | 0.2 |
| Humedecimiento y secado de agua de mar, o salpicaduras de agua de mar | 0.15 |
| Estructuras de baja permeabilidad, excluyendo tubería no sujeta a presión | 0.1 |

Fuente Código ACI 224

4.2 Tipos de fisuras

4.2.1 Fisuras antes del endurecimiento

Grafico 4.1 Fisuras en el primer día del hormigón



4.2.1.1 Fisuras debido a la retracción plástica

Se presentan debido a la rápida pérdida por evaporación del agua de mezclado del hormigón cuando este se encuentra en estado plástico, sin permitir que el agua de exudación llegue a la superficie del hormigón lo que hace que esta se contraiga más que el interior; generalmente se produce durante las dos y

cuatro primeras horas de colocado el hormigón; además este tipo de fisuras se pueden presentar como resultado de una sobre vibración y un mal terminado del hormigón.

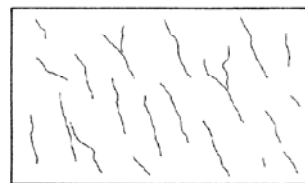
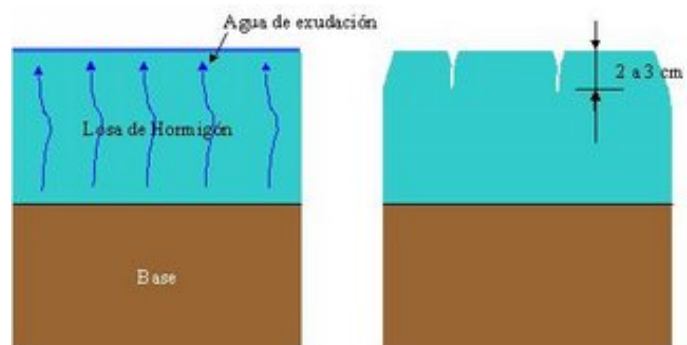
Normalmente estas fisuras no sobrepasan los 3 cm de profundidad a no ser que las condiciones climáticas y ambientales sean tan adversas (clima caluroso, presencia de vientos, baja humedad) que hagan que las fisuras profundicen todo el espesor del elemento, es común encontrar este tipo de fisuras en losas debido a que estas no tienen la protección del encofrado por algunos días como otro tipo de elementos estructurales.

Este tipo de fisuras presentan las siguientes características: su longitud puede llegar a un metro, su forma es lineal, son superficiales, su espesor es de 2 y 3 mm, no poseen bordes agudos ni bien definidos, no atraviesan los agregados sino que los rodean, se localizan en las zonas más delgadas de los elementos, no causan daños estructurales; en caso de elementos que tengan una alta relación área/volumen las fisuras son paralelas y a ángulos aproximadamente de 45°.

Las recomendaciones para prevenir la aparición de este tipo de fisuras son:

- Contenido de agua tan bajo como sea posible de acuerdo con la consistencia especificada para estimular la retención de agua
- Mantener baja la temperatura de los agregados (humedeciéndolos, colocándolos bajo sombra)
- Humedecer la subrasante y los encofrados
- Fundir el hormigón durante las horas más frías del día
- Evitar dosificaciones del hormigón con altos contenidos de finos ya que esto facilita la exudación

- Usar aditivos superplastificantes para obtener una mayor resistencia del hormigón y así disminuir la proporción del cemento en la dosificación ya que algunos tipos de cementos producen un alto calor de hidratación.
- Proteger del sol y el viento el área en la que se está fundiendo mediante rompe vientos y pantallas protectoras provisionales.
- Colocación de acero mínimo por temperatura en elementos que tengan una relación área/volumen alta.



4.2.1.2 Fisuras debido asentamiento plástico

Se produce como consecuencia del acomodamiento de los materiales del hormigón, colocado y compacto, que tiende a asentarse por acción de la gravedad y desplazan a los componentes más livianos a la superficie, es decir, al agua y al aire atrapado; el agua se mantiene en la superficie, como agua

de exudación, mientras que el asentamiento continua hasta el fraguado del hormigón.

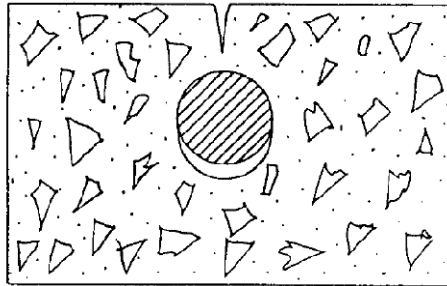
Las fisuras se producen debido a la obstrucción del acomodo de la mezcla de hormigón debido a agregados de mayor tamaño, el acero de refuerzo u otros elementos que estén embebidos en el hormigón lo que provoca asentamientos diferenciales. Otras causas pueden ser: el vaciado del hormigón sobre superficies inclinadas, la variedad de consistencias de distintas mezclas (diferentes velocidades de acomodo), mal apuntalamiento de encofrados, deformaciones en el suelo y elementos con cambios bruscos de secciones.

Este tipo de fisuras tienen las siguientes características: su espesor es de hasta 1 mm pero de poca profundidad, no causan daños estructurales, siguen patrones longitudinales en dirección a las varillas, no son visibles inmediatamente, su espesor aumenta mientras menor sea el recubrimiento, mayor sea el diámetro de las varillas superiores y la mezcla del hormigón sea más fluida.

Las recomendaciones para prevenir la aparición de este tipo de fisuras son:

- Humedecer la subrasante y los encofrados
- Contenido de agua tan bajo como sea posible de acuerdo con la consistencia especificada para estimular la retención de agua
- Evitar dosificaciones del hormigón con altos contenidos de finos ya que esto facilita la exudación
- Hacer que el hormigón tenga una misma consistencia con humedad uniforme
- Compactar el hormigón correctamente sin provocar segregaciones.

- Respetar los recubrimientos mínimos
- Evitar el uso de varillas de gran diámetro
- Asegurar correctamente el encofrado y sus apuntalamientos.



4.2.1.3 Fisuras por heladas tempranas

Se presentan debido a una baja de temperatura drástica cuando el hormigón se encuentra en proceso de fraguado, pudiendo detener el fraguado si esta temperatura hace que la temperatura interna del hormigón sea menor a 4° C.

El agua de mezclado se congela, habiendo un aumento de volumen que ocasiona un incremento en la presión interior del hormigón que genera micro fisuras.

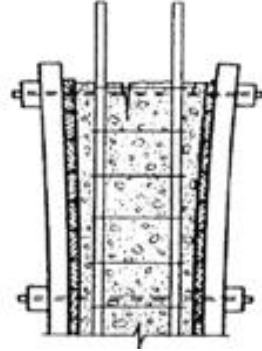
Las recomendaciones para evitar este de fisuras son:

- Inclusión de aire en el hormigón

4.2.1.4 Fisuras debido al movimiento del encofrado

Son consecuencia de las deformaciones que se producen en los encofrados debido a: vibraciones, movimientos en el momento de la fundición o a la presión que ejerce el hormigón sobre estos; esto hace que en el hormigón fresco se produzcan esfuerzos de

tracción los que no puede soportar debido a su baja resistencia, lo mismo sucede cuando se quita de manera apresurada los encofrados.



4.2.1.5 Fisuras debido al movimiento de la base

Se debe a las deformaciones de la base durante las fundiciones resultado de una mala compactación o solidez que ocasionan fisuras que muchas veces tienen como consecuencia considerables daños estructurales.

4.2.2 Fisuras después del endurecimiento

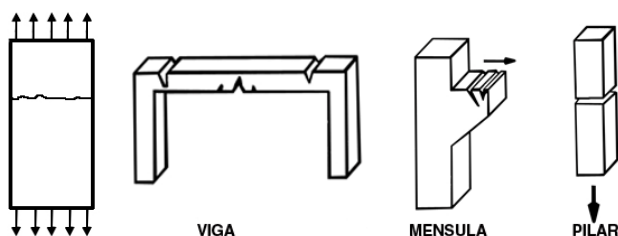
4.2.2.1 Fisuras estructurales

Se producen debido a los esfuerzos a los que están sometidas las estructuras, cuando son debido a los esfuerzos previstos en el diseño las fisuras tienen un espesor menor a 0.5 mm; si este es mayor significa que la estructura ha estado sometida a sollicitaciones no consideradas en el diseño; este tipo de fallas son fácilmente identificadas porque tienen una mayor profundidad y además una forma típica.

Las fisuras estructurales del hormigón armado dependen de la naturaleza y posición de las cargas, de las características mecánicas del hormigón, adherencia y diámetros de las varillas de acero, separación entre varillas, espesor de los recubrimientos, espesor de las zonas traccionadas.

4.2.2.1.1 Fisuras por tracción

Se producen en elementos que trabajan a flexión; el hormigón no posee una buena resistencia a los esfuerzos de tracción (10% de la resistencia a la compresión) es por esto que se coloca el acero de refuerzo para que sea el encargado de resistir dicho esfuerzo; la característica principal de este tipo de fisura es que se presenta en dirección perpendicular a la tensión. Las fisuras perjudican notablemente la adherencia del hormigón con el acero alrededor de la zona afectada, anulando la transferencia de esfuerzos entre sí.



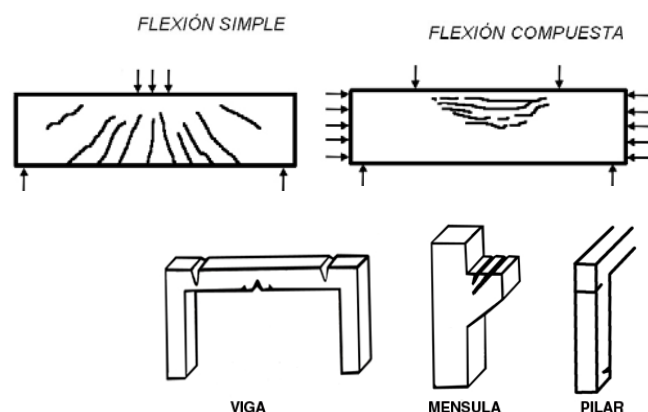
4.2.2.1.2 Fisuras por flexión

Se presenta en elementos sometidos a esfuerzos de flexión, se producen en la zona sometida a tracción; las

fisuras de menor espesor inician en la armadura y llegan hasta el eje neutro del elemento (zona en la que empieza el esfuerzo de compresión), mientras que las de mayor espesor se expanden por encima de las barras de refuerzo; aparecen muchas y en gran número y su inclinación depende del esfuerzo cortante. Las razones usuales para que las fisuras tengan un mayor espesor son: precargas o sobrecargas, escaso refuerzo longitudinal principal y de compresión; si se toman medidas correctivas antes de que la armadura de tracción haya superado el límite elástico es posible que las fisuras se cierren.

Se pueden disminuir este tipo de fisuraciones con las siguientes recomendaciones:

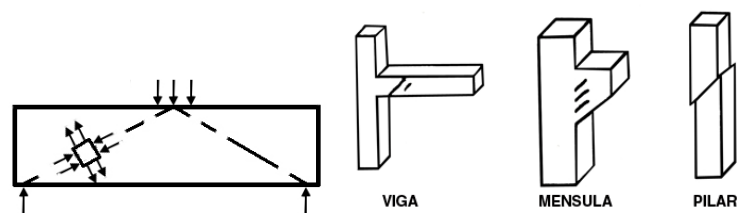
- Uso de acero corrugado, para aumentar la rugosidad del acero
- Colocación de varillas de menor diámetro para mejorar la adherencia con el hormigón



4.2.2.1.3 Fisuras por cortante

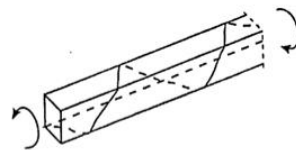
Se producen debido a a esfuerzos de corte y flexión, aparecen cerca de los apoyos y por su inclinación de

45° aproximadamente con el eje de la viga; además pueden aparecer en el centro de luz cuando actúan cargas puntuales sobre el elemento. Estas fisuras son peligrosas porque se generan muy rápido, y en el caso de vigas T Y vigas I empiezan en el alma y se extienden hasta el refuerzo longitudinal provocando la rotura del elemento.



4.2.2.1.4 Fisuras por torsión

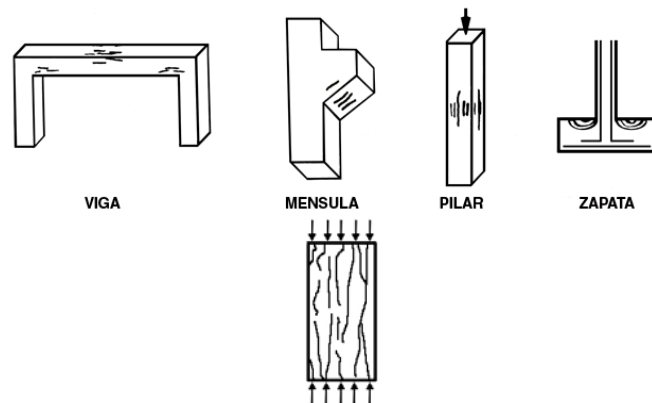
Se producen debido a esfuerzos de torsión, son transversales, inclinadas a 45° y rodean a todo el elemento en forma de espiral. Comúnmente se las encuentra en elementos apertados arriostrados por vigas o voladizos empotrados a estas.



4.2.2.1.5 Fisuras por compresión simple

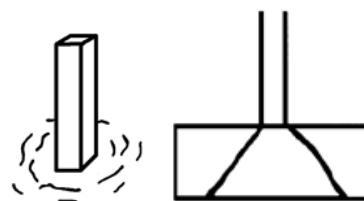
Se producen en elementos sometidos a carga axial que producen esfuerzos de compresión, son paralelas a la dirección del esfuerzo, su forma variara dependiendo la esbeltez del elemento y el grado de restricción transversal que este tenga. Las fisuras más peligrosas

son aquellas que se presentan en elementos esbeltos en la mitad de sección, muy juntas lo que nos indica que el pandeo está muy próximo, y puede ser un indicativo de un colapso cercano.



4.2.2.1.6 Fisuras por punzonamiento

Se producen debido a tensiones tangenciales en elementos que están sometidos a esfuerzos de tracción por acción de cargas localizadas en áreas pequeñas; este tipo de fisuras tienen la forma de un tronco de pirámide que se genera a partir del área cargada. La razón principal para este tipo de fisuras es la falta de refuerzo.



4.2.3 Fisuras por cambio de humedad

La mayoría de este tipo de fisuras se presentan los primeros días después de la fundición, ya que es en estos en los que el hormigón presenta una resistencia baja.

4.2.3.1 Fisuras por contracción por secado

Se la puede definir como la retracción hidráulica en la fase de secado, la contracción por secado es una disminución de volumen que experimenta el concreto endurecido debido a reacciones químicas y a la reducción de humedad; el aire hace que el agua evaporable de la mezcla se libere. Mientras más agua de mezcla tenga la dosificación del hormigón, mayor será la contracción por secado; el valor de contracción común esta de 0.2 a 0.7 mm por metro lineal y puede durar algunos meses por lo que es importante su control.

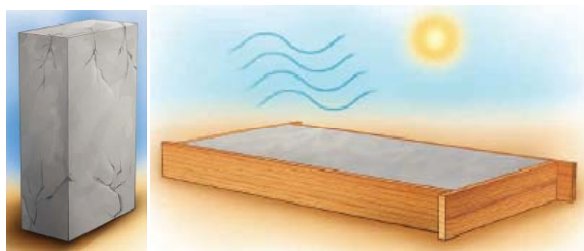
La importancia de los agregados, que deben ser compactos, rugosos, no absorbentes y duros, radica en que ayudan a resistir la contracción de la pasta gracias a su buena adherencia.

Normalmente se presentan en vigas largas y empotradas en sus extremos, en forma perpendicular al eje del elemento y en el centro de la luz del mismo, además en las vigas cerca de las columnas por la gran diferencia de rigideces entre estos dos elementos.

Se puede evitar la formación de estas fisuras con las siguientes recomendaciones:

- Disminución del contenido de agua de mezclado.
- Colocación de acero de refuerzo, siendo las más efectivas las varillas de menor diámetro y colocadas con un menor espaciamiento.

- Colocación de mallas electro soldadas.
- Presforzado del hormigón lo que evitara la formación de esfuerzos de tracción
- Realización de las conocidas juntas de contracción en caso de pavimentos (20 a 25 veces el espesor en metros), en las primeras 24 y 36 horas después de la fundición.
- Curado del hormigón durante los primeros tres días del endurecimiento.
- Uso de fibras sintéticas en pavimentos, que aumenta la capacidad a deformación del hormigón.
- Aplicación de curados químicos.
- Proteger el área fundida del sol y el viento mediante rompe vientos y pantallas protectoras provisionales.



4.2.3.2 Fisuras capilares o cuarteadas

Se caracterizan por estar en la superficie del hormigón, tener una distribución hexagonal, formarse durante el fraguado del hormigón en los primeros quince días después de la fundición, su profundidad alcanza hasta 1 cm, no causan daños estructurales. Las razones más comunes para la presencia de este tipo de fisuras son: mala compactación del hormigón con segregación, excesivo aplanado del hormigón, y en general mal acabado del hormigón que provoca su descascaramiento.



4.2.4 Fisuras por cambio temperatura

4.2.4.1 Fisuras por contracción térmica inicial

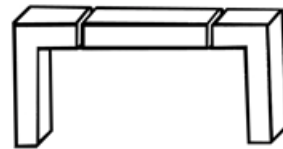
La contracción térmica inicial se produce por el calor de hidratación derivado de la reacción de hidratación del cemento, que hace que existan tensiones locales a causa de una gran variación térmica entre el hormigón y el medio ambiente (el hormigón puede alcanzar temperaturas hasta de 65°C), la fisura se produce el momento en que el valor de la retracción es igual a la relación entre la el esfuerzo a tensión que provoca la rotura del material a tracción y su módulo de deformación. Durante los primeros cinco días se presentan como microfisuras por los esfuerzos de tracción en la superficie del hormigón debido a que el enfriamiento superficial es más rápido.

Se pueden producir este tipo de fisuras en las zonas en el que el hormigón está en contacto con los encofrados, si estos se encuentran a temperaturas altas, que agudizan la pérdida de humedad superficial de la mezcla.

Se puede evitar y controlar la formación de estas fisuras con las siguientes recomendaciones:

- Dosificaciones de hormigón bajas en cemento
- Uso de cementos de bajo calor de hidratación
- Uso de agregados de bajo coeficiente de dilatación

- Colocación de acero de refuerzo, siendo las más efectivas las varillas de menor diámetro y colocadas con un menor espaciamiento.
- Refrigeración de los encofrados antes de la fundición (especialmente en climas cálidos)
- Curado adecuado del hormigón
- Realización de juntas de contracción
- Reduciendo el tiempo entre hormigonado de dos partes superpuestas



4.4.4.2 Fisuras por dilatación y contracción de temperatura

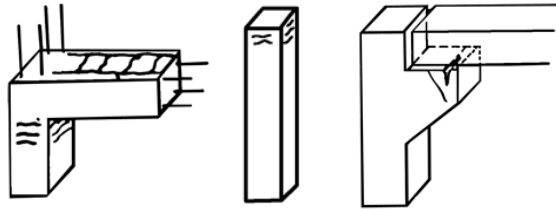
La dilatación térmica es la variación de expansión del hormigón a causa de una gran variación térmica entre el hormigón y el medio ambiente, el hormigón se dilata cuando la temperatura aumenta y se contrae cuando la temperatura baja; lo que provoca que se generen fisuras sobre todo si se restringen estos cambios volumétricos que experimenta el hormigón. El coeficiente de dilatación térmico del hormigón está entre 0.007 y 0.011 mm/m/°C, utilizando en cálculos el valor de 0.010 mm/m/°C.

En los pavimentos rígidos, a causa de las variaciones de temperatura, del peso propio, y de la carga de tráfico, se producen grietas debido al alabeo por gradiente térmico que hace que dependiendo el caso la cara superior o inferior se dilate y se deforme una más que la otra, produciendo esfuerzos de flexión que se convierten en esfuerzos de tracción en la cara

dilatada y produciendo esfuerzos de compresión en la cara opuesta; este tipo de comportamientos son comunes en lugares donde los cambios de temperatura son repentinos muchas veces durante el mismo día.

Se puede evitar y controlar la formación de estas fisuras con las siguientes recomendaciones:

- Colocación de acero de refuerzo
- Realización de juntas de dilatación



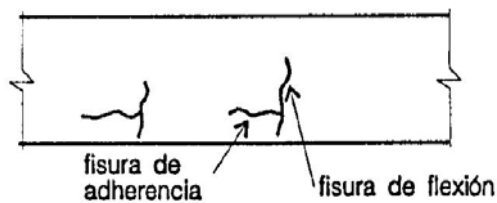
4.2.5 Fisuras por corrosión

Se producen cuando el acero de refuerzo está corroído, se caracterizan porque son paralelas al acero de refuerzo, tienen manchas de óxido a lo largo del mismo trazado. Este tipo de fisuras ayudan a que la velocidad de corrosión sea mayor por lo que se debe tomar medidas correctivas lo antes posible, aunque una vez producida la despasivación las fisuras de espesores hasta de 0.4 mm ya no tienen importancia.



4.2.6 Fisuras por adherencia-anclaje

Las fisuras por falla de anclaje se producen debido a deslizamientos de las varillas de acero, que hace que estas no cumplan la función para la cual fueron diseñadas. Las características de estas fisuras son: paralelas al refuerzo longitudinal, localizadas, no son continuas, indicativo de un colapso cercano de la estructura o el elemento.

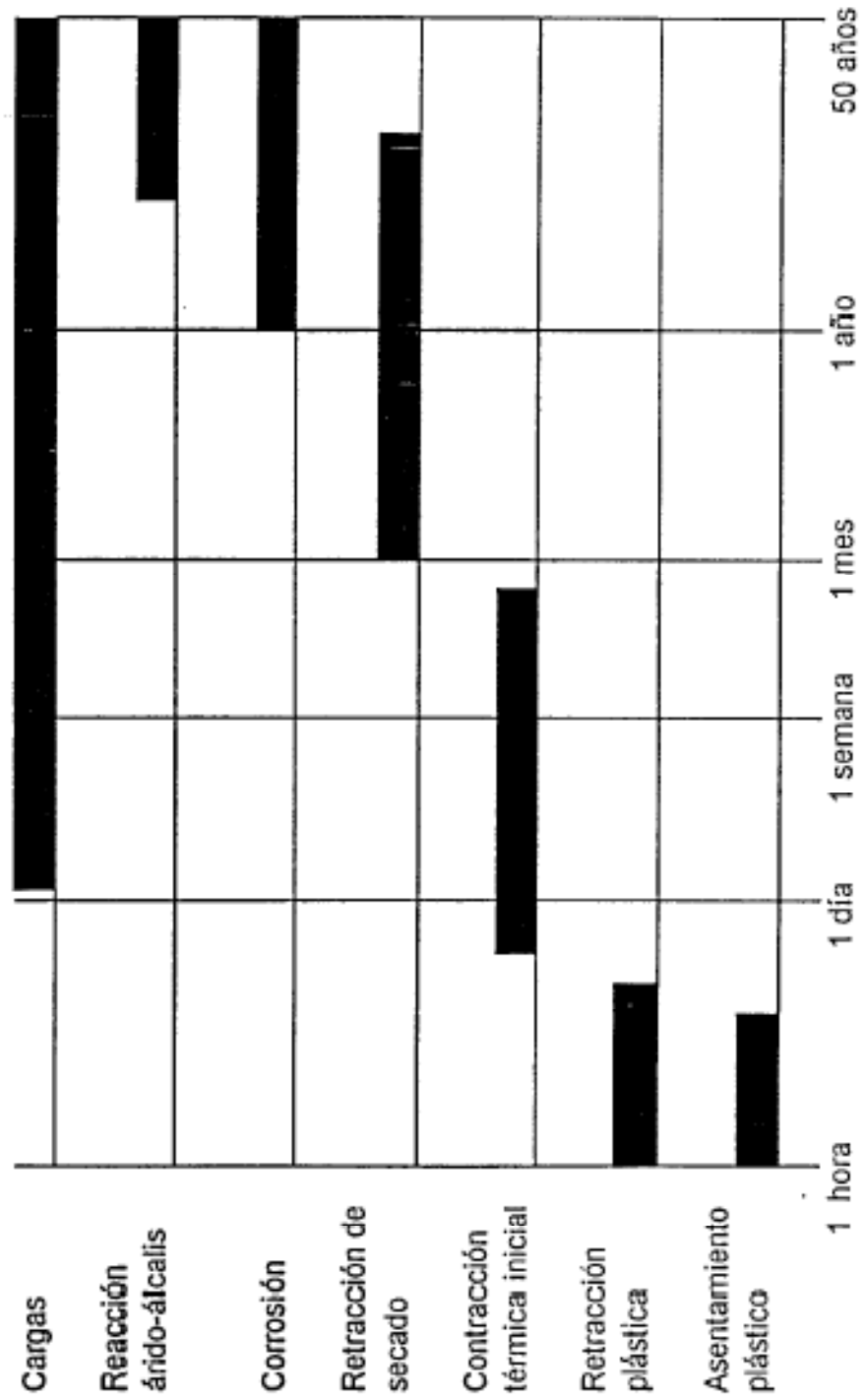


4.2.7 Fisuras Álcali – Árido

Esto se debe a una reacción química que se produce entre áridos silíceos y los álcalis del hormigón provenientes del cemento, aditivos, agua, suelo, etc, que provocan la formación de geles que ejercen presiones internas en el hormigón y pueden causar su rotura.



Cuadro 4.2 Edad de aparición de las fisuras



Cuadro 4.3 Cuadro de Fisuras

| Cuadro de Resumen de Fisuras | | | |
|--|---|--|---|
| Causa | Tiempo de formación | Manifestación | Observaciones |
| Asentamiento plástico | A las pocas horas del hormigonado | Fisuras coincidiendo con las barras de armado. Las fisuras pueden cambiar de acuerdo con la forma de la sección | Pueden aparecer fisuras de grandes dimensiones |
| Retracción plástica | A las pocas horas del hormigonado | Mapa de fisuras o fisuras largas en la superficie de las losas puestas en obra en condiciones de ambiente seco o vientos | Fisuras que pueden alcanzar de 2 a 4 mm de ancho |
| Fisuras de origen térmico a corta edad | A los primeros días de la puesta en obra | Fisuras importantes en muros y piezas de gran longitud | Puede limitarse por las armaduras, limitando el tamaño de las piezas y controlando la temperatura |
| Retracción hidráulica | Después de varios meses de la puesta en obra | Fisuras de forma similar a las de tracción o flexión | Si el hormigón es armado suelen ser de pequeña anchura y separadas |
| Corrosión | Después de varios meses de finalizada la construcción | Fisuras siguiendo las líneas de las barras principales y de los estribos. Desintegración del hormigón | Inicialmente pequeñas incrementándose con el tiempo. El óxido puede ser visible en condiciones húmedas |
| Reacción álcali-árido | Después de varios años finalizada la construcción | Tiene lugar en condiciones de humedad apareciendo en forma de "espuelas de caucho". Solo ocurren con áridos reactivos | Las fisuras pueden ser grandes |
| Cargas de servicio | Dependen del uso de la estructura | Pueden ser de flexión, tracción, cortante, torsión, etc. | Son pequeñas si el proyecto es adecuado. Si son grandes son índice de un mal dimensionamiento de la estructura o poca calidad |

Fuente Ing. Manuel Fernández Cánovas. Hormigón. Séptima Edición Octubre 2004

4.3 Reparación de fisuras

La principal razón de la reparación de las fisuras es para evitar la penetración de agentes agresivos en el hormigón que podrían llegar a corroer el acero de refuerzo; la reparación consiste en el cierre de las fisuras mediante diferentes sistemas, se deberá emplear un determinado sistema conociendo las causas que originaron el fisuramiento y las características de las fisuras. Además se deberá diferenciar las condiciones de las fisuras para determinar si es una fisura muerta o viva; las fisuras muertas son aquellas que no tienen ningún tipo de movimiento, se mantienen estables; mientras que las fisuras vivas son aquellas en las que su espesor es variable dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el elemento y que tienden a seguirse abriendo, normalmente debido a cambios bruscos de temperatura y por no contar con juntas de dilatación.

Mediante la reparación de fisuras se consigue: aumentar la impermeabilidad del hormigón, mejorar el aspecto estético superficial del hormigón, prolongar la durabilidad del hormigón, restaurar la adherencia del acero con el hormigón, restaurar la rigidez de los elementos, restaurar la resistencia a tracción del hormigón.

4.3.1 Tipos de reparaciones de fisuras

4.3.1.1 Cicatrización

Consiste en el cierre de las fisuras muertas por si solas cuando se han estabilizado, el proceso de reparación tiene una duración aproximada de 90 días que comúnmente ocurre en elementos que están saturados de agua.

La cicatrización se produce gracias a las fuerzas de adherencia que se originan por la carbonatación del óxido e hidróxido cálcico del cemento por la acción del anhídrido carbónico del

aire y del agua; la zona de las fisuras es delicada pero si logra soportar los esfuerzos de tracción por acción de cargas estáticas y constantes.

4.3.1.2 Ocratización

Consiste en el empleo de un gas de tetrafluorsílice, introducido a presión en las fisuras que tengan un espesor menor a 2 cm, que reacciona con la cal liberada en la hidratación del cemento portland.

En este sistema se puede utilizar también vidrio líquido (fluorsilicato de sodio y potasio) que se lo aplica directamente con una brocha sobre la superficie seca del hormigón; una vez que el líquido llega el fondo de la fisura reacciona con la cal y se forma el fluorsilicato cálcico insoluble que cierra la fisura de forma ascendente hasta la superficie.

4.3.1.3 Grapado

Consiste en la colocación de grapas de acero entre dos partes de un hormigón dividido por una fisura para así unir a las dos partes; este sistema no estanca a la fisura al menos que se realice un sellado. El procedimiento para la colocación de las grapas, estas deben estar en diferentes direcciones y situadas en las zonas sometidas a esfuerzos de tracción, es mediante un taladro que permite que las patas de la grapa queden dentro del hormigón que previamente fue perforado y en el que se coloca una resina epóxica o un mortero sin retracción, posteriormente se coloca una capa protectora que en la mayoría de los casos es un mortero. Para determinar la

cantidad de grapas, su diámetro, su longitud y el tipo de acero con el que serán fabricadas se deberá conocer el valor de los esfuerzos de tracción a los que está sometido el elemento a ser reparado.

4.3.1.4 Inyecciones

Consiste en la inyección de una formulación epóxi que al tener contacto con el hormigón lo suelda, este tipo de sistema tiene buenos resultados en fisuras muertas y de espesores mayores a 0.1 mm lo que hará que se logre obtener una continuidad en el hormigón que le permita resistir esfuerzos de tracción, compresión, flexión y corte; pero para esto se deberá analizar previamente las causas de la fisuración ya que si no se corrige los problemas de fisuración desde su inicio es muy probable que el hormigón se vuelva a fisurar por el mismo lugar o por un lugar muy cercano.

Además de la utilización de formulaciones epóxi se puede utilizar resinas de poliuretano, resinas acrílicas y poliéster insaturados; las condiciones para utilizar estos tipos de compuestos son: que penetren, se adhieran con facilidad en el hormigón, sean impermeables y resistan el ataque de álcalis del cemento.

En el caso de reparaciones de fisuras vivas mediante inyección se recomienda el uso de formulaciones epoxi flexibles que cumplirán la función de sellantes para impedir el paso del agua o agentes agresivos al interior del hormigón.

4.3.1.4.1 Proceso de inyección de fisuras

Antes de empezar con el proceso de inyección se debe realizar un sellado de la fisura que se lo puede realizar mediante tres procesos, se seleccionará el proceso de sellado dependiendo el espesor de las fisuras y el nivel de deterioro del hormigón como se indica en el cuadro 3.4.

Cuadro 4.4. Sistemas de sellado para el hormigón

| Sistema de sellado | Fisuras | Estado del hormigón | Material sellador |
|---------------------------|----------------|----------------------------|---|
| 1 | Estrechas | Sano | Cinta adhesiva de tejido de vidrio impregnado en epoxi |
| 2 | Medianas | Deteriorado | Masilla epoxi |
| 3 | Grandes | Muy deteriorado | Masilla epóxica cargada con un agente trioxotrópico, antes de su colocación se deberá realizar cortes en "v" de 1 cm de profundidad a lo largo de la fisura |

Una vez sellado el hormigón (en caso de haber utilizado masilla epóxica se debe esperar 24 horas hasta que se seque) se procede a la inyección de la formulación epóxica mediante boquillas de latón, aluminio o plástico, que son colocadas a lo largo de las fisuras a una distancia entre estas de 0.3m a 1m dependiendo la profundidad de las mismas y para el caso de fisuras ramificadas en los puntos de separación de las ramificaciones. Una vez que se ha terminado la inyección y la formulación se ha endurecido se retira el sellador superficial para obtener un mejor resultado estético; el éxito en el resultado final dependerá de la preparación, limpieza y exactitud en las dosificaciones,

así como también de la adherencia de la formulación epóxica al hormigón para lo que las fisuras deben estar secas en el momento de la reparación. Si no se puede eliminar el agua de las fisuras se deberá emplear formulaciones de viscosidad media o alta que sean compatibles con el agua.

La comprobación de la reparación de fisuras por inyección se la puede realizar mediante un ensayo destructivo como es la extracción de núcleos y un ensayo no destructivo como es la prueba de ultrasonido; una reparación bien hecha se considera aquella que ha tenido una penetración de por lo menos el 90% de la profundidad de la fisura. Aunque la reparación haya sido exitosa por seguridad se deberá considerar que el elemento reparado ha perdido alrededor del 25% de su resistencia.

4.3.1.5 Inyecciones con pasta de cemento y morteros

Consiste en la inyección de lechadas (agua y cemento) ó de morteros que tengan una baja relación agua/cemento para así evitar retracciones y aumentar la resistencia; este tipo de inyecciones se las realiza en fisuras muertas y de espesores grandes.

El procedimiento en este tipo de reparaciones es: limpiar el hormigón a lo largo de la fisura, colocar los inyectores, limpiar el interior de la fisura por medio de un soplado de aire a presión que ayudará también a comprobar el sellado, inyectar la fisura.

No se recomienda el uso de pastas de tipo químico porque se debe contar con equipos especiales para la realización de las reparaciones además de tener resistencias mecánicas bajas.

Capítulo 5

ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN

5.1 Introducción

Los parámetros fundamentales que se debe considerar al momento de realizar el diseño de una estructura son las acciones que actúan sobre la misma, ya que estas inciden directamente en la durabilidad, el servicio, la estabilidad y la resistencia, ahí la importancia de determinar la causa que origina la deficiencia ya que puede estar asociada a más de una acción.

Las acciones que actúan sobre una estructura pueden ser de origen externo o interno a ella, las que generan fenómenos de tipo físico, químico, mecánico o biológico las que pueden afectar las condiciones del comportamiento establecidas en el diseño. Todas las acciones están asociadas de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia, aunque siempre pueden ocurrir hechos excepcionales o accidentales.

5.1.1 Clasificación de las acciones sobre la estructura de hormigón:

5.1.1.1 Acciones Externas

- a) Funcionales: son consecuencia de la existencia o uso de la construcción, su manifestación genérica son las cargas equivalentes que consideramos actuando sobre ellas. Se clasifican de acuerdo a su variación en el tiempo en estáticas y dinámicas.

Los fenómenos relevantes que producen son generalmente de tipo mecánico que generan en la estructura solicitaciones, tensiones y deformaciones de distinto tipo y en un bajo porcentaje de tipo físico, químico y biológico.

- b) Ambientales: están relacionadas con el entorno donde se encuentra implantada la construcción, sólido, líquido o gaseoso y de su interacción.

Pueden ser equivalentes a una carga estática o dinámica, dependiendo de las características de la estructura.

5.1.1.2 Acciones Internas

- a) Intrínsecas: son cambios volumétricos que se manifiestan y que tienen características propias según los materiales utilizados, el proceso de construcción, los que de acuerdo a las restricciones internas o externas se traducen en esfuerzos o tensiones, que pueden afectar la durabilidad y además modificar el comportamiento de la estructura.
- b) Inducidas o compuestas: son deformaciones impuestas con objetivos específicos como mejorar el comportamiento estructural, la durabilidad o su condición de servicio. Existen casos en que las deformaciones son consecuencia del comportamiento reológico que tiene el hormigón que aumenta su deformación en el tiempo bajo cargas constantes.

5.1.1.3 Acciones accidentales o extraordinarias

Son acciones que no son tomadas en cuenta en las verificaciones de los estados últimos debido a su baja

probabilidad de ocurrencia. En la mayoría de los casos obedecen a causas naturales por lo que están ligadas directamente con el lugar de implantación.

5.2 Ciclos de congelamiento y deshielo

Es considerado uno de los mecanismos que más afecta al hormigón, sobre todo cuando se encuentra totalmente saturado; se producen tensiones en el hormigón, que pueden llegar a agotarlo, cuando no existen espacios libres disponibles cuando se produce cierta expansión por el incremento de volumen del agua. El incremento de volumen del agua está por alrededor del 9% con relación a su estado líquido, esta se congela en los poros del hormigón.

La presión en los poros capilares es mayor mientras menor es el diámetro de los poros, y mientras mayor sea esta presión menor será la temperatura de congelación, por lo que el agua que se congela primero es la que se encuentra en los poros capilares de mayor diámetro que además impiden la expansión del agua que se congela en los poros más finos; todo esto produce una presión hidráulica sobre las paredes de los poros que usualmente fisuran al hormigón.

La disgregación del hormigón en su mayor parte se debe a la concentración de sales de deshielo, normalmente de 3% y 4% en los casos más daninos, estas sales, al igual que los cloruros de sodio y calcio, la urea y el alcohol etílico, que se suelen utilizar para deshielo son en muchas ocasiones los responsables de los peores daños en el hormigón ya que provocan la disminución de la temperatura superficial del hormigón que genera tensiones que normalmente fisuran al hormigón.

Para que el efecto de los ciclos de hielo y deshielo no sea tan agresivo se recomienda:

- Realizar hormigones con aire incluido, se recomienda del 4% al 8%, los parámetros para determinar la cantidad de aire que se debe incluir en el hormigón son: espaciamiento entre burbujas, diámetro de las mismas,

frecuencia con las que se presentan las heladas y el tamaño máximo del agregado. Se emplean aditivos aireantes, usualmente el 0.20% del peso del cemento, que hagan que el espaciamiento entre burbujas sea menor cuanto mayor sea la exposición del hormigón a heladas.

- Utilizar agregados de baja porosidad, ya que poseen una buena deformación elástica.
- Utilizar agregados con una buena rugosidad superficial, para tener una buena adherencia pasta-árido.
- Los agregados deben estar limpios antes de realizar el hormigón.
- Construcción de estructuras con pendientes adecuadas, con drenajes y sin mayor número de juntas para así evitar que el agua se acumule sobre el hormigón.
- Utilizar cementos puzolanicos que en el futuro harán que el hormigón sea más impermeable.
- Relación agua cemento lo más baja posible.
- Tener control en el curado del hormigón para obtener resistencias bajas en edades tempranas y además tener geles que cierren los poros del hormigón.
- Se debe evitar el excesivo trabajo en el acabado superficial en el hormigón, además del sobrevibrado del hormigón que puede eliminar el aire incorporado.

Según especificaciones utilizadas en Sudamérica se recomienda una relación máxima agua/cemento de 0.45 y que la resistencia del hormigón $f'c$ mínima sea de 31 MPa ó 310 kg/cm².

Cuadro 5.1 Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado

| Tamaño máximo nominal del agregado | | Contenido en aire total en % (por volumen) | | | |
|------------------------------------|----------|--|---------------------|--------|----------|
| | | Naturalmente atrapado | Grado de exposición | | |
| mm | Pulgadas | | | Ligera | Moderada |
| 9.5 | 3/8 | 3.0 | 4.5 | 6.5 | 7.5 |
| 12.5 | 1/2 | 2.5 | 4.0 | 5.5 | 7.0 |
| 19.1 | 3/4 | 2.0 | 3.5 | 5.0 | 6.0 |
| 25.4 | 1 | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| 38.1 | 1/2 | 1.0 | 2.5 | 4.5 | 5.5 |
| 50.8 | 2 | 0.5 | 2.0 | 4.0 | 5.0 |
| 76.1 | 3 | 0.3 | 1.5 | 3.5 | 4.5 |

Ing. Manuel Fernández Cánovas. Hormigón. Séptima Edición Octubre 2004

5.2.1 Reparación de hormigones deteriorados por ciclos de congelamiento y deshielo

Consiste en retirar la capa de hormigón deteriorado y colocar un nuevo hormigón que tengan las mismas propiedades del hormigón viejo, para esto, se deberá conocer el contenido de cemento empleado, la relación agua cemento, los agregados utilizados, etc; con esto se lograra evitar fisuras por retracción térmica o hidráulica en la zona en la que se unen los dos hormigones. Para asegurar una buena unión entre el hormigón existente y el nuevo se deberá colocar un adhesivo epoxi, otra opción es colocar hormigones modificados con látex. Existen casos en los que el hormigón se encontrará tan deteriorado que la mejor opción será su demolición y sustitución por uno nuevo.

5.3 Ataque por fuego

Un incendio está compuesto por tres fases:

Primera fase: es la iniciación del incendio en la que existe una elevación gradual y rápida de la temperatura que depende del comportamiento de la combustión, de la carga y extensión del fuego.

Segunda fase: el fuego está en toda su plenitud, la magnitud del fuego dependerá de la cantidad del oxígeno aportado a la combustión por lo que el tamaño de los espacios donde se ha producido el incendio será un factor determinante. La duración de esta fase y la temperatura máxima alcanzada (que puede llegar hasta los 1250°C) dependen de la cantidad de combustible disponible

Tercera fase: se produce un descenso de la intensidad del incendio hasta su extinción debido a que se termina el combustible existente en el lugar o porque se ha logrado controlar el incendio.

El hormigón tiene una buena resistencia al ataque por ser un material no combustible lo que significa que no arde (no emite productos tóxicos, ni humo) y que posee un gradiente bajo de transmisión de calor, además de una conductividad térmica muy baja, por lo que no necesita una protección adicional, claro, esto dependerá del tiempo en que dure el ataque; pero se debe tener en cuenta que cuando la temperatura del hormigón aumenta disminuye su resistencia y módulo de elasticidad y además pierde adherencia con el acero de refuerzo

Se dice que un elemento ha alcanzado su temperatura crítica cuando su coeficiente de seguridad desaparece debido a que las tensiones, producidas por la acción del fuego, se igualan a su resistencia mecánica.

Normalmente se ven afectadas únicamente las capas superficiales del hormigón, hasta profundidades de 5 ó 10 cm, por lo que es importante hacer hormigones con recubrimientos de espesores adecuados y de baja permeabilidad para así evitar que el fuego llegue al acero de refuerzo, que es más sensible al ataque de fuego, ya que si esto llegare a pasar se transmitirá el calor del fuego de una manera acelerada. Además se debe considerar que cuando existe un aumento de temperatura el coeficiente de dilatación térmica del acero se hace treinta veces mayor al del hormigón (en condiciones ambientales son casi iguales $1,2 \times 10^{-5} \text{m/m}^\circ\text{C}$) lo que ocasiona tensiones

importantes que pueden provocar el desprendimiento del hormigón de recubrimiento dejando totalmente expuesto al acero.

La primera razón para el descascaramiento del hormigón es porque tiene un porcentaje alto de humedad durante el incendio, en la mayoría de ocasiones el agua que se utiliza para apagar el fuego, impide que el hormigón esté en equilibrio higrométrico.

Dependiendo la temperatura el hormigón y sus componentes empiezan a experimentar cambios:

- 100°C: empieza a evaporarse el agua que se encuentra en los poros capilares.
- 200°C a 300°C: mantiene su color gris, el hormigón no sufre alteraciones de ningún tipo, se pierde totalmente el agua que se encuentra en los poros capilares.
- 300°C a 400°C: el agua de gel de cemento se evapora lo que ocasiona fisuras superficiales en el hormigón, además de una pérdida apreciable en su resistencia (alrededor del 30%).
- 400°C: un porcentaje del hidróxido cálcico se transforma en cal viva, el hormigón puede llegar a perder hasta el 60% de su resistencia a la compresión.

Si el hormigón no ha estado expuesto a temperaturas mayores a 500°C y se lo rehidrata puede recuperar su resistencia hasta en un 90% en un año.

- 600°C: cambia su color de rosado a rojo, el hormigón se empieza a desintegrar debido a las tensiones internas que generan las dilataciones térmicas de los agregados -los agregados que contienen un porcentaje alto de sílice poseen un coeficiente dilatación térmica más alto-, el módulo de elasticidad desciende en un 80%, pierde su resistencia a la tracción.

- 900°C: adquiere un color gris claro con puntos rojizos, el hormigón se vuelve poroso y puede llegar a perder del 60% hasta el 90% de su resistencia a la compresión.
- Más de 900°C: adquiere un tono blancuzco amarillento o amarillo anaranjado, y pierde totalmente su resistencia y se desintegra fácilmente.

Dependiendo la penetración de la llama el hormigón experimentará diferentes grados de calcinación:

- Calcinación incipiente: aparecen micro fisuras y cuarteadas en mapa, mantiene su color.
- Calcinación superficial: fisuramiento térmico por alabeo, descarbonatación y coloración amarillenta.
- Calcinación avanzada: descarbonatación avanzada, descascaramiento, color gris claro.
- Calcinación muy avanzada: descarbonatación muy avanzada, desintegración del hormigón, color gris claro blancuzco.

Las recomendaciones para obtener un hormigón que resista de mejor forma al ataque del fuego son:

- Utilizar agregados con una buena granulometría con alto contenido de finos.
- Utilizar agregados que posean un bajo coeficiente de conductividad térmica, ya que son mejores aislantes cuando existen temperaturas altas.
- Utilizar áridos ligeros ó calizos.
- Utilizar cementos puzolánicos (fijan la cal liberada)
- Compactar bien el hormigón.
- Recubrimientos del hormigón de mayor espesor dependiendo de la probabilidad de fuego en la estructura, en el caso de que se utilicen agregados calizos el espesor se podrá disminuir en un 10%. En el caso de que el recubrimiento sea mayor de 4 cm se recomienda la colocación de una malla de armadura con separaciones máximas de 15 cm ó

armaduras complementarias para evitar el desprendimiento de hormigón.

- Proteger al hormigón mediante protecciones ligeras como: aminanto proyectado ($e = 2.5$ cm aprox.), verculita proyectada ($e = 3$ cm aprox.), capa de fibra de madera aglomerada con cemento portland ($e = 4$ cm aprox.), etc.

Para realizar una valoración de daños en las estructuras debido al ataque de fuego en primer lugar se debe realizar una inspección de la estructura para revisar la coloración del hormigón, el desprendimiento de recubrimientos y existencia de fisuras; después se procede a la realización de ensayos esclerométricos y ultrasónicos para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del hormigón; para conocer el estado del hormigón en su profundidad se puede realizar extracción de testigos de hormigón dañado con sonda.

5.3.1 Reparación de estructuras dañadas por fuego

Los sistemas de reparación deberán restaurar la capacidad resistente del elemento dañado, su durabilidad, y brindar protección contra el fuego. Las estructuras de hormigón armado dañadas por el ataque de fuego deben ser analizadas antes de proceder a tomar una decisión acerca de su reparación o de su demolición dependiendo de su nivel de deterioro, por lo que es fundamental realizar el análisis del estado resistente residual de la estructura.

Lo primero que se debe hacer es una inspección total de la estructura y de cada uno de sus elementos, con esto se definirán las magnitudes, características e influencias de los daños para así poder tener una relación costo/beneficio de la reparación a realizarse.

5.3.1.1 Materiales y aplicación de los mismos

5.3.1.1.1 Hormigón tradicional

La reparación con este material no tiene mayor complejidad, el procedimiento es el siguiente:

- Dejar una superficie rugosa y con la armadura vista, eliminando todo el hormigón suelto y con baja resistencia
- Limpiar el hormigón mediante un chorro de arena y después con agua para eliminar el polvo.
- Saturar el hormigón antiguo con agua, antes de colocar el nuevo
- Colocar el hormigón nuevo con una relación baja agua/cemento y una consistencia blanda lo que se logra mediante el uso de superfluidificantes.
- Curar al hormigón correctamente, para atenuar la retracción del mismo, ya que de producirse no permite que exista una buena adherencia entre el hormigón afectado y el nuevo.

5.3.1.1.2 Mortero de cemento Portland

El mortero, que debe ser lo más seco posible, se lo aplica a mano en espesores no mayores a 3 cm en superficies limpias para garantizar su adherencia.

5.3.1.1.3 Hormigón o mortero proyectado

Este tipo de morteros deben tener una dosificación alta de cemento y se deben utilizar agregados con un tamaño máximo no mayor a 3/4", además se recomienda la colocación de mallas de refuerzo con separaciones no mayores a 10 cm. Este material de reparación da buenos resultados debido a su buena adherencia al hormigón afectado, gran compacidad, buena resistencia, baja retracción y por las facilidades constructivas que brinda ya que no requiere de encofrados y se lo puede colocar sobre cualquier tipo de superficie.

5.3.1.1.4 Hormigón modificado con polímeros

Son hormigones en los que una parte del agua de amasado se ha sustituido por una emulsión estable de un polímero de agua; se caracterizan por ser más impermeables y por tener un módulo de elasticidad más bajo. Una gran desventaja de este material es que no tiene una buena resistencia al fuego debido a los polímeros que no resisten temperaturas superiores a los 300°C.

5.3.1.1.5 Hormigones y morteros de resinas sintéticas

Están compuestos por un aglomerante a base de resinas epoxi, poliéster, polituretano, etc; siendo las más usadas

las apoxídicas que brindan resistencias mecánicas más altas y baja retracción, aunque no tienen buena resistencia al fuego ya que se queman a temperaturas de 300°C, lo que tendrá como consecuencia un decremento considerable de la resistencia mecánica del hormigón si volviese a sufrir un ataque de fuego.

Una desventaja de este tipo de materiales es que poseen un coeficiente de dilatación térmica elevado lo que ocasiona pérdidas de adherencia con el hormigón existente cuando la temperatura aumenta.

5.3.1.1.6 Yeso

Es uno de los materiales más fáciles de aplicar y con buena adherencia al hormigón existente pero tiene la desventaja que no restaura la resistencia perdida por el hormigón, ni la durabilidad que ofrece el hormigón. No se recomienda su uso al menos que la estructura ya haya sido reparada con otro tipo de materiales, por lo que se lo debe utilizar como una capa protectora nada más.

Capítulo 6

ACCIONES QUÍMICAS

6.1 Ataque de ácidos

La pasta del cemento está constituida por sílice (carácter ácido débil) y cal (carácter básico fuerte) lo que hace que el hormigón sea vulnerable al ataque de cualquier tipo de ácidos, aún los débiles.

El ataque de ácidos al hormigón provoca su deterioro, comúnmente su disgregación, debido a la reacción entre los ácidos y todos los compuestos cálcicos del cemento Portland hidratado (hidróxido de calcio, silicato cálcico hidratado, y aluminato cálcico hidratado) que se convierten en sales cálcicas ácido actuantes; para proteger al hormigón, que carece de resistencia a su ataque, se debe realizar barreras resistentes e impermeables que impidan un contacto directo.

Los ácidos que atacan al hormigón pueden ser considerados inorgánicos u orgánicos según su naturaleza; los ácidos inorgánicos y minerales son: ácido clorhídrico, ácido brómico, ácido carbónico, ácido de cromo, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico, hidrógeno sulfurado, ácido nítrico, ácido sulfúrico, ácido sulfuroso; y los ácidos orgánicos son: ácido acético, ácido fórmico, ácido láctico, fenol, ácido tánico, ácido butílico, ácido úrico, microorganismos, ácido húmico.

La intensidad de ataque de los ácidos no dependerá de su concentración sino más bien de su Ph o potencial de hidrogeno que presenta la disolución da cada ácido como se indica en la siguiente tabla.

Cuadro 6.1 Agresividad de los ácidos

| Agresividad | Ph de la disolución del ácido |
|--------------------|--------------------------------------|
| Muy fuerte | menor a 4.5 |
| Fuerte | 5.5 - 4.5 |
| Débil | 6.5 - 5.5 |

La velocidad de degradación del hormigón depende de la solubilidad de la sal cálcica resultante, a mayor solubilidad mayor velocidad de deterioro, y por supuesto de la agresividad del ácido.

Cuadro 6.2 Efecto de sustancia químicas comunes en el concreto

| Velocidad de ataque a temperatura ambiente | Ácidos inorgánicos | Ácidos orgánicos | Soluciones alcalinas | Soluciones Salinas | Varios |
|---|---|------------------------------|--|---|--|
| Rápida | Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico | Acético Fólico Láctico | | Cloruro de Aluminio | |
| Moderada | Fosfórico | Tánico | Hidróxido de sodio < 20% | Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Cianuro de sodio | Bromo (gas) Sulfito líquido |
| Lenta | Carbónico | | Hidróxido de sodio 10-20% Hipoclorito de sodio | Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cloruro de sodio | Cloro (gas) Agua de mar Agua dulce |
| Despreciable | | Oxálico Tartárico | Hidróxido de sodio 10-20% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio | Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio | Amoniaco líquido |

Ing. Diego Sánchez de Guzmán. Durabilidad y Patología del concreto.

Las sustancia que se encuentran en el medio ambiente y de las cuales se pueden llegar a formar ácidos son:

- Combustibles, contiene gases sulfurosos que con la humedad forman ácido sulfúrico
- Aguas industriales, aguas residuales o negras que contienen o forman ácidos
- Suelos que contengan turbas, contiene sulfuro de hierro que al oxidarse produce ácido sulfúrico
- Aguas de regiones montañosas, contienen bióxido de carbono libre suelto ó ácidos orgánicos
- Ensilajes agrícolas, industrias manufactureras o de procesamientos, la mayoría contienen ácidos orgánicos

Las recomendaciones para disminuir el deterioro del hormigón debido al ataque de ácidos son:

- Hormigones de baja permeabilidad
- Utilizar agregados calizos para neutralizar el ácido
- Aumentar el recubrimiento del hormigón, como hormigón de sacrificio
- Colocar recubrimientos protectores como pinturas especiales

6.2 Ataque de sulfatos

El ataque de sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio producen un deterioro del hormigón mediante dos reacciones químicas: la combinación de sulfatos con hidróxido de calcio (cal libre) que forman sulfato de calcio (yeso) y la combinación de yeso con aluminato hidratado de calcio que forman sulfoaluminato de calcio (entrigita). El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

El cemento en su composición tiene sulfato cálcico, proveniente de la combinación del clinker y yeso, que regula la velocidad de fraguado pero no

ocasiona ningún daño al hormigón; esto se debe a que cuando reacciona con el aluminato tricalcico del cemento la pasta de cemento está en estado plástico por lo que su expansión no produce tensiones en el hormigón porque no está endurecido.

Los sulfatos se encuentran en el suelo, disueltos en el agua freática o en la atmósfera, empiezan a deteriorar al hormigón cuando su concentración aumenta debido a su acumulación en la superficie, pueden llegar a aumentar el volumen del hormigón sólido hasta en un 18%. Los factores que determinan la agresión de los sulfatos en el hormigón son: las condiciones de exposición del concreto (cantidad de sustancias agresivas), la presencia de humedad, su permeabilidad, la composición del cemento y la temperatura.

La mayor parte de sulfatos que atacan en el hormigón son provenientes de: agua de mar, microorganismos que se encuentran en la superficie del hormigón, aguas residuales domésticas e industriales, abonos naturales para el suelo y lluvias ácidas de zonas industriales contaminadas. En lo referente al ataque por aguas sulfatadas la agresión será mayor cuando el agua se encuentre en movimiento ya que acelera el lavado del cemento, lo mismo ocurre con el agua sulfatada de suelos arenosos en los que el agua se puede mover más fácilmente que en otro tipo de suelos. En el caso de aguas estancadas son consideradas nocivas las que contienen más de 0.5% de SO_3 .

Cuadro 6.3 Contenido de agua en los sulfatos

| Agresividad | SO_4^{-2}(mg/l) |
|--------------------|--|
| Nula | 0 - 150 |
| Débil | 150 - 1000 |
| Fuerte | 1000 - 2000 |
| Muy fuerte | > 2000 |

Ing. Manuel Fernández Canovas. Patología y Terapia del hormigón armado. Tercera Edición

El ataque de los sulfatos produce los siguientes daños en el hormigón:

- Cambio de coloración

- Microfisuras y fisuras entrecruzadas vivas
- Reducción de su resistencia mecánica por pérdida de cohesión en la pasta de cemento
- Pérdida de adherencia entre la pasta de cemento y los agregados
- Delaminación del hormigón
- Desagregación del hormigón

Las recomendaciones para disminuir el deterioro del hormigón debido al ataque de sulfatos se basan en el uso del cemento y son:

- Utilizar cementos puzolánicos o cementos siderúrgicos con contenidos de escorias (se consideran de alta resistencia los que tienen un contenido mínimo de escorias del 65%)
- Utilizar cementos resistentes a los yesos, con menor cantidad de aluminato tricálcico. Según la ASTM los cementos de resistencia moderada son los que tienen un contenido máximo en C_3A del 8%, y los de resistencia alta del 5%. La desventaja de utilizar estos cementos es que los hormigones son más permeables a los iones cloro, pudiendo llegar a producirse la corrosión.
- Dosificar el hormigón con una relación agua/cemento baja
- Compactar correctamente el hormigón
- Curar el hormigón

6.2.1 Agua del mar

El agua de mar contiene sulfatos de calcio, magnesio y sodio que al reaccionar con el aluminato tricálcico y cloruros solubilizan la cal; los cloruros atenúan la acción de los sulfatos al formar cloroaluminato no expansivo además se forma una capa protectora proveniente del hidróxido magnésico en el hormigón.

El ataque del agua de mar se ve agudizado debido a la erosión por las olas que arrastran arenas lo cual provoca la eliminación de productos

solubles que hace que haya un aumento y renovación de las superficies del hormigón en contacto.

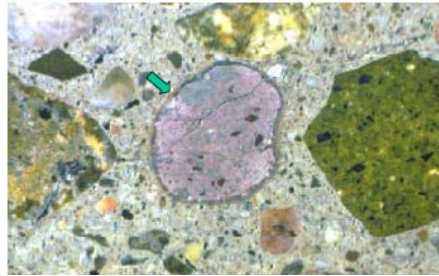
Existen tres zonas en las estructuras de hormigón atacadas por agua de mar:

- Zona totalmente sumergida: hay corrosión del acero.
- Zona de oscilación de nivel de agua: es la zona más afectada debido a que se producen ciclos de mojado y secado, existiendo una saturación con entumecimiento del hormigón y posteriormente una desecación que cristaliza las sales en los poros, para nuevamente saturarse, llenar los poros y aumentar la concentración de sales; además se producen tensiones internas como resultado de la expansión de los cristales formados que dañan al hormigón. Sufre deterioros por erosión debido a las olas que arrastran arenas.
- Zona de evaporación: en esta zona el agua asciende por capilaridad; se ve afectada por la evaporación de aguas agresivas en contacto con el aire. La velocidad del aire, porosidad del hormigón, el acabado superficial del mismo, la distancia entre la superficie de evaporación y la superficie mojada y las propiedades del agua son los factores que harán que la evaporación sea más rápida o lenta. Se producen expansiones debido a la concentración de sales y erosión debido a las olas.

6.3 Reacción álcali agregado

La reacción álcali agregado se produce bajo ciertas condiciones del medio ambiente, que ayudan a que los álcalis, provenientes del cemento, agregados o de agentes externos, y los componentes reactivos que tienen cierto tipo de agregados formen un gel que provocan la degradación, expansión, el fisuramiento del hormigón y finalmente su desintegración. Existen ocasiones

en las que parte del gel sale del hormigón a través de las fisuras en forma de gotas de gel blanco sobre la superficie del hormigón.



Se debe realizar una evaluación de los tipos de agregados y de los minerales que se encuentran en los mismos para conocer su grado de reactividad; los agregados potencialmente reactivos son: vidrios volcánicos, riolitas, latitas, dacitas, traquitas, grawacas, areniscas, argilitas, calizas dolomíticas, filitas, gnesis. Los minerales potencialmente agresivos son: cuarzo, ópalo, calcedonia, trimidita, cristobalita, andesita, heulandita, dolomita.

Para identificar y verificar el carácter reactivo de los agregados Se deben realizar ensayos como:

- Análisis petrográfico.
- Determinación de la reactividad álcali-agregado mediante el Método Químico ASTM C 289.
- Determinación de la reactividad álcali-agregado mediante el Método de Barras de Mortero ASTM C 227.
- Procedimiento de Prueba acelerados como el Método ASTM C 1260.

Si se utilizan áridos reactivos el porcentaje de álcalis en el cemento no deberá ser mayor al 0.6%

Cuadro 6.4 Niveles de riesgo para que se produzca la reacción álcali – agregado

| Nivel de Riesgo | Condición de la solución en los | | Condición de los gregados | | Condición de exposición del concreto | |
|-----------------|---------------------------------|---------------|---------------------------|---------|--------------------------------------|------|
| | Altos álcalis | Bajos álcalis | Reactivos | Inócuos | Húmedo | Seco |
| Riesgo alto | x | | x | | x | |
| Riesgo medio | x | | x | | | x |
| Riesgo bajo | | x | x | | x | |
| Sin riesgo | x | x | | x | | x |

Ing. Manuel Fernández Canovas. Patología y Terapia del hormigón armado. Tercera Edición

En lo que respecta al uso de cemento se recomienda utilizar cementos con adiciones, ya que se ha comprobado que reducen la velocidad de expansión de 100 a 1000 veces como es el caso de los cementos con contenidos de escorias o de puzolanas y se obtienen hormigones más impermeables; además de esto se deberá dar un adecuado curado al hormigón.

Los daños que se producen en el hormigón dependerán del contenido de álcalis del cemento, dosificación de cemento, el tamaño y cantidad de los áridos, la porosidad del hormigón, la presencia de agua, la humedad, el contenido de álcalis en el agua de amasado, el uso de aditivos.

Las recomendaciones para evitar daños en el hormigón debido a la reacción álcali – agregado son:

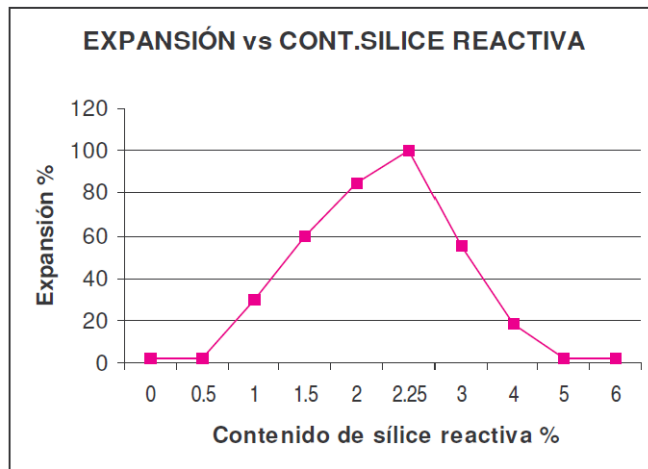
- Limitar el contenido total de álcalis en el hormigón
- Emplear cementos de bajo contenido en álcalis
- Cambiar el tipo de áridos por otro no reactivo
- Limitar el grado de saturación del hormigón, se lo puede hacer mediante membranas impermeables.
- Hormigones con una baja relación agua/cemento para obtener hormigones más permeables y más resistentes
- Inclusión de aire en el hormigón

6.3.1 Tipos de reacciones álcali-agregado

6.3.1.1 Reacción álcali – sílice

Esta reacción ocurre entre los dos y los cinco primeros años del hormigón, siendo la responsable del fisuramiento del hormigón debido a la reacción entre los hidróxidos alcalinos del hormigón con los agregados que contienen sílice que forman silicatos alcalinos en el gel de cemento que se expande al absorber agua. Los factores determinantes para la expansión son la reactividad potencial de los agregados, la cantidad y granulometría de los agregados reactivos, el tipo de cemento, la concentración de álcalis en los poros del hormigón endurecido, temperaturas altas y humedades relativas mayores al 80%. Hay que considerar que no porque se utilice una cantidad mayor de agregados reactivos se va a tener una mayor expansión, ya que se ha demostrado que con cantidades mínimas de agregado reactivo se pueden producir las mayores expansiones como se muestra en la siguiente figura.

Grafica 6.1 Ejemplo de expansión vs contenido de sílice



Fuente Hobbs 1988.

Las características de los daños de esta reacción son la lixiviación de productos cristalinos, hinchamiento de zonas locales, fisuración en mapa y finalmente la desintegración del hormigón; los daños antes mencionados traen como consecuencia una pérdida significativa de la resistencia mecánica del hormigón así como un descenso de su módulo de elasticidad.

6.3.1.2 Reacción álcali – silicato

Este tipo de reacción es muy lenta y se produce entre ciertas rocas silíceas y los álcalis del hormigón; los tipos de rocas vulnerables a esta reacción son aquellas con un alto contenido de minerales de arcilla.

6.3.1.3 Reacción álcali – carbonato

Esta reacción ocurre entre agregados del tipo dolomita y los álcalis del hormigón, consiste en la formación de brucita y en la regeneración de álcalis; cuando hay la presencia de humedad el álcali aumenta su volumen y se producen esfuerzos de tracción que provocan fisuración en mapa, fatiga y finalmente la desintegración del hormigón. Además se producen expansiones en el interior de las rocas reactivas fisurando en algunas ocasiones a las mismas. Esta reacción presenta sus síntomas a edades tempranas desde los dos meses hasta el primer año de vida útil de la estructura.

Las recomendaciones para evitar este tipo de reacciones son:

- Evitar el uso de dolomitas que sean potencialmente reactivas
- Reducir el tamaño máximo de los agregados reactivos
- Reducir el contenido total de álcalis en el hormigón

6.4 Lixiviación por aguas blandas o puras

Las aguas blandas son aquellas que tienen pocas impurezas, este tipo de aguas disuelven los compuestos cálcicos del hormigón lo que provoca la descomposición, porosidad y lixiviación de la pasta de cemento endurecida, que tiene como resultado final la pérdida de la resistencia mecánica y desintegración del hormigón.

La mayor parte de este tipo de aguas proviene de deshielos, de lluvias en zonas no industriales, de plantas de desalinización de agua de mar ó de plantas de destilación y la agresividad con la que actúan en el hormigón depende de su pureza y de su movimiento que permite una continua renovación del agua en contacto con el hormigón

El proceso de lixiviación en el hormigón es continuo, el cemento hidratado se puede llegar a descomponer y el hormigón puede llegar a transformarse en: áridos, sílice hidratada, óxido de hierro y alúmina; además los poros del hormigón aumentan su tamaño y número dejando al hormigón más vulnerable a los próximos ataques, esto ocurre debido a la disolución y eliminación por lavado de la cal liberada.

Las recomendaciones para atenuar los daños en el hormigón debido a la presencia de aguas puras son:

- Uso de cementos portland con adiciones de puzolanas que impiden el lavado de la cal por aguas puras, o de escorias básicas de altos hornos.
- Buena compactación del hormigón para fijar la cal.
- Proteger a los elementos mediante un tratamiento superficial

6.5 Carbonatación

Es un tipo de reacción ácida que influye directamente en la durabilidad del hormigón, provoca una contracción volumétrica en el hormigón que hace comúnmente que el hormigón superficial aumente su resistencia pero afecta al hormigón porque hace que el pH del hormigón descienda despasivando al acero de refuerzo; este fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono o anhídrido carbónico del aire atmosférico o del suelo, penetra por difusión en los poros del hormigón.

El CO_2 está presente en el aire rural en contenidos aproximados de 0.03% por volumen, en el caso de ciudades grandes puede llegar a ser de 0.3%, y en el caso de ciudades muy contaminadas hasta valores de 1%.

La carbonatación debido a la presencia de CO_2 en el suelo, se debe a la presencia de dióxido de carbono en aguas freáticas (mayores a 10 mg/l (ppm)), aguas lluvias, o a través del ácido húmico que se forma por la descomposición de la materia orgánica.

El mayor daño que se produce con la carbonatación es que el hormigón deja de ser un elemento protector para la corrosión del acero, aunque eso no significa que necesariamente este corroído, ya que para que el acero se corroa es necesario además un aporte de oxígeno y la presencia de agua como medio conductor.

Las consecuencias positivas que tiene la carbonatación en el hormigón son: reduce la porosidad del hormigón ya que el CaCO_3 ocupa un volumen mayor que el Ca(OH)_2 al que reemplaza y además proporciona una mayor resistencia superficial en el caso de hormigones con cemento Portland.

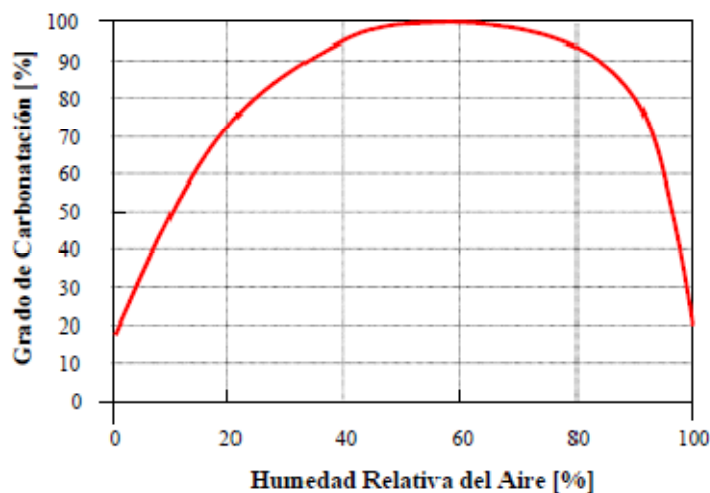
El orden en el que se presentan los fenómenos en la carbonatación son:

- El gas carbónico se disuelve en los poros y reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto produciendo ácido carbónico.
- El ácido carbónico, convierte el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 en carbonato de calcio (CaCO_3) y agua.

- El PH de la capa superficial del hormigón baja de 12-13 a 9, el hormigón pierde su basicidad y deja de ser una protección para el acero.
- Debido a la disminución en el volumen de la pasta de cemento se produce una retracción adicional en el hormigón, conocida como retracción por carbonatación.

Los factores que inciden para el aumento de la agresividad de la carbonatación en el hormigón son: cantidad de CO₂ en el ambiente, hormigones permeables, temperaturas elevadas, humedad entre 65% y 98%, cambios bruscos de humedad. Se debe tener en cuenta que no existe carbonatación cuando el hormigón permanece siempre seco o saturado; en el caso en el que el hormigón se encuentra saturado el agua que llena los poros y capilares del hormigón impiden el ingreso del CO₂

Grafico 6.2 Grado de carbonatación del hormigón en función humedad relativa atmosférica



E. Becker 2003, Seminario Durabilidad del hormigón

La profundidad de la carbonatación es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, se aplica la ley de difusión de Fick. Se debe considerar el avance del frente de carbonatación no es lineal debido a la presencia del agregado grueso y además que la ecuación no es aplicable si las condiciones de exposición no son estacionarias, es decir, si se presentan variaciones de humedad.

$$x = k\sqrt{t}$$

Donde:

x= profundidad del frente de carbonatación, en mm

k= coeficiente de carbonatación, en mm/año que depende de la relación agua/cemento.

t= tiempo transcurrido en años

La velocidad de penetración de la carbonatación en un inicio es rápida alcanzando unos milímetros en cada año pero conforme pasa el tiempo se vuelve lenta, pudiendo alcanzar 5 cm en 100 años si es un hormigón que se encuentra en buen estado.

Las recomendaciones para evitar y atenuar la carbonatación en el hormigón son:

- Utilizar relaciones agua/cemento menores a 0.5
- Curado adecuado del hormigón durante un mayor tiempo
- Utilizar cementos Portland
- Compactación de la capa superficial del hormigón
- Construcción de los elementos con recubrimientos adecuados para tener un mayor tiempo de protección para la armadura de acero

La solución para los problemas de carbonatación es repicar el hormigón dañado por medios mecánicos o manuales hasta la armadura de acero, y volver a realizar el recubrimiento; en caso de que el acero de refuerzo este corroído se deberá hacer refuerzos en los elementos.

Capítulo 7

CORROSIÓN

7.1 Introducción

Las normas ASTM definen a la corrosión como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal, y su medio ambiente que produce un deterioro del material y de sus propiedades”

En el caso de la corrosión del acero embebido en el hormigón se produce una reacción electroquímica que ocurre en fase acuosa en la que existe una transferencia de electrones e iones y está influenciado por las características propias del hormigón; los hormigones con una alta relación agua/cemento y una elevada porosidad son más vulnerables a que se produzca este fenómeno. El hormigón, en buen estado, de buena calidad y con recubrimientos apropiados, brinda a la armadura embebida en él una protección eficiente contra la corrosión de dos formas: la primera es el proceso de pasivación del acero, que consiste en la formación de una capa de óxido alrededor de la armadura debido a la alcalinidad del hormigón ($\text{pH}=13$) y a la presencia de oxígeno en el mismo; y la segunda que impide la carbonatación y la penetración de agentes agresivos. La pasividad actúa como medio protector ya que en esta la velocidad de corrosión es casi nula, aunque puede llegar a perderse debido a dos mecanismos que son: ataque por cloruros y pérdida de la alcalinidad del hormigón.

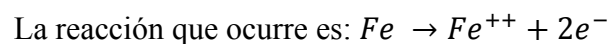
La corrosión electroquímica se produce cuando se forma una celda electroquímica compuesta por:

- a) Un ánodo donde ocurre la oxidación
- b) Un cátodo donde ocurre la reducción

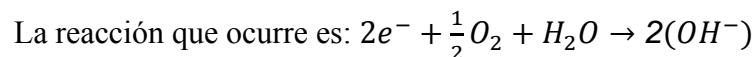
- c) Un conductor metálico (la varilla), donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- d) Un electrolito (el hormigón), donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso

La corrosión se descompone en dos procesos:

1. Proceso anódico: en el que se disuelve el hierro que libera electrones, además se debe romper la capa pasiva para que se produzca el proceso.



2. Proceso catódico: los electrones liberados en el proceso anódico se combinan en el cátodo con el oxígeno y agua, formando iones oxidrilo, que a través de un proceso complejo forman óxido de hierro, no es necesario que la capa pasiva se destruya para que se produzca este proceso.



Posteriormente los iones de hierro y oxidrilo se combinan para formar óxido de hierro (Fe_2O_3).

Los productos de oxidación al estar casi siempre hidratados hacen que la presencia de agua sea únicamente necesaria para que se produzca el proceso electrolítico. Se debe considerar además que la corrosión en la práctica se produce en humedades relativas entre el 50% y valores próximos a la saturación, si el hormigón llega a saturarse no se produce corrosión.

Debido a la formación de óxido de hierro el acero original se expande pudiendo ocupar de dos a siete veces su volumen original, esto depende de si la disponibilidad de oxígeno es baja o alta (a mayor disponibilidad de oxígeno mayor será la expansión), lo que induce a esfuerzos radiales internos de tracción que deforman al concreto que rodea las varillas ya corroídas que ocasionan el fisuramiento del hormigón.

Los efectos que tiene la corrosión sobre el hormigón son: expansión del acero de refuerzo, fisuración interna y externa del hormigón, reducción de la resistencia mecánica del hormigón, disminución de la adherencia entre el

acero y el hormigón y el efecto más perjudicial es la reducción de sección del acero de refuerzo debido a descascaramientos y formación de vacíos.

Las recomendaciones generales para evitar la corrosión en el hormigón armado son:

- Recubrimientos adecuados en los elementos estructurales
- Relación agua/cemento baja (no mayor de 0.5)
- Considerar formas y detalles constructivos, especialmente los ángulos
- Compactación correcta del hormigón
- Curado suficiente
- Limitar el ancho de fisuras y juntas

7.2 Factores que inciden en la corrosión del acero de refuerzo

7.2.1 Pérdida de alcalinidad en el hormigón

La alcalinidad es la medida de la capacidad química de una solución acuosa para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base, al determinar la alcalinidad se puede conocer exactamente las concentraciones de los iones de bicarbonato y de carbonato.

La alcalinidad del hormigón es un factor determinante en la capacidad del mismo para resistir ambientes ácidos, está ligada directamente con la carbonatación del hormigón, que dependerá del tipo de cemento utilizado y de los agregados. La pérdida de la pasividad del acero, consecuencia de la disminución del pH del hormigón, ocurre como resultado de la lixiviación de las sustancias alcalinas.

7.2.2 Ataque por cloruros

Los iones cloro se transportan por difusión a través de los poros llenos de agua, cuando existe una concentración crítica llegan a destruir la

capa pasivante del acero de forma puntual provocando una corrosión por picadura que se va extendiendo en profundidad y puede llegar a causar el seccionamiento de las varillas de acero y de los alambres de pretensado.

El riesgo de corrosión dependerá de la humedad del medio y del tipo de cemento empleado, el hormigón puede verse gravemente afectado por la presencia de cloruros, aunque tenga un PH mayor a nueve, la mayor afectación se produce en los ciclos de humedecimiento y secado; durante el mojado el agua con cloruros penetra en el hormigón por succión capilar, y durante el secado los cloruros continúan en los poros del concreto.

En este fenómeno la reducción de la sección de acero se debe a que se ha iniciado el proceso anódico como consecuencia de la rotura de la capa pasivadora por picaduras locales en el acero.

El tiempo que tardan los iones cloro en alcanzar a la armadura depende principalmente de la concentración de cloruros por lo que se recomienda que:

- El contenido máximo de cloruros sea de 0.4% con respecto al peso del cemento en el hormigón armado y de 0.2% en el hormigón pretensado.
- El agua de amasado no podrá tener más de 3g-l de iones cloro en el hormigón armado y de 1g-l en el hormigón pretensado.
- El uso de aditivos a bases de cloruro de calcio no deberá sobrepasar el 2% en el hormigón en masa.

Además en todo el proceso tiene mucha influencia la calidad del hormigón, es decir, el tipo y dosificación del cemento, el contenido de aluminato cálcico, la relación agua/cemento, el vibrado, el curado, la temperatura, el espesor y la cantidad de fisuras en el hormigón.

Tabla 7.1 Máximo contenido de ión cloruro, para protección contra la corrosión

| Tipo de elemento | Máximo contenido del ión cloruro (Cl), en el concreto como % del peso del cemento |
|---|--|
| Hormigón presforzado | 0.06 |
| Hormigón presforzado expuesto al cloruro en servicio | 0.15 |
| Hormigón reforzado expuesto que estará seco o protegido de la humedad en servicio | 1 |
| Otros tipos de construcción en hormigón reforzado | 0.3 |

Ing. Manuel Fernández Cánovas. Patología y Terapia del hormigón armado. Tercera Edición

7.2.3 Permeabilidad del recubrimiento

La permeabilidad del hormigón es un factor determinante para la corrosión del acero ya que el oxígeno y los cloruros, se difunden a través del recubrimiento del hormigón por medio de las fisuras, los procesos de difusión son:

- Difusión de O_2 en los poros del concreto llenos o parcialmente llenos de aire lo que produce corrosión.
- Difusión del CO_2 en los poros del concreto llenos o parcialmente llenos de aire lo que produce carbonatación.
- Difusión de iones cloro Cl en los poros del concreto llenos o parcialmente llenos de agua lo que produce penetración y concentración de cloruros lo que produce aceleración de la corrosión.

Las recomendaciones para que el hormigón sea menos permeable son:

- Relación agua/cemento menor de 0.6 para aumentar la hermeticidad.
- Buena compactación, mediante una adecuada vibración, para evitar la segregación del hormigón.
- Curado adecuado durante las primeras horas de fraguado del hormigón especialmente, ya que en este tiempo se produce el

primer secado del hormigón que hará que el hormigón se endurezca con mayor facilidad.

7.2.4 Espesor del recubrimiento

El espesor del recubrimiento es importante debido a la profundidad de carbonatación que es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo según la ley de Fick; lo que significa que si se llega a disminuir el espesor del recubrimiento a la mitad se requerirá la cuarta parte del tiempo para que se produzca la corrosión. El valor mínimo recomendado para recubrimiento es de 3.5 cm ya, que según esta ley, el riesgo de corrosión es mas crítico mientras menor sea el recubrimiento sobre el acero

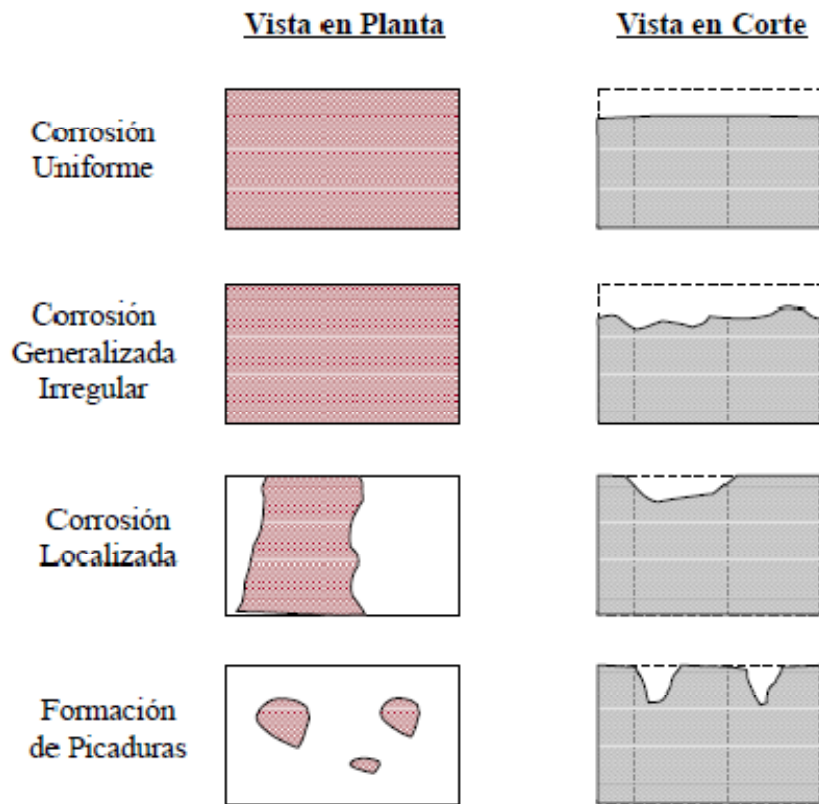
7.2.5 Despasivación en el área de fisuras

El ingreso de oxígeno y cloruros, así como el avance de un frente de carbonatación es mayor cuando el hormigón se encuentra dañado y presenta fisuras y/o oquedades. Las fisuras longitudinales a la armadura son las que más afectan al hormigón ya que siempre existe desprendimiento del mismo debido a que la corrosión no queda confinada como en el caso de fisuras transversales.

7.3 Tipos de corrosión electroquímica

Se clasifican de acuerdo a la manera en que se produce la corrosión del acero y a su apariencia.

Gráfico 7.1 Esquema de la morfología de la corrosión



C. Andrede. 1988 Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de las armaduras

7.3.1 Corrosión Uniforme o Generalizada

Es un proceso que abarca a todo el acero que se encuentra corrido de manera homogénea y en toda su superficie, dando paso a la formación de herrumbre y a un aumento de volumen que genera tensiones internas en el hormigón.

La corrosión uniforme se produce como consecuencia de la pérdida generalizada de la película pasivadora, por un descenso del pH, como consecuencia de carbonatación, presencia excesiva de iones de cloruro y/o lixiviación de la pasta de cemento del hormigón debido a aguas puras o al ataque de ácidos.

7.3.2 Corrosión localizada

Se da únicamente en determinadas áreas del acero debido al incontinuo acceso del oxígeno. Un caso común de este tipo de corrosión es el del acero de refuerzo con revestimiento epóxico, que se produce cuando ha existido un deterioro en su adherencia o por la presencia de iones cloros que se localizan entre el recubrimiento y el acero.

7.3.3 Corrosión por picaduras

Es un tipo de corrosión localizada, con picaduras estrechas y profundas, en que la película pasivadora se destruye por varias razones como heterogeneidades, diferencia de la composición del metal o presencia de iones cloruro.

7.3.4 Corrosión bajo esfuerzo

Se produce cuando existen esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo, normalmente sucede en hormigones preesforzados en los que el acero es de alta resistencia. El proceso anódico se inicia por una picadura que va profundizando la fisura debido a tensiones elevadas permanentes que provoca la fisuración del acero y posteriormente su falla de tipo frágil a la que se le conoce como corrosión fisurante bajo tensión.

7.3.5 Fragilización por hidrógeno

Dentro del proceso catódico, cuando se producen ciertas y determinadas circunstancias, penetran átomos de hidrógeno dentro del acero que al convertirse en hidrógeno molecular producen elevadas presiones internas que dan lugar a fisuras en el acero.

7.3.6 Corrosión galvánica o bimetalica

Se produce cuando dos metales diferentes están embebidos en el mismo medio electrolito.

Se puede llegar a producir en los siguientes casos:

- Al dañarse una zona o no formarse la película pasivadora, esta actuará como un ánodo frente al resto del material.
- Cuando solo una parte de las varillas se han corroído debido al ataque de cloruros
- Cuando el acero está en contacto con otros conductores

7.4 Daños causados por corrosión en la armadura

En estructuras situadas en medios agresivos es probable que estas se debiliten debido a la formación de fisuras, provocadas por tensiones originadas por la herrumbre expansiva, que se encuentran en la misma dirección de la armadura de acero, que producen desprendimiento del recubrimiento del hormigón y la pérdida progresiva de sección de la armadura de acero. Lo que tiene como consecuencia la reducción de la capacidad resistente de la estructura.

Al perderse la sección de los estribos, las barras principales quedan sin sujeción lo que hace que se pandeen sin tener una contribución resistente al elemento estructural, esto exige que se realicen anualmente un número alto de reposiciones de acero sobre todo en los países industrializados lo que

representa una alta inversión ya que los trabajos de reposición son difíciles de realizar y tienen un costo muy elevado.

Los daños se pueden clasificar en cuatro niveles para estructuras expuestas a un medio agresivo:

- Nivel A: La pérdida de sección de las varillas principales es de 1 por 100. Aparición de fisuras longitudinales en las esquinas coincidiendo con la posición de las barras y no transversales en el plano de los estribos.
- Nivel B: La pérdida de sección de las varillas principales es de 5 por 100. Desprendimiento de hormigón de las esquinas de pilares y vigas, además la aparición de de fisuras coincidiendo con el plano de los estribos. El hormigón pierde adherencia debido a la capa de herrumbre formada en las varillas principales.
- Nivel C: La pérdida de sección de las varillas principales es de 25 por 100. El hormigón de la zona de estribos se desprende y estos quedan al aire libre. Pérdida de anclaje y a la profundidad de un centímetro el hormigón se debilita como consecuencia de la corrosión.
- Nivel D: Rotura de los estribos. Las varillas principales no trabajan a tracción y pandean.

7.5 Protección contra la corrosión de las armaduras

7.5.1 Protección natural

La protección química se debe a la naturaleza alcalina del cemento que pasiva al acero, mientras que la protección física se sostiene en la fabricación de un hormigón de alta calidad, es decir, compacto, impermeable y con un recubrimiento adecuado.

Se debe tener en cuenta la importancia de los materiales, que no provengan de medios marítimos, y si ese es el caso lavarlos con agua dulce; el agua de amasado debe ser potable. El cemento de preferencia debe ser portland ya que su alcalinidad es elevada y el efecto pasivador es mucho más fuerte. No se deben utilizar aditivos que posean cloruros ni sales ya que pueden aumentar la conductividad del hormigón en presencia de humedad.

La importancia del espesor del recubrimiento, que debe ser mínimo de 3.5 cm, se debe a la velocidad del frente de carbonatación para que no logre alcanzar las varillas de acero.

7.5.2 Protecciones complementarias

Debido a la agresividad del medio en el que se encuentra la estructura se debe implementar protecciones preventivas que pueden actuar directamente sobre el acero o el hormigón

7.5.3 Protección catódica

Esta protección trata de evitar procesos anódicos en el acero, haciendo que el acero se sitúe en una zona de inmunidad. Esta protección

aprovecha el mismo principio electroquímico de la corrosión, transportando un gran cátodo a una estructura metálica, que puede estar enterrada o sumergida. Para lograr esto es necesaria la utilización de fuentes de energía externa mediante el uso de ánodos galvánicos, que difunden la corriente suministrada por un transformador-rectificador de corriente.

El mecanismo, consecuentemente implicará una migración de electrones hacia el metal a proteger, los mismos que viajarán desde ánodos externos que estarán ubicados en sitios plenamente identificados. Se somete a la pila galvánica a un potencial de signo contrario con lo cual al anular la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo no habrá flujo de corriente y la corrosión se interrumpirá. Las armaduras de acero actúan como cátodo y como ánodo se emplean hilos platinados, de fibra de carbono protegidos con polímeros, mallas metálicas de polímeros conductores que llevan embebidas hilos de cobre, o hilos recubiertos de niobio, titanio, etc.

La corriente eléctrica para mantener una protección catódica es muy pequeña, del orden de una fracción de miliamperio por metro cuadrado por superficie de hormigón, esto debido a que normalmente en estructuras de hormigón la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo esta entre 20 y 50 mv.

Esta protección tiene un elevado costo y se requiere especial cuidado en la interconexión eléctrica entre las distintas barras además de un mantenimiento periódico de la instalación.

7.5.4 Galvanización

Se lo realiza por inmersión del acero en un baño de zinc a 450 grados centígrados, lo que forma un recubrimiento de las barras formado por una aleación de zinc y hierro. Se debe tener en cuenta que el zinc se encuentra en una fase de corrosión con un pH de 12.6 lo que provoca

la corrosión de la capa protectora que no sufrirá mayores expansiones de volumen sin generar fisuras en el hormigón.

La Galvanización tiene la desventaja que puede dar lugar a la fragilización por hidrógeno y además no es aconsejable el uso de este tipo de protección en hormigones fabricados con cementos con alto contenido de álcalis o en hormigones expuestos al ataque de cloruros.

7.5.5 Recubrimientos de armaduras

Se realiza con pinturas con resinas epóxicas, poliuretano, cloruro de polivinilo, etc., se debe tener el mayor cuidado ya que este tipo de recubrimiento se puede discontinuar debido a roces o choques que agravarían la corrosión del acero.

Es una de las protecciones más costosas y requiere técnicas especializadas ya que si no se la realiza correctamente se puede afectar la adherencia del acero con el hormigón.

7.5.6 Inhibidores de corrosión

Son aditivos que se añaden al hormigón los cuales hacen que la continuidad del circuito eléctrico se rompa al ejercer su acción sobre la superficie metálica del acero, complicando la reacción anódica.

Estos inhibidores no deben modificar ninguna de las características físico-químicas del hormigón y se los añade como cualquier aditivo en el agua de amasado. En el empleo de inhibidores se debe tomar en cuenta la agresividad del medio, colocando una proporción adecuada, ya que si la cantidad que se empleó está por debajo de un valor crítico la corrosión se producirá de una manera intensa.

Entre los inhibidores más usados y comunes se encuentran el nitrito cálcico, nitrito sódico, los cromatos, fosfatos, benzoatos y sulfitos. El

uso del nitrito cálcico es el más aconsejado para climas fríos ya que aparte de impedir la corrosión, acelera el fraguado del hormigón.

Se aconseja el uso de las siguientes dosis de nitrito sódico con relación al peso del cemento:

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Medios poco corrosivos | 1 por 100 |
| Medios medianamente corrosivos | 2 por 100 |
| Medios fuertemente corrosivos | 3 por 100 |
| Medios altamente corrosivos | 4 por 100 |

7.5.7 Protecciones superficiales

El objetivo de este tipo de protecciones es crear un recubrimiento impermeable en la superficie del hormigón para evitar el paso de agua, oxígeno y sales agresivas al interior del hormigón y de su armadura. Las protecciones se logran mediante recubrimientos de resinas sintéticas, pinturas asfálticas, láminas de polivinilo, etc.

La desventaja de esta protección es que no se la puede colocar en todos los elementos de una estructura ya que algunos son inaccesibles.

Capítulo 8

ACCIONES MECÁNICAS

8.1 Erosión

La erosión es la desintegración progresiva del hormigón por cavitación, abrasión o acción química; puede producirse debido a errores en el diseño, cambios en el medio ambiente, ó cambios operacionales de la estructura.

En general las recomendaciones para evitar cualquier tipo de erosión son:

- Uso de materiales de buena calidad.
- Dosificaciones del hormigón con una baja relación agua-cemento.
- Uso de agregados no mayores a 1 ½".
- Empleo de aditivos reductores de agua e incorporadores de aire.
- Uso de polímeros en el hormigón.

8.1.1 Erosión por materiales abrasivos

Se produce por la acción de los materiales abrasivos, arena, grava, piedras, hielo y escombros que son transportados por el agua y el viento; depende de la forma, tamaño, dureza, cantidad y velocidad con la que los materiales son transportados además de la calidad del hormigón.

Las especificaciones para atenuar la erosión por materiales abrasivos utilizadas en los países sudamericanos recomiendan que:

- La resistencia a la compresión del hormigón $f'c$ mínima debe ser de 350 kg/cm²
- Utilizar fibras de polipropileno o metálicas en el hormigón

- Utilizar agregados duros, densos y de tamaños máximos mayores
- Utilizar materiales de recubrimiento superficial
- Dar un curado intensivo al concreto

8.1.2 Erosión por cavitación

La cavitación es la formación de cavidades ó burbujas en el agua que son llenadas con vapor de agua y aire, esto pasa cuando la velocidad del agua es alta y la presión local baja significativamente; el daño por cavitación se origina cuando las cavidades ó burbujas de vapor de agua colapsan, estallan bruscamente y producen presiones instantáneas muy altas que ocasionan picaduras y cavidades superficiales en el hormigón que se caracterizan porque cortan al hormigón alrededor del agregado grueso y tienen bordes irregulares y ásperos. El progreso de la erosión de la superficie del hormigón es rápido ya que los mismos pedazos de agregados desprendidos pueden generar cavidades de vapor.

Las especificaciones para atenuar la erosión por cavitación utilizadas en los países sudamericanos recomiendan que:

- Utilizar agregados gruesos máximo de 3/4” porque la cavitación tiende a remover las partículas grandes
- Utilizar de fibras de polipropileno o metálicas en el hormigón

8.1.3 Reparación de hormigones dañados por erosión

Este tipo de reparación no es de una eficacia total pero si se logran buenos resultados y consiste en:

- Eliminar el hormigón dañado

- Formar un cajeadado para ser llenado con el material de reparación
- Anclar varillas de acero corrugadas terminadas en gancho por medio de un mortero expansivo o epoxi
- Colocar un hormigón de baja relación agua/cemento, reforzado con fibras de acero
- El hormigón nuevo debe tener una consistencia adecuada para que penetre en todos los huecos y además debe ser colocado de forma tal que no quede aire atrapado
- Se recomienda el uso de un adhesivo epoxico para asegurar la adherencia entre el hormigón existente y el nuevo

8.2 Abrasión

La resistencia del hormigón a la abrasión es la capacidad de su superficie para resistir el desgaste, en algunos casos como pisos, pavimentos, revestimientos y algunas estructuras hidráulicas será un factor determinante la durabilidad y funcionalidad de la estructura; depende de la resistencia a la compresión del hormigón, las características de los áridos y el tipo de acabado que se le dé al hormigón.

Se puede tener dos tipos de desgastes dependiendo del uso del hormigón:

- Desgaste por frotamiento: se produce debido al tráfico peatonal, de vehículos livianos ó por el deslizamiento de objetos, la resistencia al desgaste de los agregados tiene una mayor influencia.
- Desgaste por fricción: se produce debido al tráfico de vehículos pesados, y vehículos que generan fricción y roce por raspado o rozamiento.

Una manera eficaz de evitar este tipo de daño en el hormigón es mediante el uso de polímeros, un buen y prolongado curado, en el caso de pisos industriales se coloca en la superficie del hormigón fresco un endurecedor

que es una mezcla de cemento Portland, arena de cuarzo y pigmento; también se puede pulir la capa superficial del hormigón de menor resistencia.

8.3 Fluencia

Es el incremento de la deformación de una pieza cargada aún manteniendo el elemento solicitado a tensión constante, este fenómeno se presenta con distinta magnitud de acuerdo al material que se analice. En el hormigón armado las armaduras longitudinales limitan la deformación, la fluencia del hormigón se debe al efecto producido por la carga actuante en el elemento de hormigón, sobre el agua contenida en el gel y los capilares.

Para evaluar la incidencia de los efectos de la fluencia en el comportamiento de la estructura de hormigón armado o pretensado y sus posibles deficiencias se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- La deformación por la fluencia del material, analizada en un mismo intervalo de tiempo es proporcional a la tensión.
- Un hormigón cargado a edad temprana presenta una fluencia mayor que si el proceso de carga se demora en su inicio; esto es debido al bajo módulo de elasticidad que conduce a deformaciones elásticas mayores y por ende mayores deformaciones por fluencia.
- Debido a la fluencia del material las columnas tienden a acortarse, lo que hace que esfuerzos sean transmitidos a las paredes de las estructuras provocando una falla frágil de los ladrillos o bloques.
- Para evitar la fluencia se debe tener una baja relación agua/cemento, un medio con poca humedad y no cargar la estructura hasta que el hormigón haya alcanzado un alto porcentaje de la resistencia de su diseño.
- La deformación total, debido al fenómeno de fluencia, se desarrolla en su totalidad en un tiempo de 2 a 5 años, en el primer año el 80% de la

deformación total. La deformación por fluencia puede alcanzar de 1 a 3 veces el valor de la deformación elástica.

- La fluencia del del hormigón modifica la distribución de los esfuerzos entre el hormigón y el acero.
- En el caso de una pieza de hormigón armado de armadura simétrica, el fenómeno de fluencia es igual a la disminución del módulo de elasticidad
- La fluencia es negativa cuando se impone una deformación voluntaria, como en el caso del pretensado.

8.4 Asentamientos

Los asentamientos diferenciales, en un gran porcentaje, son los causantes de la aparición de fisuras y daños en las estructuras de hormigón armado.

Si los apoyos de una estructura alcanzan valores de desplazamientos verticales significativamente diferentes se tienen consecuencias sobre la estructura tanto en su resistencia como en su durabilidad; esto se debe principalmente al estado tensional adicional que se provoca en la estructura, lo que puede provocar fisuras y hasta la rotura de un elemento estructural.

Las causas de los asentamientos diferenciales son:

- Errores en la etapa de planificación del proyecto
- Errores en la ejecución de las fundiciones
- Deformación excesiva del suelo de fundación, no considerado en el proyecto.
- Acción de cargas no previstas en el proyecto original
- Deformación excesiva localizada del suelo por la aparición de alteraciones no previstas. (inundaciones, vibración, socavación, etc.)
- Fundación de la estructura sobre pozos mal cegados, rellenos mal ejecutados, alteraciones del terreno desconocidas.
- Utilización de una misma estructura sobre diferentes tipos de suelos, niveles de fundación, o utilización de distintos sistemas de cimentación.

- Alteraciones por construcciones vecinas
- Existencia de suelos expansivos

En construcciones comunes no se considera los asentamientos en el diseño, ya que comúnmente se considera que las estructuras de hormigón armado absorben los pequeños ascensos o descensos sin solicitaciones adicionales importantes. En casos en los que se conozca de asentamientos importantes o estructuras muy rígidas se debe considerar en el diseño estructural, realizando un análisis estructural considerando la interacción suelo-fundación-estructura de manera conjunta.

Mediante la distorsión angular se puede determinar el riesgo de aparición de fisuras por asentamientos diferenciales.

$$\text{Distorsión angular} = \frac{(S_1 - S_2)}{L}$$

Dependiendo del tipo de estructura se recomiendan valores límites de estas distorsiones:

- $\frac{1}{500}$ para estructuras hiperestáticas de hormigón armado del tipo flexible (pórticos formados por placas y elementos lineales)
- $\frac{1}{200}$ para estructuras de hormigón armado isostáticas.

Estos valores límites deben ser compatibles con los cerramientos empleados. Si se produce un asentamiento diferencial, un muro que se encuentra enmarcado en la estructura es solicitado a esfuerzos diagonales perimetrales que son equivalentes a una distorsión angular.

En la distorsión angular una diagonal se alarga y la otra se acorta con esfuerzos principales de tracción y compresión inclinados 45° . Si los esfuerzos de tracción (en dirección en la que la diagonal que se alarga) alcanzan valores equivalentes a su resistencia máxima, originarán fisuras en dirección perpendicular a dicho esfuerzo.

Los asentamientos en muros con aberturas, son perturbaciones que generan una fuerte concentración de tensiones en las esquinas de los huecos. Allí las

isostáticas de tracción se desvían generando grietas que nacen en esquinas opuestas en sentido diagonal.

8.5 Pretensado

Es un método constructivo que permite obtener estructuras más durables, eficientes, esbeltos, etc. El elemento de hormigón es comprimido por medio de cables de acero especial de alta resistencia los que son tensados desde uno de sus extremos por medio de gatos hidráulicos.

Se produce un acortamiento inmediatamente después de aplicar las fuerzas de pretensado debido a la deformación elástica del hormigón. El acortamiento depende del módulo de elasticidad del hormigón, en el momento de aplicación de las fuerzas y las tensiones de compresión generadas en el hormigón por efecto del pretensado. Posteriormente se produce una deformación diferida o fluencia lenta (creep) que es un acortamiento debido al fenómeno reológico del hormigón; aproximadamente a los cuatro años la deformación diferida del hormigón sometido a esfuerzos de compresión llega a estabilizarse.

Se debe considerar la suma de las deformaciones, acortamientos elásticos y diferidos, en el diseño para así evitar la formación de fisuras.

Precauciones en hormigones pretensados tanto en la etapa de diseño como de construcción:

- La compresión del hormigón solo se produce si es posible su acortamiento
- Los cambios de dirección del cable generan fuerzas transversales de tracción o compresión
- Verificar que las dimensiones resultantes permitan lograr un buen llenado de los moldes.
- Controlar las armaduras pasivas, en particular en la zona de los anclajes

- Verificar las posiciones de los cables, su fijación y la estanquedad de las vainas.
- Controlar la resistencia del hormigón endurecido antes de tensar los cables ya que en general es en esa instancia donde se generan las mayores solicitaciones.

8.6 Fallas constructivas típicas

El proceso de construcción de una estructura de hormigón está compuesto por un conjunto de actividades o etapas:

- Replanteo y nivelación
- Provisión de materiales
- Construcción de encofrados y colocación de puntales
- Corte, doblado y colocación de armadura
- Elaboración y transporte de hormigón
- Colocación y curado de hormigón
- Remoción de moldes y puntales

En cualquiera de estas etapas se puede originar alguna deficiencia que afecte a corto o largo plazo el comportamiento de la estructura.

8.6.1 Deficiencias en el detalle y/o posicionado de la armadura

Tanto en la etapa de planificación como de construcción las varillas de acero pueden ser mal conformadas o mal colocadas lo que afectará notablemente la durabilidad o la capacidad portante de la estructura.

En la mayoría de casos se coloca la armadura de acero para que resista los esfuerzos de tracción, pero en caso de que sean colocadas incorrectamente, el brazo elástico interno disminuirá y por consecuencia la sección contará con una menor capacidad portante y aparecerán fisuras en el elemento estructural.

Además existen errores en la colocación de la armadura, por parte de los trabajadores, en zonas sometidas a esfuerzos de compresión y no en las zonas sometidas a esfuerzos de tracción de los elementos, lo que en la mayoría de los casos a ocasionado el colapso de los elementos. También existe el caso en el que se colocan diferentes diámetros de las armaduras de los que se señala en los planos, lo que significa una disminución notable del área de acero de refuerzo que afectará a la capacidad resistente del elemento en un alto porcentaje.

Uno de los errores más comunes es no mantener una posición adecuada entre las varillas como para poder tener una correcta colocación y compactación del hormigón.

Debido a los factores que producen la corrosión se debe colocar un recubrimiento adecuado dependiendo del tipo de ambiente y del elemento estructural, con esto se conseguirá retrasar el proceso de corrosión en la estructura.

8.6.2 Deficiencias en la construcción o remoción de los encofrados

Debido a una mala construcción de los encofrados los elementos estructurales pueden tener deformaciones iniciales no previstas, como es el caso de la colocación de puntales a distancias muy grandes; además se pueden llegar a producir fisuras o deformaciones en la estructura cuando los encofrados están mal apoyados.

Existen deficiencias en la construcción debido a la mala alineación de los encofrados, especialmente en pilares, lo que ocasiona un comportamiento del nudo totalmente diferente al que se consideró en el diseño de la estructura.

Uno de los problemas más graves en remoción de encofrados se debe a su temprana remoción ya que el concreto no ha alcanzado en ese tiempo un porcentaje suficiente de su resistencia, lo que origina

sobretensiones, fisuras y hasta puede ocasionar el colapso de un elemento estructural.

Capítulo 9

ENSAYOS EN EL ACERO DE REFUERZO

9.1 Introducción

Antes de realizar los ensayos en una estructura, es de gran utilidad contar con la mayor cantidad de información posible para realizar una inspección visual basada en la información recopilada.

Se deberá realizar una investigación preliminar en la que se determinara la naturaleza y extensión de los problemas observados, así los miembros más afectados, y así se podrá identificar cualquier daño superficial que tuviese la estructura. El siguiente paso es la realización de ensayos destructivos y no destructivos; existen dos clases de ensayos no destructivos, los que son utilizados para localizar defectos y los que son sirven para determinar las características dimensionales, físicas, mecánicas de un material.

El objetivo de realizar ensayos destructivos es la obtención de resultados que permitan aclarar las dudas acerca de las características de un material o del comportamiento de la estructura, dudas que normalmente surgen debido a errores en la ejecución del proyecto ó debido a la acción de agentes externos y/o accidentales no previstos durante su vida útil.

9.2 Pachómetro

Este ensayo se basa en el principio de las ondas electromagnéticas, y funciona de manera tal que la corriente alterna que circula entre los dos polos en un campo magnético es alterada por la presencia de acero. Es de gran utilidad para determinar la posición de las armaduras para barras principales y estribos siempre y cuando no se originen sombras por la cercanía de las barras de acero, no se recomienda su uso para averiguar el diámetro de las varillas de acero, ya que trabaja con el diámetro medio de las varillas lo que puede

ocasionar confusiones en varillas corrugadas, ni para determinar el espesor del recubrimiento del hormigón. Usualmente es utilizado para la verificación de las longitudes de anclaje.

Es imprescindible el uso del pachómetro antes de realizar la extracción de los núcleos de hormigón, para no afectar las varillas embebidas en los elementos de hormigón armado.

El pachómetro brinda datos equivocados especialmente cuando las varillas de acero se encuentran a profundidades más grandes por lo que se recomienda en ese caso la realización de una gammagrafía, este ensayo tiene un costo más elevado pero es mucho más confiable.

9.2.1 Equipo

El equipo se basa en en la reluctancia del circuito magnético del núcleo magnético que tiene forma de u y se alimenta por una bobina; en el caso de que exista la presencia de acero las líneas de fuerza magnéticas se cerrarán con mayor facilidad lo que se podrá conocer mediante un indicador digital



9.2.2 Procedimiento

La realización de este ensayo es muy sencillo, únicamente se debe pasar la sonda del pachómetro por la superficie del hormigón en las dos direcciones y marcar los puntos en los que el indicador digital

indique una lectura máxima que corresponderá con la localización de las varillas.



9.3 Análisis químico de acero

El equipo de análisis de acero funciona por espectrometría de emisión G.D.L por medio de una muestra mínima de acero, el equipo produce su excitación a nivel electrónico y mide la radiación emitida al volver a su estado fundamental de energía, permite determinar en 50 segundos 15 componentes de un acero. La fuente de excitación es una corriente ionizada de átomos de argón.

9.4 Geometría del corrugado

Se debe realizar la medición de forma directa por medio de perforaciones en una zona del elemento.

9.5 Toma de muestras de armaduras – Norma ASRM A 370

Las consideraciones más importantes a tomar son:

- Se deberá tomar la muestra de la zona del elemento en la que esté sometida al mínimo esfuerzo

- No se tomará más de una muestra de la misma sección transversal de un miembro estructural
- Respetar la longitud de desarrollo de las varillas
- Se debe tomar por lo menos una muestra del refuerzo principal, en elementos estructurales que tengan una luz de menos de 7.5m o una área cargada de menos de 60 m²

Las varillas pueden estar expuestas o pueden tener un recubrimiento de hormigón, en el caso de que estén expuestas la toma de muestras no tiene mayor dificultad.

Cuando las varillas tienen recubrimiento, se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- Localizar las varillas utilizando el pachómetro
- Descubrir un tramo del elemento
- Tomar una muestra de 40 cm de longitud en el caso de diámetros menores a 25mm y 80 cm de longitud para diámetros mayores.
- Sustituir el pedazo de varilla por uno nuevo unido a la barra en la que se ha hecho el corte



La sustitución de las varillas se debe realizar de la siguiente manera:

- Varillas de diámetro mayor a 20 mm: se deben soldar las nuevas a las existentes, para evitar longitudes grandes de traslape. Se debe tener la precaución de descargar de hormigón los extremos de las barras en una longitud de unos seis diámetros; para evitar los efectos de las

altas temperaturas sobre el hormigón ya que este puede ocasionar pérdida de adherencia y debilitamiento del hormigón.

- Varillas de diámetro menor a 20 mm: se debe tener una longitud de traslape de 50 cm a cada lado

9.6 Calidad del acero mediante ensayos mecánicos

Se determina mediante un ensayo mecánico destructivo, sometiendo a las varillas a esfuerzos de tracción; por lo que es necesario hacer la extracción de varillas de la estructura.

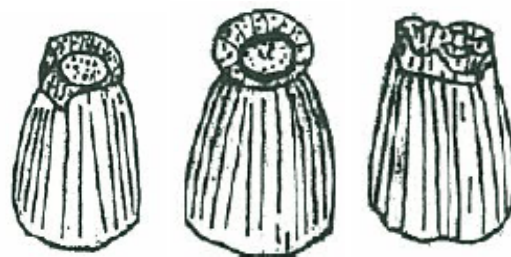
En el ensayo de tracción, se aplica al acero una fuerza uniaxial de tensión a lo largo del eje longitudinal de la muestra, la cual va aumentando gradualmente. Durante el ensayo el acero sufre deformaciones que se concentran en la zona central de la varilla por donde se produce la falla.

Los tipos de falla que tienen las varillas sometidas a esfuerzos de tracción son:

PCC= parcialmente cono y cráter

CC= cono y cráter

IF= irregular y fibrosa



PCC

CC

IF

Mediante este ensayo se pueden deducir las siguientes propiedades mecánicas del acero:

- Módulo de elasticidad: en la primera parte del ensayo el acero se deforma elásticamente, lo que significa que si se deja de cargar al acero este regresará a su longitud inicial. El módulo de Young es un indicativo de la rigidez del material.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde:

σ = esfuerzo

ϵ = deformación unitaria

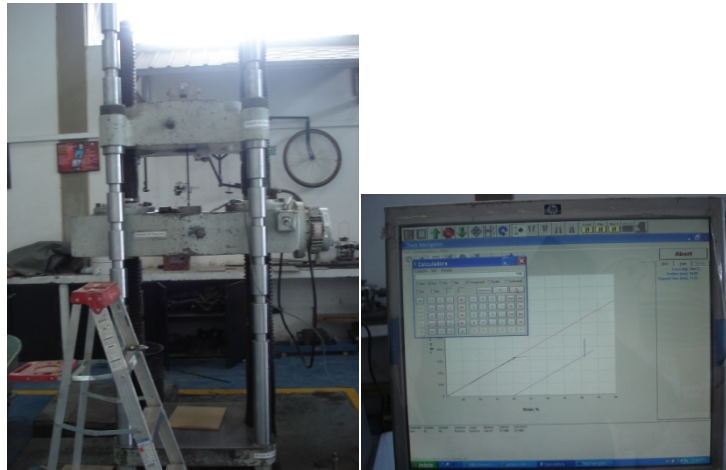
- Límite elástico ó esfuerzo de fluencia: es la tensión en la cual el acero experimenta una deformación plástica significativa. Se toma el límite elástico como el esfuerzo para el 0.002 de la deformación plástica, esto se hace debido a que no hay un punto definido en la curva esfuerzo – deformación unitaria que indique el final de la deformación elástica.
- Resistencia máxima a la tensión: es la tensión máxima alcanzada en la curva esfuerzo deformación – unitaria. Cuando el acero experimenta una pérdida de sección, la deformación aumenta y disminuye el esfuerzo. La disminución del esfuerzo hasta que se produce la falla del acero se debe a que la tensión se determina utilizando la sección inicial de la muestra; la resistencia que se obtiene en el ensayo es menor a la resistencia real del acero.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- Porcentaje de elongación: es un indicativo de la ductilidad del acero, mientras mayor sea el porcentaje de elongación más dúctil será el material. Además es un indicativo de la calidad del acero ya que si existe porosidad o inclusiones su valor baja significativamente. El porcentaje de elongación se obtiene uniendo la muestra fracturada y midiendo su longitud final.

9.6.1 Equipo

El ensayo se realiza en máquina universal Tinius Olsen de 200 Tn de capacidad, además se utiliza un extensómetro y una computadora con un software para ensayos de tracción.



9.6.2 Procedimiento

- Se prepara la máquina para el ensayo colocando las mordazas, los seguros y el extensómetro
- Se utiliza el tipo de mordazas dependiendo el diámetro de la varilla, hasta varillas de \varnothing 14 se utilizan mordazas planas, para diámetros superiores se utilizan mordazas cónicas

- Se elige el programa en la computadora para tracción de varillas con extensómetro
- Se cortan las varillas a ensayarse según las dimensiones que exige la Norma INEN 109
- Se toman las dimensiones de las varillas: largo, diámetro y masa
- Se señala en la varilla la zona de calibración para medir el porcentaje de elongación según la Norma INEN 109

Cuadro 9.1 Zonas calibradas para la tracción de varillas

| Zonas calibradas para la tracción de varillas | | | | |
|---|---------------------|--------|-----------|--------|
| Diámetro de varilla | Zona de calibración | | | |
| | Baja aleación | | Soldables | |
| | Medir | Marcar | Medir | Marcar |
| | mm | mm | mm | mm |
| 8 | 40 | 20 | 200 | 200 |
| 10 | 50 | 25 | | |
| 12 | 60 | 30 | | |
| 14 | 70 | 35 | | |
| 16 | 80 | 40 | | |
| 18 | 90 | 45 | | |
| 20 | 100 | 50 | | |
| 22 | 110 | 55 | | |
| 25 | 125 | 63 | | |
| 28 | 140 | 70 | | |
| 32 | 160 | 80 | | |
| 36 | 180 | 90 | | |

Fuente Laboratorio de Materiales de Resistencia PUCE

- Se coloca la varilla en la máquina y se la ajusta con las mordazas
- Se coloca el extensómetro regulándolo al diámetro de la varilla
- Se da una precarga para obtener un esfuerzo inferior al 1% del esfuerzo previsto para el límite elástico, con este esfuerzo se logrará el ajuste entre la probeta y los dispositivos de sujeción

- Se ingresan los datos que pide el software, número de orden y el diámetro
- Se encera la carga, la posición del bloque de carga, y el dial del extensómetro
- Se procede a la realización del ensayo
- Cuando la varilla ha llegado al límite de fluencia la computadora indica mover el extensómetro.
- Se continúa cargando a la varilla hasta que esta se rompa
- Una vez que se produce la rotura de la varilla se procede a medir el alargamiento de la varilla
- Se registran los resultados obtenidos



9.6.3 Interpretación de datos

- La computadora nos proporciona la gráfica esfuerzo deformación unitaria, en la que nos da un valor del esfuerzo de fluencia del acero, que deberá ser corregido en caso de que sea necesario, mediante la observación de la gráfica.
- Se calcula el módulo de elasticidad mediante la fórmula

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

- Se calcula el porcentaje de elongación mediante la fórmula

$$\%E = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$$

Donde:

l = Longitud de la varilla después de la acción de la fuerza

l_0 = Longitud inicial de la varilla

Cuadro 9.2 Características físicas de las varillas con resaltes para hormigón armado

| Diámetro Nominal (mm) | Masa (kg/m) | | |
|-----------------------|-------------|----------|----------|
| | Nominal d | Máximo e | Mínimo e |
| 8 | 0.395 | 0.418 | 0.371 |
| 10 | 0.617 | 0.654 | 0.58 |
| 12 | 0.888 | 0.941 | 0.835 |
| 14 | 1.208 | 1.281 | 1.136 |
| 16 | 1.578 | 1.673 | 1.484 |
| 18 | 1.998 | 2.117 | 1.878 |
| 20 | 2.466 | 2.614 | 2.318 |
| 22 | 2.984 | 3.163 | 2.805 |
| 25 | 3.853 | 4.085 | 3.622 |
| 28 | 4.834 | 5.124 | 4.544 |
| 32 | 6.313 | 6.692 | 5.935 |
| 36 | 7.99 | 8.47 | 7.511 |
| 40 | 9.865 | 10.456 | 9.273 |

Fuente Norma INEN 2 167:2003

Cuadro 9.3 Especificaciones mecánicas

| | |
|---|-----|
| Limite de fluencia, mínimo, Mpa | 412 |
| Limite de fluencia, máximo, Mpa | 539 |
| Resistencia a la tracción, mínima, Mpa | 549 |
| | |
| Alargamiento % mínimo con probeta Lo = 200 mm | |
| Diámetro nominal | % |
| 20-Aug | 14 |
| 22 -36 | 12 |
| 40 | 10 |

Fuente Norma INEN 2 167:2003

9.7 Velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad del concreto

La velocidad de corrosión varía a lo largo de la vida útil de la estructura, dependiendo especialmente de la humedad y la temperatura del medio ambiente; se la obtiene mediante la técnica de la resistencia a la polarización y la aplicación de la ecuación de Stern y Geary.

$$\text{Resistencia a la polarización} = \frac{\text{Variación de potencial}}{\text{Corriente aplicada}}$$

Se llama velocidad o intensidad de corrosión i_{corr} a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo ($\text{g/cm}^2 \text{ día}$), aunque electroquímicamente se puede definir como ($\mu\text{A/cm}^2$) o (mm/año).

Los valores obtenidos en $\mu\text{A/cm}^2$ se pueden transformar en pérdida de espesor por unidad de tiempo de acuerdo a la ley de Faraday:

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{año}} = 11.6 i_{\text{corr}}$$

Ley de Stern y Geary

$$I_{corr} = \frac{B}{\text{Resistencia a la polarización}}$$

Donde:

I_{corr} = Velocidad de corrosión

B= Constante, toma el valor de 26 Mv para el acero embebido en el hormigón

El equipo, GECOR, nos proporciona la velocidad de corrosión directamente, con la cual se evalúa el riesgo de corrosión del acero como se indica en el siguiente cuadro:

Cuadro 9.4 Riesgo de corrosión del acero

| I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | Riesgo de corrosión |
|---|-----------------------------|
| < 0.2 | Estado pasivo |
| 0.2 - 0.5 | Baja corrosión |
| 0.5 - 1.0 | Corrosión moderada |
| > 1 | Alta velocidad de corrosión |

Fuente Fabricante del equipo

La medida del potencial de corrosión nos indica, de cierta forma, el grado de pasivación del acero, pero no proporciona ningún tipo de información acerca del riesgo de corrosión de la armadura.

Las zonas consideradas de alto riesgo de corrosión son aquellas en las que el potencial negativo es de -350 Mv, mientras que las que presentan potenciales de -200 Mv se las considera de riesgo despreciable. Los resultados obtenidos pueden variar dependiendo del grado de humedad del hormigón.

La resistividad del hormigón depende esencialmente de su porosidad, del contenido de humedad del hormigón y de los electrolitos presentes en el mismo (cloruros, sulfatos). Es de gran ayuda para la interpretación de la velocidad de corrosión y se la obtiene mediante la siguiente fórmula:

Resistividad del hormigón = $2 \times R \times D$

Donde:

R = Resistencia eléctrica entre un pulso entre el contraelectrodo del sensor y la armadura

D = Diámetro del contraelectrodo del sensor

Cuadro 9.5 Interpretación de la velocidad de corrosión mediante la resistividad del hormigón

| Resistividad del hormigón | Riesgo de corrosión |
|---------------------------|---|
| > 100 - 200 kΩ cm | Velocidad de corrosión baja, aún con alta concentración de cloruros o carbonatación |
| 50 - 100 kΩ cm | Velocidad de corrosión baja |
| 10 - 50 kΩ cm | Velocidad de corrosión moderada o alta donde el acero está activo |
| < 10 kΩ cm | La resistividad no es un parámetro de control de la velocidad de corrosión |

Fuente Fabricante del equipo

Se debe tener en cuenta que la temperatura influye en los valores de la resistividad del hormigón obtenidos, ya que si aumenta la temperatura aumenta también la resistividad.

9.7.1 Equipo

Mediante la técnica de resistencia de la polarización se puede realizar una verdadera medida del ritmo de corrosión. La corriente de corrosión está relacionada linealmente con la resistencia de polarización. Con ello se tiene una cuantitativa directa de la directa da la cantidad de acero que se está convirtiendo en óxido en el momento de la medición.

El equipo está conformado por:

- Unidad central: posee una pantalla y un teclado para su manejo. Tiene una capacidad de almacenamiento de 100 registros de mediciones, que pueden ser pasados a la computadora
- Sensor A: sirve para medir la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistencia eléctrica del concreto. Tiene tres depósitos para colocar la solución de sulfato de cobre.
- Sensor B: sirve para medir la resistividad del hormigón, la humedad relativa y la temperatura en °C. Tiene un depósito para colocar la solución de sulfato de cobre.
- Cables conectores



Unidad central



Sensor A

Sensor B

9.7.2 Procedimiento

- Se conectan los cables del sensor que se vaya a utilizar a la unidad central.
- Mediante el uso de una pulidora se deja totalmente lisa la superficie del hormigón para así asegurar un buen contacto con el sensor
- Se coloca la solución de sulfato de cobre en él ó los depósitos de los sensores
- Se localizan las varillas mediante el uso del pachometro en el elemento
- Se pica el hormigón hasta llegar a la varilla para hacer conexión a tierra con la misma
- Se coloca el sensor A sobre el hormigón que cubre a la varilla en la que se está realizando el ensayo de velocidad de corrosión
- Se espera de dos a cinco minutos para obtener la lectura
- Se coloca el sensor B sobre el hormigón para determinar la resistividad del mismo
- Se espera de dos a cinco minutos para obtener la lectura
- Una vez terminado el ensayo se debe retirar la solución de sulfato de cobre de él ó los depósitos de los sensores





9.7.3 Interpretación de datos

En este ensayo no es necesario realizar cálculos ya que el equipo proporciona los resultados requeridos directamente

Capítulo 10

ENSAYOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN

10.1 Introducción

En casi todos los estudios de patología del hormigón es necesario conocer la resistencia del hormigón, esto se debe a dos causas: la primera debido a que los informes sobre la resistencia de los cilindros de hormigón tomados en obra indican valores inferiores a los dados en las especificaciones de la obra y la segunda debido a comportamientos anormales de la estructura una vez finalizada su construcción.

Las pruebas no tienen una interpretación concisa y clara por si solas, es por esto que para asegurar el valor real de las mismas debe interpretarse los resultados de acuerdo a la experiencia; ya que en varias ocasiones los resultados son motivo de disputa y confusión, sobretodo en la fiscalización del proyecto.

Cuando se realizan estos ensayos se puede determinar además el módulo de Elasticidad y el Módulo de Poisson.

En lo que se refiere a la determinación del módulo de elasticidad del hormigón, este está afectado directamente por el módulo de elasticidad del agregado y por la relación volumétrica del agregado en el hormigón. El Módulo de Elasticidad se obtiene del diagrama esfuerzo deformación unitaria. La relación de Poisson es la relación entre la deformación lateral respecto a la deformación longitudinal, que se producen cuando una muestra de hormigón es sometida a una carga uniaxial.

Es necesario dar la definición de ciertos términos antes de la realización de las pruebas:

- Resistencia la capacidad que tiene el hormigón para soportar cargas sin llegar a fallar y se mide por el esfuerzo, según el cual se desarrolla una condición limitativa específica como la ruptura y la terminación de la acción elástica.
- Esfuerzo es la intensidad de las fuerzas o componentes internas distribuidas que resisten un cambio en la forma de un cuerpo.
- Deformación que es el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de un cuerpo, que va acompañado por un cambio de esfuerzo.

10.2 Carbonatación

Para la determinación de la profundidad de carbonatación en el hormigón se extrae una muestra del mismo y se lo somete a la acción de una solución débil de fenolftaleína en alcohol diluido. La zona que se torne de color rosa indica la existencia de hidróxido cálcico lo que significa que no está carbonatada. Lo que se colorea es la cal libres es por eso que este ensayo no se puede realizar en hormigones con cemento de alta alumina ya que estos no la contienen.



Existen otras técnicas empleadas en laboratorio para determinar la carbonatación como: análisis químico, difracción de rayos X, espectroscopia de infrarrojo y análisis termogravimétrico

10.3 Ensayo esclerométrico – Norma ASTM C 805

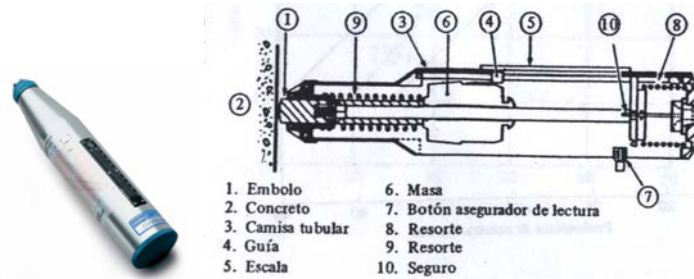
Es un ensayo no destructivo conocido también como martillo de rebote, fue creado en 1948 por el Ingeniero Suizo Enerst Schmidt. El ensayo con el esclerómetro se basa en el principio de rebote de una masa elástica que depende de la dureza de la superficie contra la cuál golpea la masa.

Los factores por los cuales puede variar la precisión del equipo son:

- Variaciones de agregados en la superficie del hormigón, si el golpe impacta sobre un agregado nos dará resistencias mayores.
- Varillas situadas cerca de la superficie del hormigón
- Tipo y dosificación del cemento
- La posición del esclerómetro, ya que si el esclerómetro no está perfectamente perpendicular a la superficie, tendrá un rebote con menor intensidad.
- Superficie del hormigón
- Tipo de compactación
- Humedad del elemento. Si el elemento se encuentra húmedo, las lecturas del esclerómetro son más bajas que si este estaría seco.
- Carbonatación. Si un elemento tiene carbonatación y es de un espesor considerable, el esclerómetro dará una resistencia alta; mientras que la mayor parte del elemento tendrá una resistencia considerablemente más baja.
- Huecos o fisuras en el interior del hormigón

Por todos estos factores antes mencionados, especialmente la carbonatación, se recomienda que el esclerómetro sea utilizado en hormigones de no más de tres meses de edad para no obtener resultados erróneos, al menos que se haya retirado la capa carbonatada.

10.3.1 Equipo



El equipo consiste en una masa con carga de resorte que posee una cantidad fija de energía que se consigue mediante la extensión del resorte a una posición fija, lo que se logra al presionar el émbolo contra la superficie del concreto. Cuando se lo suelta, la masa rebota del émbolo aun en contacto con la superficie del concreto, la distancia recorrida por la masa, expresada como un porcentaje de la extensión inicial del resorte es el numero de rebote.

La precisión del martillo es de $\pm 25\%$ siendo utilizado por un operador con experiencia y sin una calibración directa, en el caso de que se haya realizado una calibración directa la precisión es de $\pm 10\%$ para un nivel de confianza del 90%. Como en la mayoría de los casos la precisión es baja no es recomendable su uso para determinar la resistencia de un hormigón, sino más bien para verificar que los hormigones de una misma obra tengan resistencias similares y así poder encontrar anomalías en los elementos.

Este equipo se basa en curvas de calibración para poder determinar una resistencia aproximada del hormigón, por lo que tiene una limitada precisión; además que con este ensayo únicamente se logra conocer las propiedades superficiales del concreto, en la que se estima que la profundidad de la zona es aproximadamente de 3 cm. Este ensayo nunca deberá reemplazar al ensayo de compresión de núcleos

10.3.2 Procedimiento

- Se elige el elemento a ensayarse
- Se debe realizar el ensayo sobre una superficie lisa, por lo que en la mayoría de ocasiones es necesario frotar la superficie con una piedra pómez.
- El elemento a ser ensayado deber tener por lo menos un grosor de 10 cm y debe estar firme.
- Se recomienda determinar el número de rebote en varias zonas a una separación mínima de 2.5 cm y dentro de un área no mayor de 30cm por 30cm.
- El émbolo siempre deber estar en posición perpendicular a la superficie del hormigón que se va a ensayar. La posición vertical del martillo afectará el número de rebote, como consecuencia de la gravedad en el recorrido de la masa del martillo.
- Se realizan diez disparos, mínimo deben ser nueve, y se anotan las lecturas.
- Se deberá rechazar el ensayo si más de dos lecturas difieren en más de seis unidades del promedio de todas las lecturas.

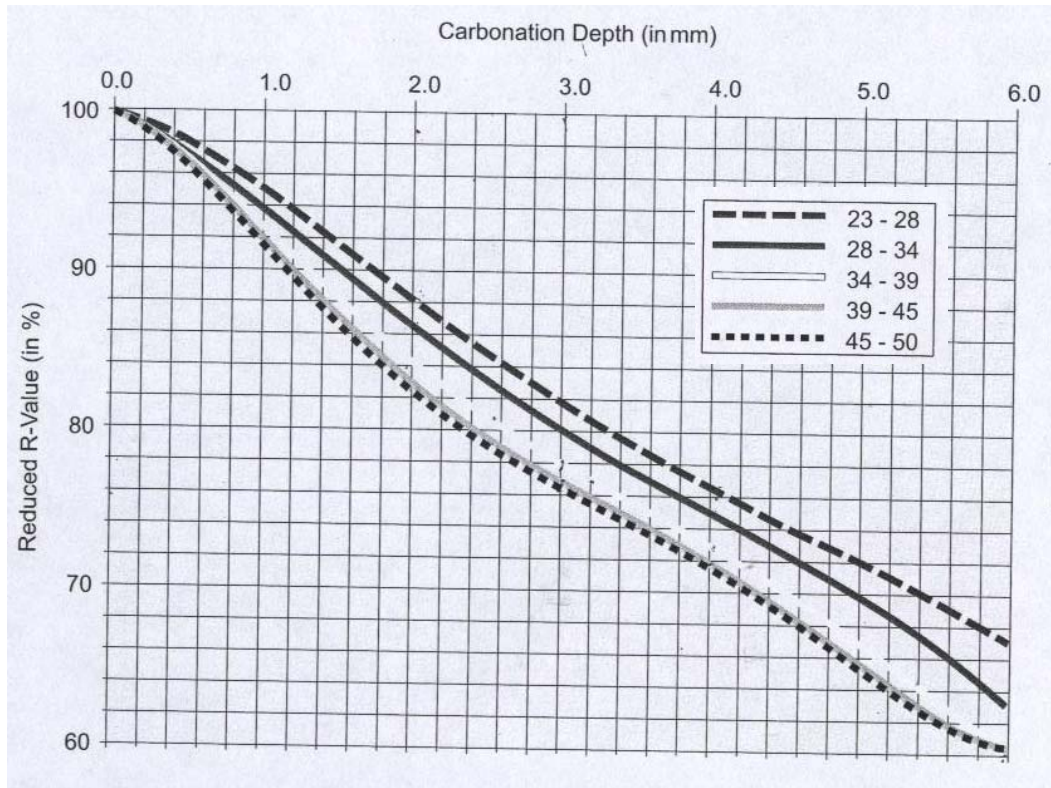




10.3.3 Interpretación de datos

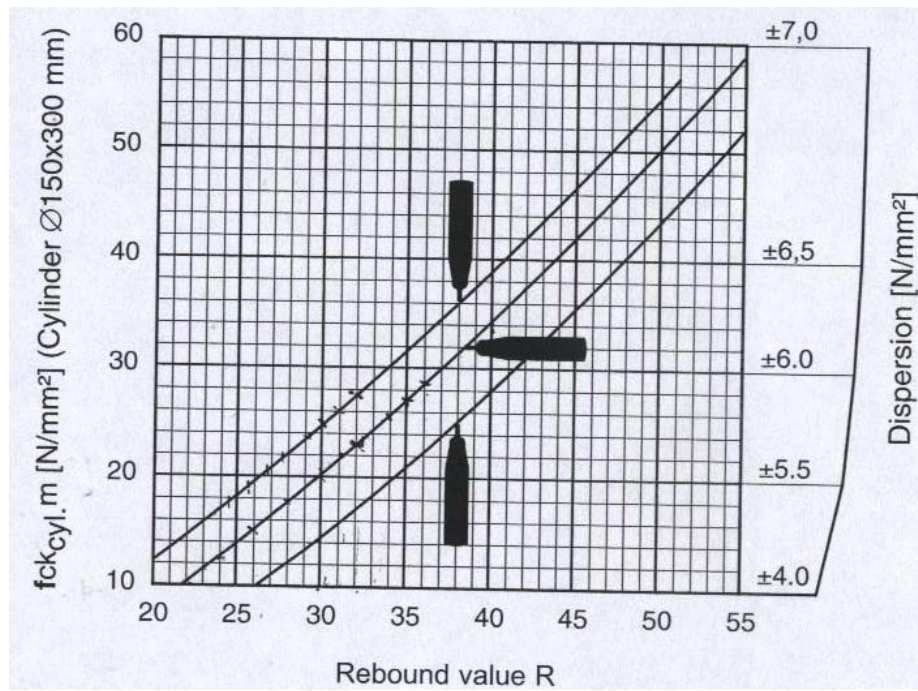
- El equipo nos proporciona la lectura del martillo (número de rebotes)
- Existe un factor de corrección del equipo que se debe a la calibración del mismo, que se hace en base a 80 golpes en un yunque
- Se tiene además un factor de corrección por carbonatación que se encuentra en el siguiente gráfico 10.1 ábaco proporcionado por el fabricante del equipo. Para la utilización de este ábaco se debe restar el macillado del hormigón
- Se obtiene una lectura corregida de los números de rebote con los dos factores antes indicados
- Con esta lectura corregida se ingresa al otro ábaco indicado en la figura 10.2, en donde se obtiene la resistencia en MPa.
- Se toma la resistencia como el promedio de las diez lecturas realizadas en cada elemento

Grafico 10.1 Factor de corrección por carbonatación



Fuente Por el fabricante del equipo

Grafico 10.2 Resistencia a la compresión



Fuente Por el fabricante del equipo

10.4 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico – Norma ASTM C 579-02

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico es un ensayo no destructivo que proporciona un estimativo de la uniformidad (presencia de fisuras o huecos), calidad, módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión del hormigón mediante curvas de calibración previamente elaboradas. El ensayo se basa en la medición del tiempo que tarda la onda en recorrer una distancia del emisor al receptor.

Este ensayo no se ve afectado por la carbonatación, ni por la presencia de agregados en el hormigón como sucede con el uso del martillo.

La precisión del equipo es de $\pm 25\%$ siendo utilizado por un operador con experiencia y sin una calibración directa. En el caso de que se haya realizado una calibración directa la precisión es de $\pm 10\%$ para un nivel de confianza del 90%, exactamente igual que en la utilización del martillo.

Los factores por los que puede variar la precisión del equipo son:

- La humedad del elemento, mientras más húmedo se encuentre el hormigón se obtendrán velocidades de onda mayores. En el caso de hormigón saturado la velocidad de pulso aumentara en un 5%.
- El acabado superficial del hormigón, puede impedir que los transductores tengan un buen contacto con el elemento
- Temperaturas extremas
- Armaduras próximas paralelas a la dirección de propagación de la onda, la presencia de estas aumentará la velocidad
- Movimientos al momento de realizar el ensayo debido a una mala sujeción de los transductores

10.4.1 Equipo

El aparato está formado por: transductores que se ponen en contacto con el hormigón, un generador de pulsaciones (frecuencia 10 y 150

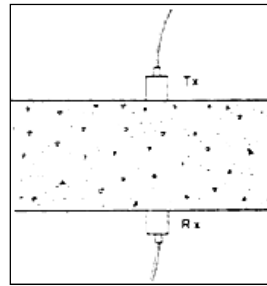
Hz), un amplificador, un circuito que mide el tiempo y una pantalla digital del tiempo tomado por la pulsación de ondas longitudinales para viajar entre los transductores.

La frecuencia de los transductores del equipo utilizado es de 54 KHz

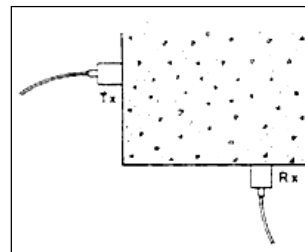


10.4.2 Procedimiento

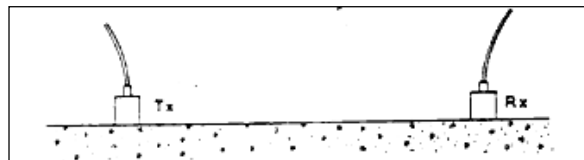
- Se elige la muestra a ensayarse
- Se realiza una limpieza y se pule la superficie de hormigón a ensayarse con piedra pómez. Es necesario quitar cualquier tipo de acabado que tenga el hormigón como pinturas, yeso, cemento, etc.
- Se coloca vaselina para asegurar el buen acoplamiento de los transductores a la superficie de hormigón.
- Se procede a colocar los transductores dependiendo el tipo de transmisión que se haya elegido: directa, semidirecta o indirecta. En este caso se realizó el ensayo mediante transmisión indirecta.



Directa: proporciona la máxima sensibilidad y proporciona una longitud de trayectoria bien definida



Semidirecta: se mide tomando en cuenta que las trayectorias son diagonales mediante el uso del teorema de Pitágoras



Indirecta: es la menos precisa debido a que proporciona velocidades de pulso que normalmente están influenciadas únicamente por las capas superficiales del hormigón. Además la medición de la trayectoria no es tan precisa ya que se considera que es la distancia entre los centros de los transductores.

- Los transductores deben mantenerse fijos y firmes hasta que la lectura sea definida.
- Se colocan los transductores a una distancia de un metro entre centro y centro, cumpliendo con las recomendaciones que indican la norma para que la frecuencia de los transductores.

- La onda se transmite a través del hormigón, es captada por el transductor receptor, el cual convierte a la onda de pulso electrónico en energía mecánica
- Se obtiene el tiempo de propagación de la onda en el hormigón
- En caso de que exista la presencia de una fisura se podrá determinar su profundidad
- Se colocan a 5 cm de la fisura
- Se colocan a 10 cm de la fisura
- Se anota la lectura con la profundidad del aparato



10.4.3 Interpretación de datos

- El equipo utilizado para la realización de este ensayo nos proporciona directamente la velocidad de onda, Vd.
En el caso de que el equipo no proporcione la velocidad de onda directamente esta deberá ser calculada mediante la siguientes formulas

$$v = \frac{l}{t}$$

En donde:

l= distancia entre transductores

t= lectura de tiempo

- Con las dos lecturas obtenidas en campo se calcula una velocidad de onda promedio.

$$v_{prom} = \frac{vd_1 + vd_2}{2}$$

Cuadro 10.1 Factor para la corrección dependiendo el tipo de transmisión

| Tipo de transmisión | Factor α |
|---------------------|-----------------|
| Directa | 1 |
| Transversales | 1.795 |
| Indirecta | 1.558 |

Fuente Fabricante del equipo

- Se calcula las velocidades $v(i-t)$ multiplicando las velocidades de onda dadas por el equipo por el factor α .

$$v(i-t) = vd * \alpha$$

- El fabricante del equipo nos proporciona el factor α dependiendo el tipo de transmisión que se ha utilizado en la realización del ensayo.
- Con las dos velocidades obtenidas del cálculo anterior se calcula una velocidad promedio.

$$v(i-t)_{prom} = \frac{v(i-t)_1 + v(i-t)_2}{2}$$

- Se debe calcular el peso específico del hormigón en laboratorio mediante la extracción de una muestra en campo.
- El módulo de Poisson es un dato bibliográfico para el hormigón, que se asume que es de 0.210
- Se calcula el modulo dinámico mediante la fórmula:

$$Ed = \frac{\bar{V}^2 * \rho(1 + 2u)(1 - 2u)}{g(1 - u)} * \frac{1}{100^2}$$

Donde:

Ed = módulo de elasticidad dinámico kg/cm²

v = velocidad de pulso, en m/s

ρ = peso específico, en kg/m^3

u = módulo de Poisson

- Se calcula el esfuerzo a la compresión referencial del hormigón mediante la fórmula:

$$f'c = (3.5 \times 10^{-9} * Ed^2) - (1 \times 10^{-3} * Ed) + 200$$

Todos los valores de esta fórmula deben estar expresados en kp/cm^2

- El equipo nos proporciona el factor β , que es un factor de corrección propio del equipo, con este factor se calcula el $f'c$ corregido.
- También se puede determinar la resistencia a flexión del hormigón mediante la fórmula:

$$E_d = \frac{k'}{1 - u} \sqrt{f_{cf}}$$

En donde:

k' = es una constante cuyo valor es de 50400 para hormigones fabricados con agregados silíceos y 69000 para hormigones fabricados con agregados calizos

u = módulo de Poisson

Cuadro 10.2 Clasificación de la calidad del hormigón

| Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman. | |
|--|-------------------------------|
| Velocidad de la onda longitudinal m/seg | Condición del hormigón |
| Más de 4570 | Excelente |
| De 3050 a 4570 | Buena |
| De 3050 a 3650 | Regular a dudosa |
| De 2130 a 3050 | Pobre |
| Menos de 2130 | Muy pobre |

Ing. Manuel Hernández Cánovas. Patología y Terapéutica del hormigón armado. Tercera Edición

Cuadro 10.3 Evaluación de la calidad mediante la velocidad de pulso según Agraval y otros

| Evaluación de la calidad mediante la velocidad de pulso según Agraval y otros. | |
|---|-------------------------------|
| Velocidad de pulso m/seg | Condición del hormigón |
| Más de 3000 128 | Buena |
| De 2500 a 3000 | Regular |
| Menos de 2130 | Pobre |

Cuadro 10.4 Velocidad mínima de pulso en estructuras típicas

| Velocidad mínima de pulso en estructuras típicas. | |
|--|---|
| Tipo de obra | Velocidad mínima de pulso para su aceptación m/seg |
| Selecciones T de hormigón reforzado | 4570 |
| Unidades de anclaje de hormigón reforzado | 4360 |
| Marcos de edificios de hormigón reforzado | 4110 |
| Losas de entre piso | 4720 |

10.5 Extracción , compresión de núcleos y determinación del módulo de Elasticidad – Norma ASTM 39 y ASTM C42

Es un ensayo destructivo que tiene como objetivo la extracción de los núcleos para determinar la resistencia mecánica y el módulo de elasticidad del hormigón, y además la segregación por acumulación de agregado.

Se debe tener en cuenta que normalmente la resistencia de los núcleos es menor a la de los cilindros normales, como consecuencia del proceso de extracción de las muestras; se estima que esa reducción de resistencia esta alrededor de un 5%.

En este ensayo la determinación de la resistencia puede verse afectado por:

- Tamaño de la muestra
- Curado
- Preparación de la superficie de extremo de la muestra
- Rigidez de la máquina de prueba, energía almacenada en la misma
- Velocidad de aplicación de la carga
- Edad del hormigón

- Heterogeneidad del hormigón por presencia de partículas de agregado grueso
- Humedad de las muestras
- Relación entre el tamaño de la muestra y el tamaño máximo del agregado

En lo que respecta a la determinación del módulo de elasticidad del hormigón se lo puede determinar mediante tres métodos en la curva esfuerzo deformación unitaria:

1. Módulo tangente inicial: es de limitada importancia
2. Módulo tangente: se lo localiza en cualquier punto sobre la curva esfuerzo deformación unitaria
3. Módulo secante: según la Norma ASTM C 469-94 se determina al 40% de la resistencia final del hormigón

La rapidez de aplicación de la carga en el ensayo define la magnitud de las deformaciones y la curvatura de la curva en el diagrama esfuerzo deformación unitaria. Es así que, si la carga es aplicada a una velocidad muy alta las deformaciones se reducen notablemente y la curvatura de la curva es muy pequeña.

El módulo de elasticidad del hormigón está relacionado con su resistencia, la expresión más empleada es:

$$E_d = \alpha \sqrt{f'c}$$

Normalmente α tiene un valor de 15100, pero estudios han demostrado que en el Ecuador los valores de α están alrededor de 10000 y 12000.

10.5.1 Aspectos a considerar para la realización del ensayo:

1. Efecto de la relación altura diámetro en la resistencia de los núcleos; esto se produce en núcleos que no tengan una relación igual a dos como los cilindros estandarizados. Relación no siempre fácil de alcanzar ya que el diámetro del núcleo depende del tamaño del disco de corte que se utilizo dependiendo del espaciamiento de las varillas en el elemento, mientras que la altura depende del espesor del elemento.

En núcleos de hormigones de resistencias medianas y bajas una relación altura diámetro pequeña produce un aumento en su resistencia; mientras que si la relación es mayor a cinco la resistencia bajara notablemente como consecuencia del efecto de esbeltez. Según la Norma ASTM C 42-90 no es necesario correcciones de la resistencia de núcleos cuya relación h/d este entre 1.94 y 2.10.

Cuadro 10.5 Corrección para la relación h/d

| Relación entre la altura y el diámetro | Coefficiente de corrección |
|---|-----------------------------------|
| 2 | 1 |
| 1.75 | 0.98 |
| 1.5 | 0.96 |
| 1.25 | 0.93 |
| 1.1 | 0.9 |
| 1 | 0.87 |
| 0.75 | 0.73 |
| 0.5 | 0.6 |

Fuente ASTM C42 y C39

2. Dirección de la extracción: existe un incremento del 3% cuando se realiza la extracción de los núcleos en dirección paralela a la del hormigonado
3. Altura de la extracción de la muestra: los núcleos extraídos en las zonas superiores de los elementos (los últimos 50 cm)

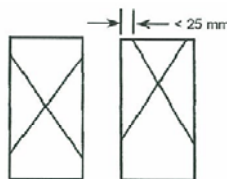
presentan resistencias más bajas en un 0.9% que los extraídos en el resto del elemento; la resistencia a la compresión varía a lo largo de los elementos debido a los fenómenos como la exudación y la segregación. Dentro del diseño de los elementos esta reducción de la resistencia del hormigón está considerada con la utilización de los factores de seguridad

4. Humedad: las muestras saturadas tienen resistencias aproximadamente un 20% menores que las muestras secas
5. Edad: no se debe realizar extracciones de núcleos en hormigones de menos de 14 días de vida
6. Relación muestra con tamaño máximo del agregado: el diámetro del núcleo no debe ser menor a 100 mm ó a tres veces el tamaño máximo nominal del agregado. Ya que la variación de la resistencia debido a este factor puede ser hasta del 10%.
7. No se deben tomar muestras en elementos que tengan mucha concentración de armadura
8. Se debe tomar por lo menos tres muestras por cada zona de la estructura.
9. No se debe extraer núcleos de zonas agrietadas.

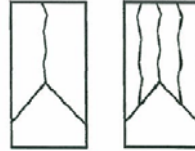
10.5.2 Tipos de falla

Los tipos de falla que pueden tener los núcleos de hormigón son:

Tipo1: conos en ambos extremos razonablemente bien formados, fisuras a través de la cabecera a una distancia menor a 25mm



Tipo 2: cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren a través de la cabecera, cono no muy bien definido en el otro extremo



Tipo 3: Fisura vertical columnar a través de ambos extremos, conos no muy definidos



Tipo 4: Fractura diagonal con fisuras a través de los bordes. Se debe golpear con un martillo para diferenciar del Tipo 1



Tipo 5: Fracturas a los lados, en el extremo superior o en el fondo. Este tipo de fallas sucede comúnmente cuando se ensaya con neoprenos



Tipo 6: Similar al tipo 5, pero en el extremo del cilindro está en punta

10.5.3 Equipos

El equipo para la extracción de núcleos se compone de una herramienta giratoria de corte con broca de diamante, que cuenta con una sonda por la cual se dispone de un caudal de agua durante la extracción. Se pueden cambiar las coronas de corte para obtener muestras de distintos diámetros si por alguna razón fuese necesario.



El equipo para determinar la resistencia a la compresión de los núcleos y su módulo de elasticidad es la prensa universal Tinius Olsen de 30 Tn, y un deformímetro de 0.001 pulgs de precisión.





10.5.4 Procedimiento

Para la extracción de núcleos:

- Se elige la muestra a ensayarse
- Con la ayuda del pachómetro se determina la localización de las varillas para poder extraer los núcleos. Los diámetros de los núcleos pueden ser de 50, 75, 100, 125 y 150 mm de diámetro.
- Se coloca a las muestras en una funda plástica para mantener su humedad
- Se debe realizar el relleno de los orificios, colocando resina epoxica en las paredes del orificio para después rellenar con un hormigón de consistencia seca y de alta resistencia



Para determinar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad

- Se lleva al laboratorio los núcleos en donde se los corta para así lograr que sus caras queden lo más paralelas posibles entre sí y además retirara la parte del hormigón que se encuentre carbonatado
- Se toman las dimensiones de los núcleos: altura, diámetro y masa. Con estos datos se encuentra la relación diámetro altura, en caso de que la relación no sea 2 a 1 se aplicará un factor de corrección.
- Se mide con el calibrador el tamaño máximo del agregado para confirmar que se utilizó el tamaño de broca adecuada en la extracción de núcleos, es decir, sin que se haya producido fallas en el agregado
- Se refrenta los núcleos con mortero de azufre en sus dos caras. Se debe verificar que los extremos sean totalmente

planos para así evitar concentración de esfuerzos que provocaría una reducción en la resistencia.

- Se los deja reposar durante cuatro horas hasta que el mortero de azufre se endure
- Se coloca el deformímetro
- Se encera la máquina
- Se coloca la probeta
- Se encera la máquina y el deformímetro nuevamente
- Dependiendo la resistencia del núcleo, se divide la resistencia esperada para un número determinado de lecturas de cargas y deformación
- Cuando se alcanzan determinados valores de carga se anota el valor de la deformación, sin detener el ensayo
- Se repite este procedimiento hasta el fallo de la probeta, normalmente el ensayo tiene una duración de 20 minutos.
- Se observa el tipo de falla que tuvo el núcleo
- Se saca un pedazo de la muestra ensayada para determinar el porcentaje de humedad



10.5.5 Interpretación de datos

- Se calcula la deformación unitaria, ϵ , mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

ΔL = deformación, en mm

L_0 = altura inicial del núcleo sin refrentado, en mm

- Se dibuja el diagrama esfuerzo-deformación unitaria
- Se corrige la curva, trazando un nuevo origen de la curva y en consecuencia nuevos ejes
- Se determina el esfuerzo S_1 en kg/cm^2 correspondiente a la deformación unitaria de (e_1) de 0.00005
- Se determina el esfuerzo S_2 correspondiente al 40% del esfuerzo máximo
- Se determina la deformación unitaria e_2 correspondiente al esfuerzo S_2
- Se calcula el modulo de elasticidad con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.00005}$$

10.6 Compresión de núcleos con Strain Gauges para la determinación del módulo de elasticidad del hormigón y el módulo de Poisson

10.6.1 Equipo

Fue inventado en 1938 y se los conoce como sensores de eje que son utilizados para medir la deformación de los materiales; son medidores de aislamiento flexible que soporta un modelo de hoja metálica. El aislador es colocado en el objeto mediante un adhesivo, así la lamina se deforma con el objeto lo que provoca un cambio en su resistencia eléctrica. Es así como funciona el dispositivo aprovechando la propiedad física de la conductividad eléctrica y la geometría del conductor.



10.6.2 Procedimiento

Para determinar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad

- Se lleva al laboratorio los núcleos en donde se los corta para lograr que sus caras queden lo más paralelas posibles entre sí.
- Se toman las dimensiones de los núcleos: altura, diámetro y masa. Con estos datos se encuentra la relación diámetro altura, en caso de que la relación no sea 2 a 1 se aplicará un factor de corrección.

- Se mide con el calibrador el tamaño máximo del agregado para confirmar que se utilizó el tamaño de broca adecuada en la extracción de núcleos, es decir, sin que se haya producido fallas en el agregado
- Se refrenta los núcleos con mortero de azufre en sus dos caras. Se debe verificar que los extremos sean totalmente planos para así evitar concentración de esfuerzos que provocaría una reducción en la resistencia.
- Se los deja reposar durante cuatro horas hasta que el mortero de azufre se endure
- Se preparan los cuatro cables que unirán al strain gauges y la máquina digital que registra las deformaciones
- Se colocan a los dos strain gauges mediante adhesivos en el núcleo, se deberá colocar uno en sentido horizontal para determinar el módulo de Poisson y otro en sentido vertical para determinar el módulo de elasticidad.
- Se unen a los cables con el strain gauges
- Se coloca al núcleo en la máquina universal, se realizaran procesos de carga y descarga tres veces hasta que el elemento falle
- La máquina registra simultáneamente las deformaciones axiales como transversales

10.6.3 Interpretación de datos

- El equipo nos proporciona directamente las deformaciones unitarias
- Se dibuja el diagrama esfuerzo-deformación unitaria
- Se calcula el modulo de elasticidad como la pendiente de la curva

Capítulo 11

CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL ACERO DE REFUERZO

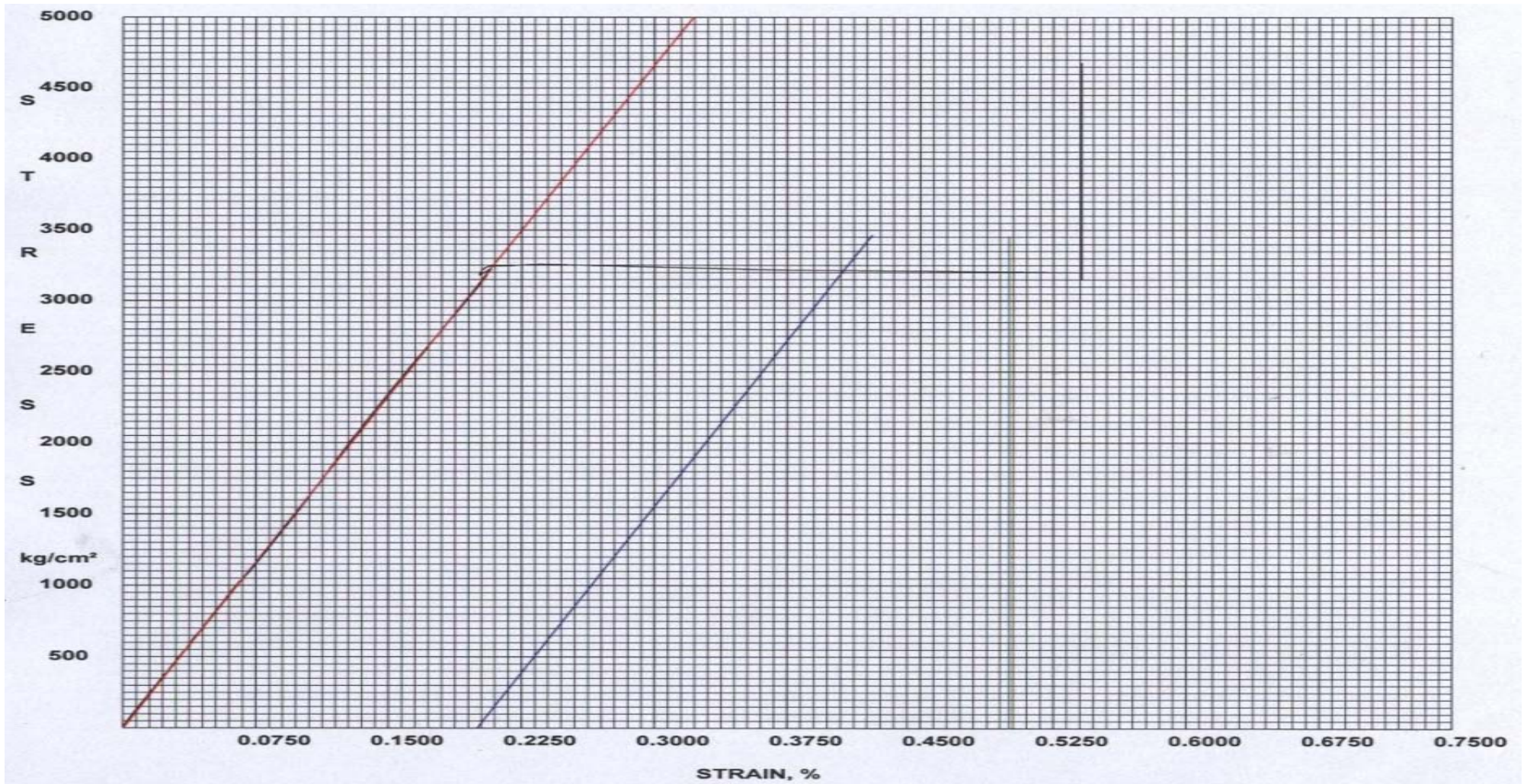
11.1 Ensayo de tracción de varillas

| Probeta N° | T1 | T2 | T3 | T4 |
|--|------------|------------|------------|-------------|
| Origen | | | | |
| Identificación de la probeta | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fecha de ensayo | 2010/05/06 | 2010/05/06 | 2010/05/06 | 2010/05/06 |
| Longitud (cm) | 81.3 | 76.9 | 73.5 | 79.7 |
| Masa (gr) | 410 | 1010 | 1500 | 2160 |
| Relación masa longitud (kg/m) | 0.504 | 1.313 | 2.041 | 2.710 |
| Diametro nominal (mm) | 10.00 | 14.00 | 18.00 | 20.00 |
| Área (mm ²) | 78.54 | 153.94 | 254.47 | 314.16 |
| Esfuerzo a la fluencia (MPa) | 319 | 513 | 499 | 535 |
| Módulo de elasticidad (MPa) | 152.353 | 268.627 | 197.059 | 220.588 |
| Porcentaje de elongación en 203.2 mm (%) | 18 | 13 | 16 | 14 |
| Carga máxima (KN) | 35.99 | 131.31 | 204.96 | 277.53 |
| Resistencia a la tracción (Mpa) | 458 | 853 | 805 | 883 |
| Tipo de falla | Corte | CC | PCC | Corte plano |

| Muestra | Resistencia a la tracción | Resistencia a la fluencia | Relación σ_{max}/f_y |
|----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| T1 | 458 | 319 | 1.44 |
| T2 | 853 | 513 | 1.66 |
| T3 | 805 | 499 | 1.61 |
| T4 | 883 | 535 | 1.65 |
| Promedio | | | 1.59 |

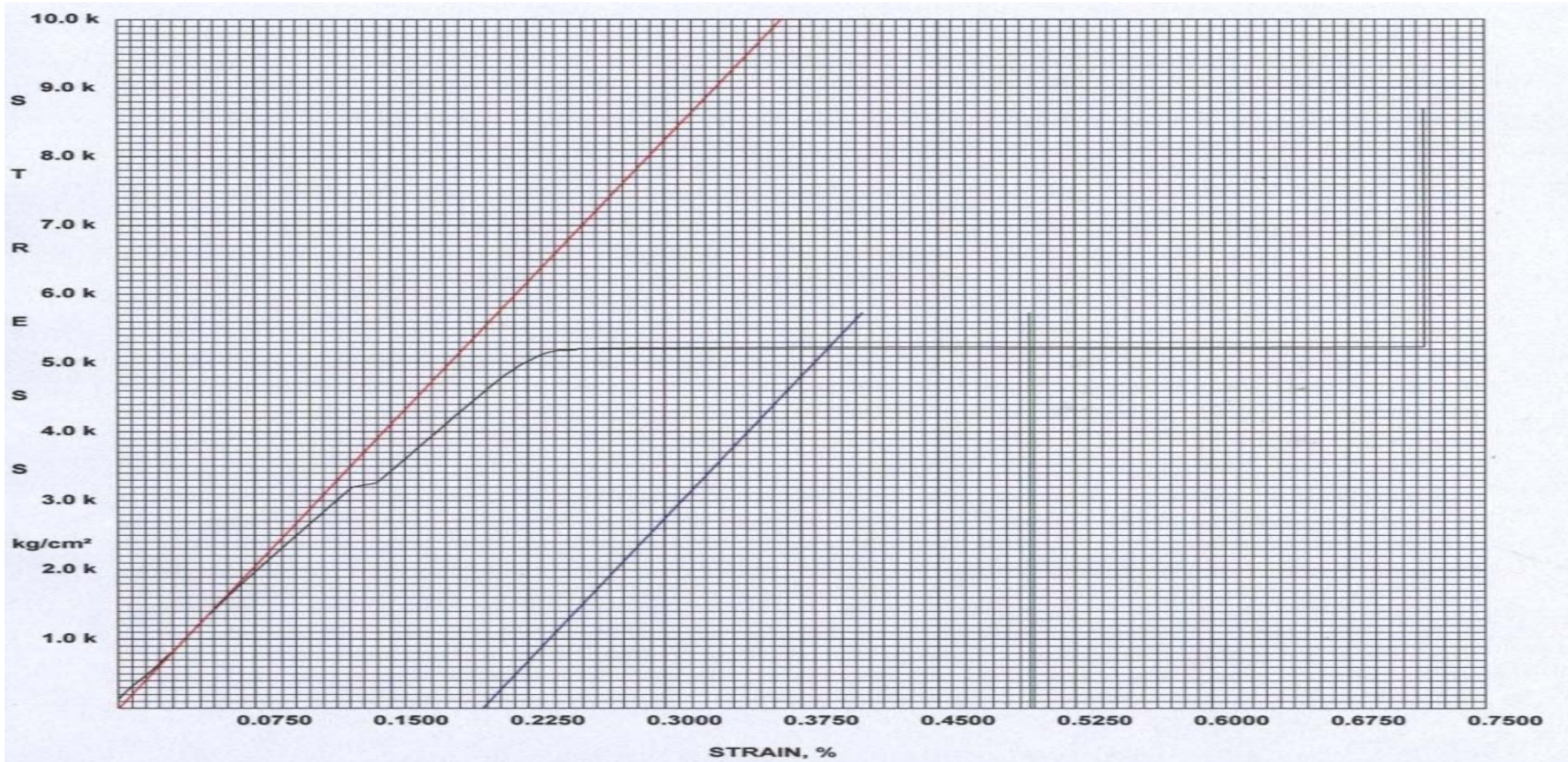
Muestra N° 1

□ = 10 mm



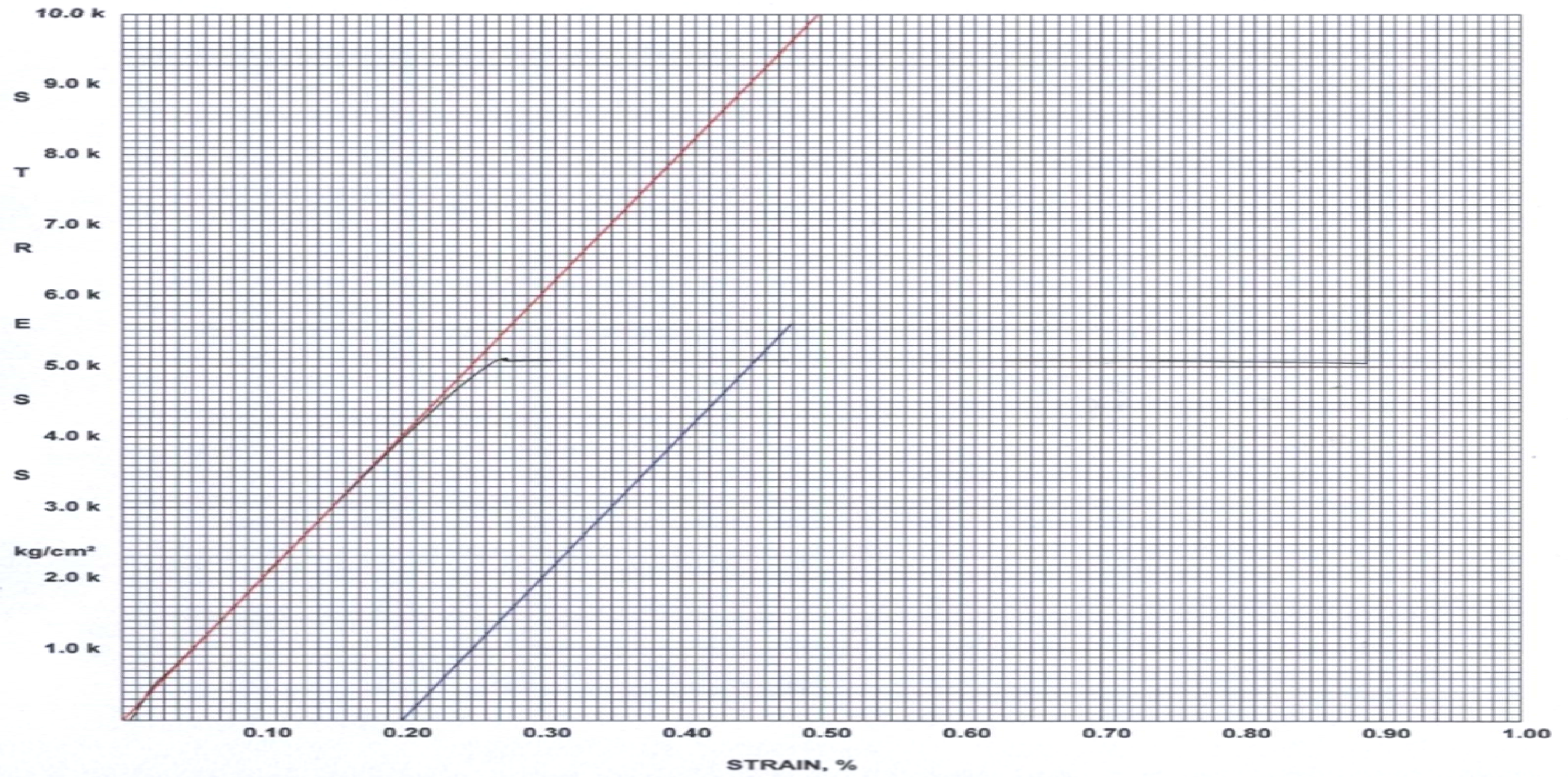
Muestra N° 2

□ = 14 mm



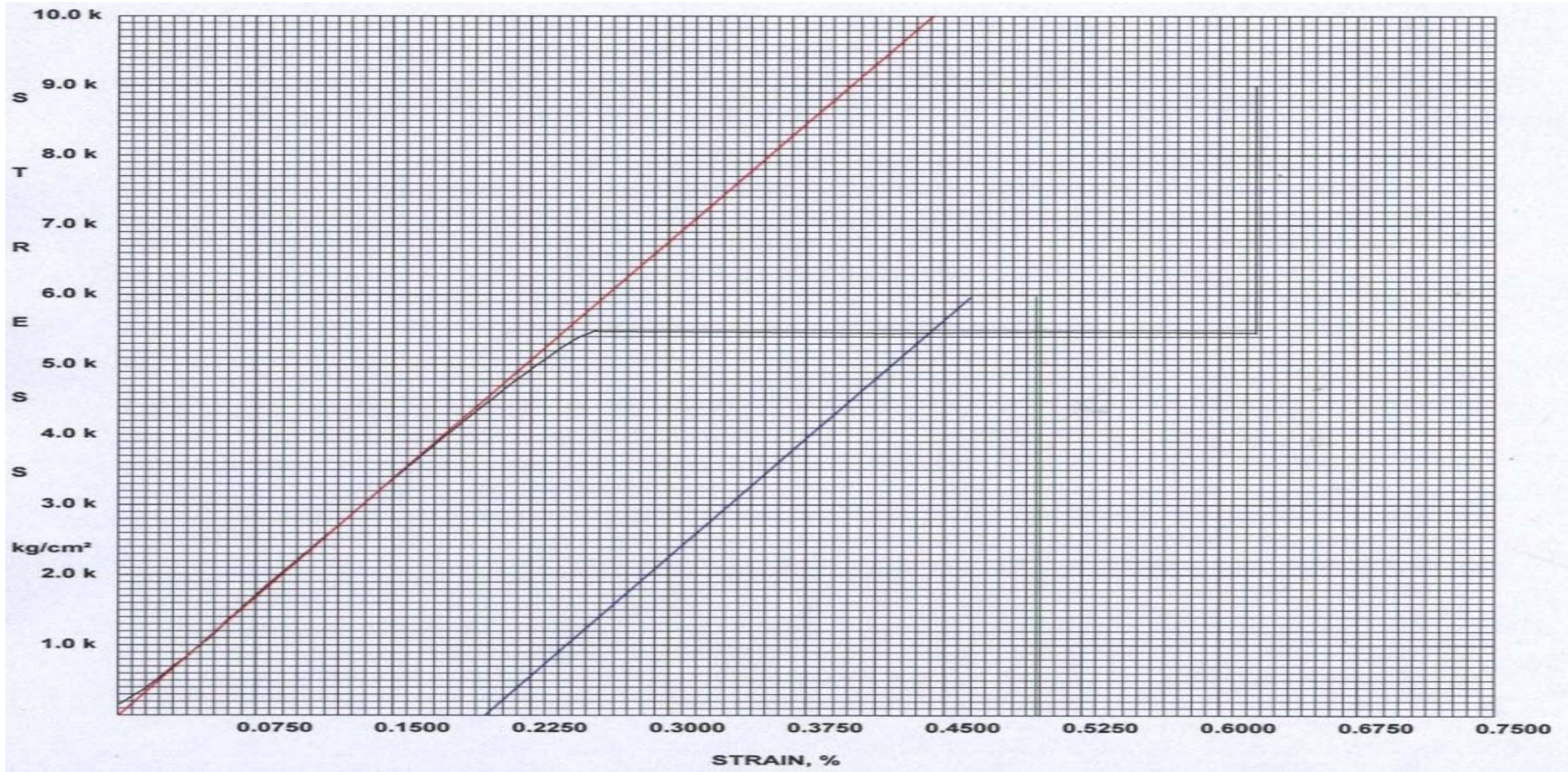
Muestra N° 3

□ = 18 mm



Muestra N° 4

□ = 20 mm



1.2 Velocidad de corrosión y resistividad del hormigón

| Elemento | Nivel | Diametro (mm) | Temperatura °C | Humedad relativa % | Resistividad kΩcm | I corrosión μA/cm ² |
|------------|---------|---------------|----------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|
| Losa | Primero | 18 | 20.30 | 59.00 | 73.00 | 0.40 |
| Losa | Primero | 8 | 20.20 | 56.00 | 68.00 | 0.35 |
| Columna A2 | Primero | 25 | 20.80 | 43.00 | 125.00 | 0.18 |
| Columna B1 | Segundo | 25 | 20.50 | 36.00 | 138.00 | 0.20 |
| Columna C2 | Segundo | 25 | 20.30 | 30.00 | 113.00 | 0.15 |
| Columna G2 | Segundo | 25 | 20.20 | 34.00 | 124.00 | 0.12 |
| Losa | Tercero | 18 | 20.20 | 48.00 | 63.00 | 0.30 |
| Losa | Cuarto | 18 | 21.00 | 54.00 | 42.00 | 0.68 |
| Losa | Cuarto | 18 | 21.50 | 59.00 | 53.00 | 0.65 |

Capítulo 12

CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN Y EL MÓDULO DEL HORMIGÓN

12.1 Carbonatación

| Núcleo N° | Fecha | Elemento | Nivel | Longitud del núcleo extraído (cm) | Distancia del núcleo al elemento más cercano (m) | Profundidad de carbonatación (mm) |
|-----------|------------|-------------|---------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1 | 05/04/2010 | columna F2 | cuarto | 18 | 0.90 | 4 |
| 2 | 05/04/2010 | columna H1 | cuarto | 11 | 1.20 | 4 |
| 3 | 05/04/2010 | columna C2 | cuarto | 18 | 1.20 | 3 |
| 4 | 05/04/2010 | columna A1 | tercero | 19 | 1.14 | 4 |
| 5 | 05/04/2010 | columna D1 | tercero | 16 | 1.13 | 4 |
| 6 | 05/04/2010 | columna F2 | tercero | 16 | 1.10 | 4 |
| 7 | 05/04/2010 | columna F1 | segundo | 18 | 0.90 | 3 |
| 8 | 05/04/2010 | columna D2 | segundo | 17 | 1.25 | 4 |
| 9 | 05/04/2010 | columna F2 | segundo | 15 | 1.10 | 3 |
| 10 | 05/04/2010 | columna G1 | primero | 18 | 1.10 | 4 |
| 11 | 05/04/2010 | columna E1 | primero | 15 | 1.10 | 3 |
| 12 | 05/04/2010 | columna E'1 | primero | 15 | 1.00 | 4 |
| 13 | 18/08/2010 | columna C2 | primero | 14 | 1.15 | 0.0 |
| 14 | 18/08/2010 | columna C1 | primero | 14 | 0.95 | 0.0 |
| Promedio | | | | | | 3.1 |

12.2 Resistencia a la compresión de núcleos de los núcleos de hormigón

| Muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--|-------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Columna | F2 | H1 | C2 | A1 | D1 | F2 | F1 | D2 | F2 | E1 | E1' | C2 | C1 |
| Planta | cuarta | cuarta | cuarta | tercera | tercera | tercera | segunda | segunda | segunda | primera | primera | primera | primera |
| Contenido de humedad | 1.87 | 5.59 | 6.87 | 7.41 | 6.95 | 7.08 | 6.74 | 6.35 | 4.99 | 6.58 | 6.3 | 5.75 | 6.42 |
| Refrentado | Mortero de azufre | | | | | | | | | | | | |
| Altura sin refrentado (cm) | 13.30 | 10.40 | 13.30 | 13.30 | 12.60 | 13.30 | 13.30 | 13.10 | 10.90 | 11.70 | 9.60 | 14 | 14 |
| Altura con refrentado (cm) | 13.60 | 10.90 | 13.70 | 13.70 | 13.10 | 13.80 | 13.70 | 13.60 | 11.40 | 12.10 | 10.00 | 14.2 | 14.3 |
| Diametro (cm) | 6.90 | 6.90 | 6.90 | 6.80 | 6.90 | 6.90 | 7.00 | 6.90 | 6.90 | 6.90 | 5.20 | 6.70 | 6.70 |
| Área (cm ²) | 37.4 | 37.4 | 37.4 | 36.3 | 37.4 | 37.4 | 38.5 | 37.4 | 37.4 | 37.4 | 21.2 | 35.3 | 35.3 |
| Volumen (cm ³) | 497.33 | 388.89 | 497.33 | 483.01 | 471.15 | 497.33 | 511.85 | 489.85 | 407.58 | 437.50 | 203.88 | 493.59 | 493.59 |
| Masa (kg) | 1.08 | 0.8831 | 1.10045 | 1.09472 | 1.0343 | 1.07339 | 1.1287 | 1.0932 | 0.95788 | 0.99264 | 0.44248 | 1.12 | 1.15 |
| Peso unitario (kg/m ³) | 2176 | 2271 | 2213 | 2266 | 2195 | 2158 | 2205 | 2232 | 2350 | 2269 | 2170 | 2269 | 2330 |
| Relación L/D | 2.0 | 1.6 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.0 |
| Carga máxima (kg) | 11638.00 | 9477 | 14005 | 13482 | 8329 | 10608 | 14591 | 12069 | 15955 | 19720 | 2306 | 22800 | 14000 |
| Factor | 1.00 | 0.97 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 1.00 | 1.00 |
| Resistencia (kg/cm ²) | 311.24 | 245.33 | 375.63 | 371.23 | 220.95 | 283.69 | 383.69 | 321.18 | 409.46 | 513.23 | 106.77 | 646.69 | 397.09 |
| Dirección de aplicación de la carga con respecto al plano horizontal | Vertical | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de falla | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 2 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 | tipo 4 |
| Tipo de extracción | horizontal | | | | | | | | | | | | |
| Tamaño máximo de agregado (mm) | 38.1 | 36.3 | 28.00 | 42.3 | 39.9 | 31.5 | 41.6 | 32.1 | 32.1 | 33.9 | 22.8 | 33.5 | 32.7 |

$$f'c_{CARAC} = \overline{f'c} - 1.28 S$$

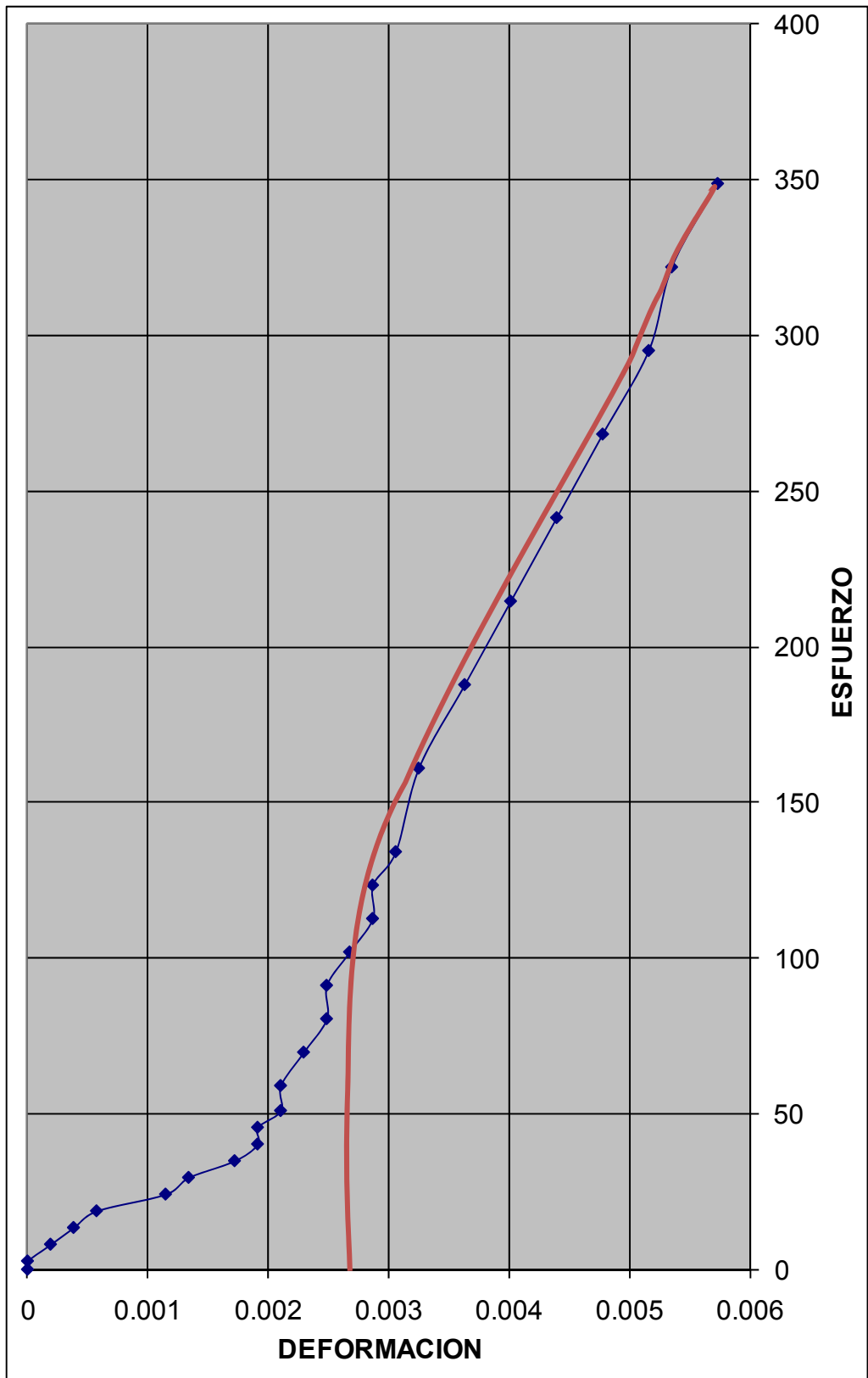
$$S = \sqrt{\frac{\sum((f'ci - \overline{f'c})^2)}{n - 1}}$$

| Elemento | Nivel | NÚCLEOS Resistencia kg/cm ² |
|---|---------|--|
| columna F2 | cuarto | 311 |
| columna H1 | cuarto | 245 |
| columna C2 | cuarto | 376 |
| columna A1 | tercero | 371 |
| columna D1 | tercero | 221 |
| columna F2 | tercero | 284 |
| columna F1 | segundo | 384 |
| columna D2 | segundo | 321 |
| columna F2 | segundo | 409 |
| columna E1 | primero | 513 |
| columna C1 | primero | 397 |
| Resistencia Promedio kg/cm ² | | 348 |
| Resistencia Característica kg/cm ² | | 242 |

12.3 Determinación del Modulo de Elasticidad del Hormigón

| NÚCLEO: 3 | |
|---|--|
| Diámetro: 6.89 cm | |
| Altura: 13.3 cm | Altura con refrenado : 13.6 cm |
| Área = 37.3 cm ² | Peso unitario = 2219 kg/m ³ |
| Masa = 1.10 kg | Humedad = 6.87 % |
| Relación L/D = 2.0 | Tamaño máximo del agregado = 28.0 mm |
| Carga máxima = 14005.00 Kg | f'c max = 375.6 kg/cm ² |
| 0.4 f'c max = 150.2 kg/cm ² | ε2 (Valor interpolado de 0.4 f'c) = 0.0032856 |
| ε1 (Valor de la curva al nuevo origen) = 0.0027 | Esfuerzo al 0,00005 = 0 |
| Falla tipo: 4 | |

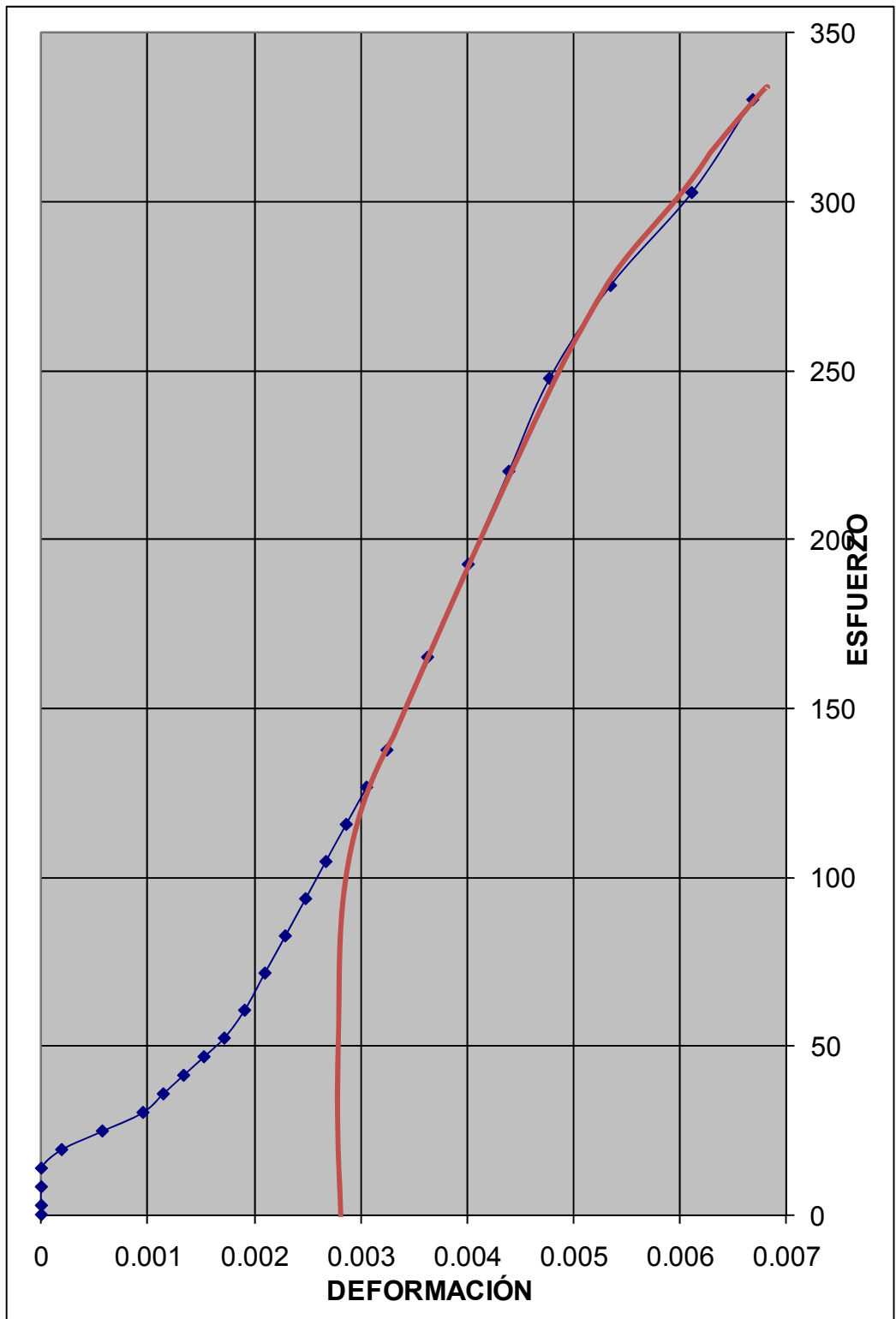
| Carga (Kg) | Lectura Deformimetro | Deformación (mm.) | Esfuerzo kg/cm ² | Deformación Unitaria |
|---------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.000 | 0.000 | 2.68 | - |
| 300 | 0.001 | 0.025 | 8.05 | 0.0001910 |
| 500 | 0.002 | 0.051 | 13.41 | 0.0003820 |
| 700 | 0.003 | 0.076 | 18.77 | 0.0005729 |
| 900 | 0.006 | 0.152 | 24.14 | 0.0011459 |
| 1100 | 0.007 | 0.178 | 29.50 | 0.0013368 |
| 1300 | 0.009 | 0.229 | 34.87 | 0.0017188 |
| 1500 | 0.010 | 0.254 | 40.23 | 0.0019098 |
| 1700 | 0.010 | 0.254 | 45.60 | 0.0019098 |
| 1900 | 0.011 | 0.279 | 50.96 | 0.0021008 |
| 2200 | 0.011 | 0.279 | 59.01 | 0.0021008 |
| 2600 | 0.012 | 0.305 | 69.73 | 0.0022917 |
| 3000 | 0.013 | 0.330 | 80.46 | 0.0024827 |
| 3400 | 0.013 | 0.330 | 91.19 | 0.0024827 |
| 3800 | 0.014 | 0.356 | 101.92 | 0.0026737 |
| 4200 | 0.015 | 0.381 | 112.65 | 0.0028647 |
| 4600 | 0.015 | 0.381 | 123.38 | 0.0028647 |
| 5000 | 0.016 | 0.406 | 134.10 | 0.0030556 |
| 6000 | 0.017 | 0.432 | 160.92 | 0.0032466 |
| 7000 | 0.019 | 0.483 | 187.75 | 0.0036286 |
| 8000 | 0.021 | 0.533 | 214.57 | 0.0040105 |
| 9000 | 0.023 | 0.584 | 241.39 | 0.0043925 |
| 10000 | 0.025 | 0.635 | 268.21 | 0.0047744 |
| 11000 | 0.027 | 0.686 | 295.03 | 0.0051564 |
| 12000 | 0.028 | 0.711 | 321.85 | 0.0053474 |
| 13000 | 0.030 | 0.762 | 348.67 | 0.0057293 |



$E_c = 256584.5721 \text{ kg/cm}^2$ | $\alpha = 13239$

| NÚCLEO: 4 | |
|---|--|
| Diámetro: 6.8 cm | |
| Altura: 13.3 cm | Altura con refrenado : 13.7 cm |
| Área = 36.3 cm ² | Peso unitario = 2266 kg/m ³ |
| Masa = 1.09 kg | Humedad = 7.41 % |
| Relación L/D = 2.0 | Tamaño máximo del agregado = 42.3 mm |
| Carga máxima = 13482.00 Kg | f'c max = 371.2 kg/cm ² |
| 0.4 f'c max = 148.5 kg/cm ² | ε2 (Valor interpolado de 0.4 f'c) = 0.0033966 |
| ε1 (Valor de la curva al nuevo origen) = 0.0028 | Esfuerzo al 0,00005 = 0 |
| Falla tipo: 4 | |

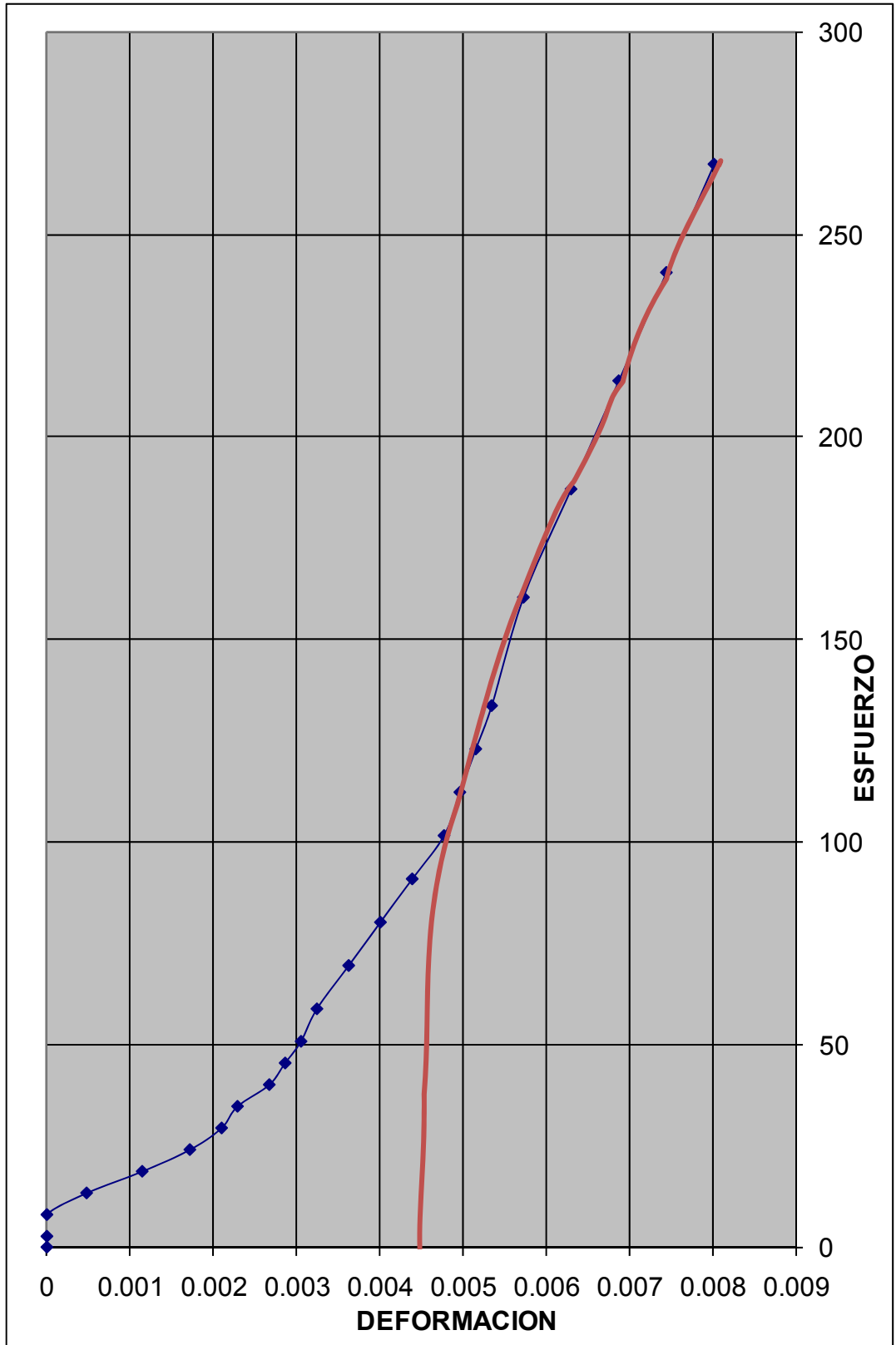
| Carga (Kg) | Lectura Deformimetro | Deformación (mm.) | Esfuerzo kg/cm ² | Deformación Unitaria |
|---------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.000 | 0.000 | 2.75 | - |
| 300 | 0.000 | 0.000 | 8.26 | - |
| 500 | 0 | 0.000 | 13.77 | - |
| 700 | 0.001 | 0.025 | 19.27 | 0.0001910 |
| 900 | 0.003 | 0.076 | 24.78 | 0.0005729 |
| 1100 | 0.005 | 0.127 | 30.29 | 0.0009549 |
| 1300 | 0.006 | 0.152 | 35.80 | 0.0011459 |
| 1500 | 0.007 | 0.178 | 41.30 | 0.0013368 |
| 1700 | 0.008 | 0.203 | 46.81 | 0.0015278 |
| 1900 | 0.009 | 0.229 | 52.32 | 0.0017188 |
| 2200 | 0.010 | 0.254 | 60.58 | 0.0019098 |
| 2600 | 0.011 | 0.279 | 71.59 | 0.0021008 |
| 3000 | 0.012 | 0.305 | 82.61 | 0.0022917 |
| 3400 | 0.013 | 0.330 | 93.62 | 0.0024827 |
| 3800 | 0.014 | 0.356 | 104.63 | 0.0026737 |
| 4200 | 0.015 | 0.381 | 115.65 | 0.0028647 |
| 4600 | 0.016 | 0.406 | 126.66 | 0.0030556 |
| 5000 | 0.017 | 0.432 | 137.68 | 0.0032466 |
| 6000 | 0.019 | 0.483 | 165.21 | 0.0036286 |
| 7000 | 0.021 | 0.533 | 192.75 | 0.0040105 |
| 8000 | 0.023 | 0.584 | 220.28 | 0.0043925 |
| 9000 | 0.025 | 0.635 | 247.82 | 0.0047744 |
| 10000 | 0.028 | 0.711 | 275.35 | 0.0053474 |
| 11000 | 0.032 | 0.813 | 302.89 | 0.0061113 |
| 12000 | 0.035 | 0.889 | 330.42 | 0.0066842 |



$E_c = 248878.337 \text{ kg/cm}^2$ $\alpha = 12917$

| NÚCLEO: 6 | |
|---|---|
| Diámetro: 6.9 cm | |
| Altura: 13.3 cm | Altura con refrenado : 13.8 cm |
| Área = 37.4 cm ² | Peso unitario = 2158 kg/m ³ |
| Masa = 1.07 kg | Humedad = 7.41 % |
| Relación L/D = 2.0 | Tamaño máximo del agregado = 31.5 mm |
| Carga máxima = 10608.00 Kg | f'c max = 283.7 kg/cm ² |
| 0.4 f'c max = 113.5 kg/cm ² | ε2 (Valor interpolado de 0.4 f'c) = 0.004986 |
| ε1 (Valor de la curva al nuevo origen) = 0.0044 | Esfuerzo al 0,00005 = 0 |
| Falla tipo: 4 | |

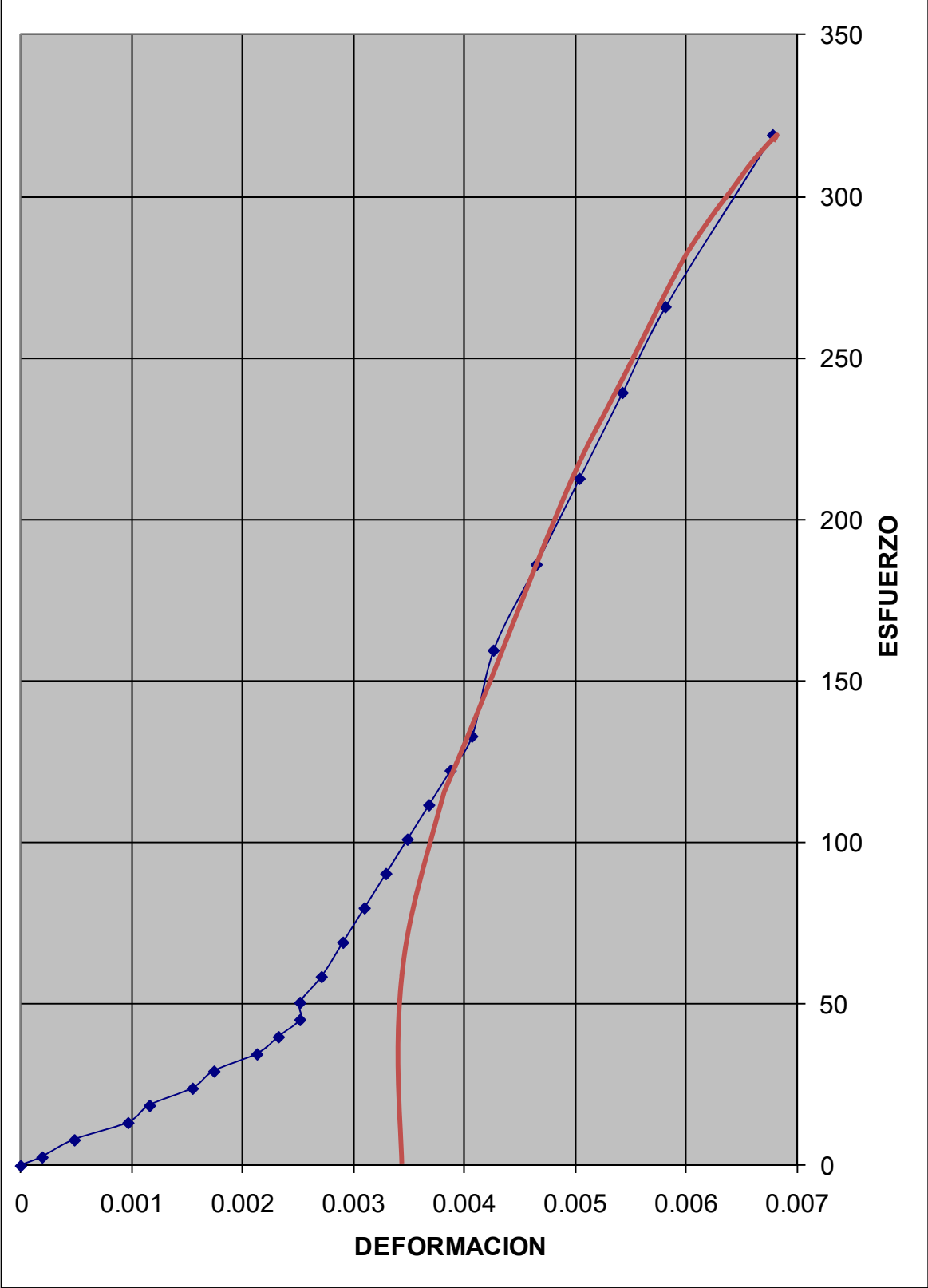
| Carga (Kg) | Lectura Deformimetro | Deformación (mm.) | Esfuerzo kg/cm ² | Deformación Unitaria |
|---------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.000 | 0.000 | 2.67 | - |
| 300 | 0.000 | 0.000 | 8.02 | - |
| 500 | 0.0025 | 0.064 | 13.37 | 0.0004774 |
| 700 | 0.006 | 0.152 | 18.72 | 0.0011459 |
| 900 | 0.009 | 0.229 | 24.07 | 0.0017188 |
| 1100 | 0.011 | 0.279 | 29.42 | 0.0021008 |
| 1300 | 0.012 | 0.305 | 34.77 | 0.0022917 |
| 1500 | 0.014 | 0.356 | 40.11 | 0.0026737 |
| 1700 | 0.015 | 0.381 | 45.46 | 0.0028647 |
| 1900 | 0.016 | 0.406 | 50.81 | 0.0030556 |
| 2200 | 0.017 | 0.432 | 58.83 | 0.0032466 |
| 2600 | 0.019 | 0.483 | 69.53 | 0.0036286 |
| 3000 | 0.021 | 0.533 | 80.23 | 0.0040105 |
| 3400 | 0.023 | 0.584 | 90.93 | 0.0043925 |
| 3800 | 0.025 | 0.635 | 101.62 | 0.0047744 |
| 4200 | 0.026 | 0.660 | 112.32 | 0.0049654 |
| 4600 | 0.027 | 0.686 | 123.02 | 0.0051564 |
| 5000 | 0.028 | 0.711 | 133.72 | 0.0053474 |
| 6000 | 0.030 | 0.762 | 160.46 | 0.0057293 |
| 7000 | 0.033 | 0.838 | 187.20 | 0.0063023 |
| 8000 | 0.036 | 0.914 | 213.94 | 0.0068752 |
| 9000 | 0.039 | 0.991 | 240.69 | 0.0074481 |
| 10000 | 0.042 | 1.067 | 267.43 | 0.0080211 |



| | |
|-------------------------------------|------------------|
| $E_c = 193632.3128 \text{ kg/cm}^2$ | $\alpha = 11496$ |
|-------------------------------------|------------------|

| NÚCLEO: 8 | |
|---|--|
| Diámetro: 6.92 cm | |
| Altura: 13.1 cm | Altura con refrenado : 13.6 cm |
| Área = 37.6 cm ² | Peso unitario = 2219 kg/m ³ |
| Masa = 1.09 kg | Humedad = 6.35 % |
| Relación L/D = 2.0 | Tamaño máximo del agregado = 31.5 mm |
| Carga máxima = 12069.00 Kg | f'c max = 320.9 kg/cm ² |
| 0.4 f'c max = 128.4 kg/cm ² | ε2 (Valor interpolado de 0.4 f'c) = 0.0039882 |
| ε1 (Valor de la curva al nuevo origen) = 0.0034 | Esfuerzo al 0,00005 = 0 |
| Falla tipo: 2 | |

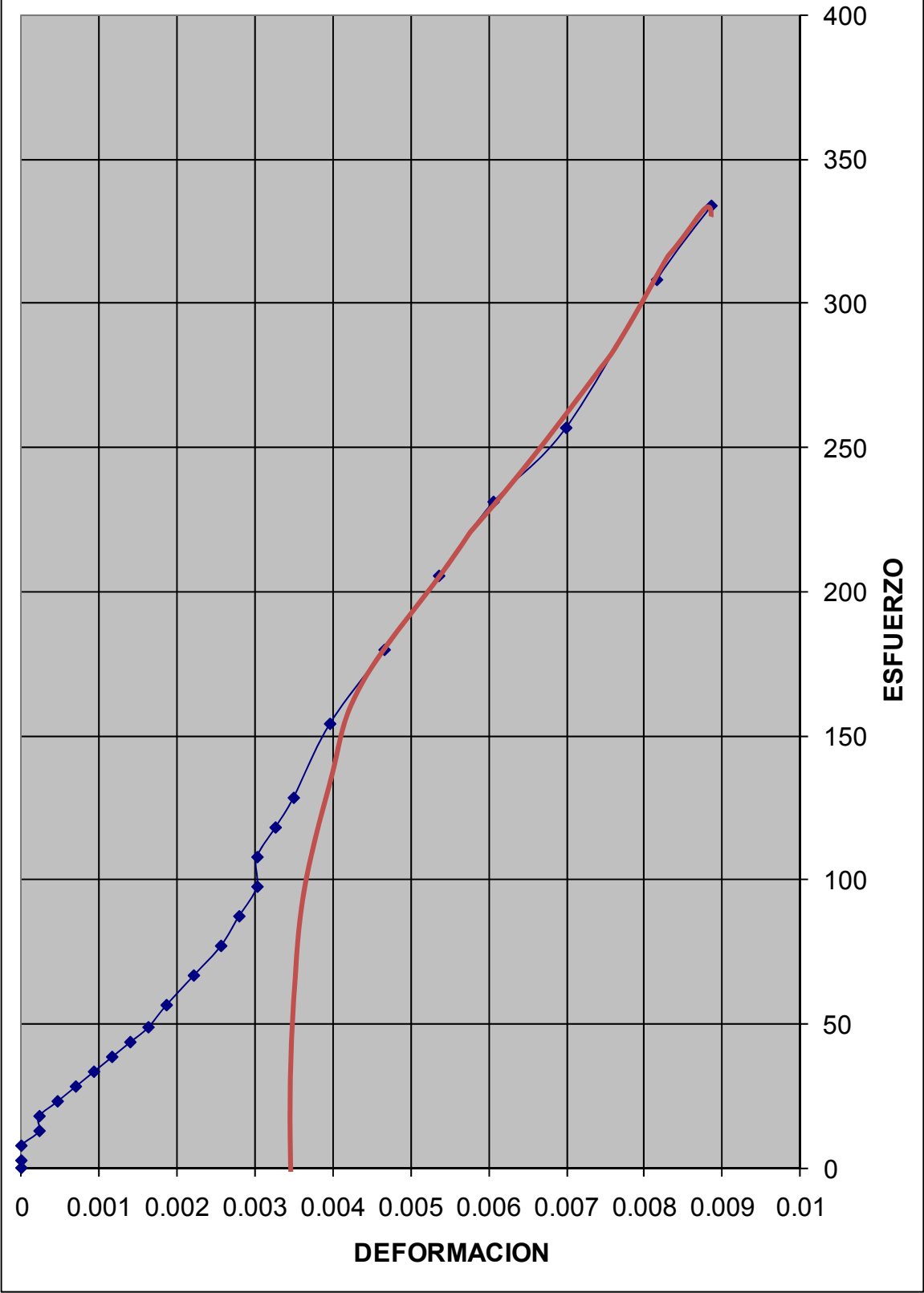
| Carga (Kg) | Lectura Deformimetro | Deformación (mm.) | Esfuerzo kg/cm² | Deformación Unitaria |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.001 | 0.025 | 2.66 | 0.0001939 |
| 300 | 0.003 | 0.064 | 7.98 | 0.0004847 |
| 500 | 0.005 | 0.127 | 13.29 | 0.0009695 |
| 700 | 0.006 | 0.152 | 18.61 | 0.0011634 |
| 900 | 0.008 | 0.203 | 23.93 | 0.0015511 |
| 1100 | 0.009 | 0.229 | 29.25 | 0.0017450 |
| 1300 | 0.011 | 0.279 | 34.57 | 0.0021328 |
| 1500 | 0.012 | 0.305 | 39.88 | 0.0023267 |
| 1700 | 0.013 | 0.330 | 45.20 | 0.0025206 |
| 1900 | 0.013 | 0.330 | 50.52 | 0.0025206 |
| 2200 | 0.014 | 0.356 | 58.50 | 0.0027145 |
| 2600 | 0.015 | 0.381 | 69.13 | 0.0029084 |
| 3000 | 0.016 | 0.406 | 79.77 | 0.0031023 |
| 3400 | 0.017 | 0.432 | 90.40 | 0.0032962 |
| 3800 | 0.018 | 0.457 | 101.04 | 0.0034901 |
| 4200 | 0.019 | 0.483 | 111.67 | 0.0036840 |
| 4600 | 0.02 | 0.508 | 122.31 | 0.0038779 |
| 5000 | 0.021 | 0.533 | 132.94 | 0.0040718 |
| 6000 | 0.022 | 0.559 | 159.53 | 0.0042656 |
| 7000 | 0.024 | 0.610 | 186.12 | 0.0046534 |
| 8000 | 0.026 | 0.660 | 212.71 | 0.0050412 |
| 9000 | 0.028 | 0.711 | 239.30 | 0.0054290 |
| 10000 | 0.030 | 0.762 | 265.89 | 0.0058168 |
| 12000 | 0.035 | 0.889 | 319.06 | 0.0067863 |



| | |
|-----------------------------------|------------------|
| $E_c = 218228.86 \text{ kg/cm}^2$ | $\alpha = 12182$ |
|-----------------------------------|------------------|

| NÚCLEO: 9 | |
|---|--|
| Diámetro: 6.93 cm | |
| Altura: 10.9 cm | Altura con refrenado : 11.4 cm |
| Área = 37.7 cm ² | Peso unitario = 2330 kg/m ³ |
| Masa = 0.96 kg | Humedad = 4.99 % |
| Relación L/D = 1.6 | Tamaño máximo del agregado = 32.1 mm |
| Carga máxima = 15955.00 Kg | f'c max = 409.5 kg/cm ² |
| 0.4 f'c max = 163.8 kg/cm ² | ε2 (Valor interpolado de 0.4 f'c) = 0.0042285 |
| ε1 (Valor de la curva al nuevo origen) = 0.0035 | Esfuerzo al 0,00005 = 0 |
| Factor de corrección L/D = 0.968 | |
| Falla tipo: 4 | |

| Carga (Kg) | Lectura Deformimetro | Deformación (mm.) | Esfuerzo kg/cm ² | Deformación Unitaria |
|---------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.000 | 0.000 | 2.57 | - |
| 300 | 0.000 | 0.000 | 7.70 | - |
| 500 | 0.001 | 0.025 | 12.83 | 0.0002330 |
| 700 | 0.001 | 0.025 | 17.96 | 0.0002330 |
| 900 | 0.002 | 0.051 | 23.10 | 0.0004661 |
| 1100 | 0.003 | 0.076 | 28.23 | 0.0006991 |
| 1300 | 0.004 | 0.102 | 33.36 | 0.0009321 |
| 1500 | 0.005 | 0.127 | 38.50 | 0.0011651 |
| 1700 | 0.006 | 0.152 | 43.63 | 0.0013982 |
| 1900 | 0.007 | 0.178 | 48.76 | 0.0016312 |
| 2200 | 0.008 | 0.203 | 56.46 | 0.0018642 |
| 2600 | 0.010 | 0.241 | 66.73 | 0.0022138 |
| 3000 | 0.011 | 0.279 | 76.99 | 0.0025633 |
| 3400 | 0.012 | 0.305 | 87.26 | 0.0027963 |
| 3800 | 0.013 | 0.330 | 97.52 | 0.0030294 |
| 4200 | 0.013 | 0.330 | 107.79 | 0.0030294 |
| 4600 | 0.014 | 0.356 | 118.05 | 0.0032624 |
| 5000 | 0.015 | 0.381 | 128.32 | 0.0034954 |
| 6000 | 0.017 | 0.432 | 153.98 | 0.0039615 |
| 7000 | 0.020 | 0.508 | 179.65 | 0.0046606 |
| 8000 | 0.023 | 0.584 | 205.31 | 0.0053596 |
| 9000 | 0.026 | 0.660 | 230.97 | 0.0060587 |
| 10000 | 0.030 | 0.762 | 256.64 | 0.0069908 |
| 12000 | 0.035 | 0.889 | 307.96 | 0.0081560 |
| 13000 | 0.038 | 0.9652 | 333.63 | 0.0088550 |



| | |
|-----------------------------------|------------------|
| $E_c = 224819.94 \text{ kg/cm}^2$ | $\alpha = 11110$ |
|-----------------------------------|------------------|

12.3.1 Cuadro de resumen con resultados Modulo de Elasticidad

$$\alpha = \frac{E}{\sqrt{f'c}}$$

| Muestra | Modulo de elasticidad kg/cm² | α |
|----------------|--|----------------------------|
| Núcleo 3 | 256585 | 13238.95 |
| Núcleo 4 | 248878 | 12917.08 |
| Núcleo 6 | 193632 | 11496.23 |
| Núcleo 8 | 218229 | 12182.27 |
| Núcleo 9 | 224820 | 11110.34 |

| Muestra | Modulo de Poisson |
|----------------|--------------------------|
| Núcleo 13 | 0.19 |
| Núcleo 14 | 0.07 |

12.4 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico

Para los cálculos se utilizó el valor promedio del módulo de Poisson obtenido en los ensayos de compresión de los núcleos, para los núcleos 1 y 2 ensayados en el EPN se utilizaron los que corresponden:

Núcleo 1 (Laboratorio EPN) = 0.19

Núcleo 2 (Laboratorio EPN) = 0.07

$$\text{Modulo de Poisson} = \frac{0.19 + 0.07}{2} = 0.13$$

Los pesos específicos se utilizaron los reales para los elementos en los que se extrajeron núcleos y un promedio de estos valores para los otros elementos ensayados

| Elemento | Nivel | Pesos específicos kg/m ³ |
|-------------|---------|--|
| Columna F2 | cuarto | 2176 |
| Columna H1 | cuarto | 2271 |
| Columna C2 | cuarto | 2219 |
| Columna A1 | tercero | 2266 |
| Columna D1 | tercero | 2195 |
| Columna F2 | tercero | 2158 |
| Columna F1 | segundo | 2231 |
| Columna D2 | segundo | 2219 |
| Columna F2 | segundo | 2330 |
| Columna E1 | primero | 2262 |
| Columna E1' | primero | 2187 |
| Columna C2 | primero | 2269 |
| Columna C1 | primero | 2330 |
| Promedio | | 2239 |

12.4.1 Resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido para determinar la resistencia referencial del hormigón

| Elemento | Nivel | vd 1 (m/s) | vd 2 (m/s) | v prom (m/s) | α | v (i-t)1 (m/s) | v (i-t)2 (m/s) | v (i-t) prom (m/s) | ρ específico kg/m ³ | Poisson | Ed kg/cm ² | f'c kg/cm ² | β | f'c corregido kg/cm ² |
|-------------|---------|---------------|---------------|-----------------|----------|-------------------|-------------------|-----------------------|--|---------|--------------------------|---------------------------|---------|-------------------------------------|
| Columna F2 | cuarto | 2305 | 2258 | 2282 | 1.558 | 3591 | 3518 | 3555 | 2176 | 0.13 | 269375 | 185 | 1.315 | 243 |
| Columna H1 | cuarto | 1877 | 2254 | 2066 | 1.558 | 2924 | 3512 | 3218 | 2271 | 0.13 | 230422 | 155 | 1.315 | 204 |
| Columna C2 | cuarto | 2378 | 2297 | 2338 | 1.558 | 3705 | 3579 | 3642 | 2219 | 0.13 | 288348 | 203 | 1.315 | 266 |
| Columna A1 | tercero | 2419 | 2501 | 2460 | 1.558 | 3769 | 3897 | 3833 | 2266 | 0.13 | 326127 | 246 | 1.315 | 324 |
| Columna D1 | tercero | 1723 | 1793 | 1758 | 1.558 | 2684 | 2793 | 2739 | 2195 | 0.13 | 161335 | 130 | 1.315 | 171 |
| Columna F2 | tercero | 2074 | 2196 | 2135 | 1.558 | 3231 | 3421 | 3326 | 2158 | 0.13 | 233940 | 158 | 1.315 | 207 |
| Columna F1 | segundo | 2354 | 2300 | 2327 | 1.558 | 3668 | 3583 | 3625 | 2231 | 0.13 | 287309 | 202 | 1.315 | 265 |
| Columna D2 | segundo | 2189 | 2101 | 2145 | 1.558 | 3410 | 3273 | 3342 | 2219 | 0.13 | 242811 | 164 | 1.315 | 215 |
| Columna F2 | segundo | 2354 | 2399 | 2377 | 1.558 | 3668 | 3738 | 3703 | 2330 | 0.13 | 312960 | 230 | 1.315 | 302 |
| Columna E1 | primero | 2487 | 2399 | 2443 | 1.558 | 3875 | 3738 | 3806 | 2262 | 0.13 | 321067 | 240 | 1.315 | 315 |
| Columna E1' | primero | 1613 | 1785 | 1699 | 1.558 | 2513 | 2781 | 2647 | 2187 | 0.13 | 150139 | 129 | 1.315 | 169 |
| Columna C2 | primero | 2842 | 2945 | 2894 | 1.558 | 4428 | 4588 | 4508 | 2269 | 0.19 | 428155 | 413 | 1.315 | 544 |
| Columna C1 | primero | 2358 | 2225 | 2292 | 1.558 | 3674 | 3467 | 3570 | 2330 | 0.07 | 299544 | 214 | 1.315 | 282 |

Resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido para determinar la resistencia referencial del hormigón

| Elemento | Nivel | vd 1 (m/s) | vd 2 (m/s) | v prom (m/s) | α | v (i-t)1 (m/s) | v (i-t)2 (m/s) | v (i-t) prom (m/s) | ρ especifico | Poisson | Ed kg/cm ² | f'c kg/cm ² | β | f'c corregido kg/cm ² |
|------------------|---------|---------------|---------------|-----------------|----------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|---------|--------------------------|---------------------------|---------|-------------------------------------|
| Columna A1 | cuarto | 2456 | 2389 | 2423 | 1.558 | 3826 | 3722 | 3774 | 2239 | 0.13 | 312492 | 229 | 1.315 | 302 |
| Columna C1 | cuarto | 2258 | 2298 | 2278 | 1.558 | 3518 | 3580 | 3549 | 2239 | 0.13 | 276324 | 191 | 1.315 | 251 |
| Columna E1 | cuarto | 2158 | 2230 | 2194 | 1.558 | 3362 | 3474 | 3418 | 2239 | 0.13 | 256321 | 174 | 1.315 | 228 |
| Columna G1 | cuarto | 2548 | 2600 | 2574 | 1.558 | 3970 | 4051 | 4010 | 2239 | 0.13 | 352800 | 283 | 1.315 | 372 |
| Columna D2 | cuarto | 2258 | 2199 | 2229 | 1.558 | 3518 | 3426 | 3472 | 2239 | 0.13 | 264445 | 180 | 1.315 | 237 |
| Columna B1 | tercero | 1975 | 1952 | 1964 | 1.558 | 3077 | 3041 | 3059 | 2239 | 0.13 | 205292 | 142 | 1.315 | 187 |
| Columna F1 | tercero | 2135 | 2135 | 2135 | 1.558 | 3326 | 3326 | 3326 | 2239 | 0.13 | 242721 | 163 | 1.315 | 215 |
| Columna G2 | tercero | 1999 | 2120 | 2060 | 1.558 | 3114 | 3303 | 3209 | 2239 | 0.13 | 225857 | 153 | 1.315 | 201 |
| Columna C2 | tercero | 2405 | 2405 | 2405 | 1.558 | 3747 | 3747 | 3747 | 2239 | 0.13 | 307993 | 224 | 1.315 | 295 |
| Columna A2 | tercero | 2289 | 2358 | 2324 | 1.558 | 3566 | 3674 | 3620 | 2239 | 0.13 | 287472 | 202 | 1.315 | 265 |
| Viga eje 1 eje D | tercero | 2302 | 2345 | 2324 | 1.558 | 3587 | 3654 | 3620 | 2239 | 0.13 | 287472 | 202 | 1.315 | 265 |
| Columna G1 | tercero | 2580 | 2478 | 2529 | 1.558 | 4020 | 3861 | 3940 | 2239 | 0.13 | 340572 | 265 | 1.315 | 349 |
| Columna H2 | segundo | 2358 | 2345 | 2352 | 1.558 | 3674 | 3654 | 3664 | 2239 | 0.13 | 294443 | 209 | 1.315 | 275 |
| Columna B2 | segundo | 2200 | 2356 | 2278 | 1.558 | 3428 | 3671 | 3549 | 2239 | 0.13 | 276324 | 191 | 1.315 | 251 |
| Columna B1 | segundo | 2089 | 2305 | 2197 | 1.558 | 3255 | 3591 | 3423 | 2239 | 0.13 | 257022 | 174 | 1.315 | 229 |
| Columna D1 | segundo | 2459 | 2158 | 2309 | 1.558 | 3831 | 3362 | 3597 | 2239 | 0.13 | 283773 | 198 | 1.315 | 260 |
| Viga eje D eje 1 | cuarto | 2045 | 2098 | 2072 | 1.558 | 3186 | 3269 | 3227 | 2239 | 0.13 | 228497 | 154 | 1.315 | 203 |
| Columna H1 | primero | 2126 | 1987 | 2057 | 1.558 | 3312 | 3096 | 3204 | 2239 | 0.13 | 225200 | 152 | 1.315 | 200 |
| Columna B2 | primero | 2248 | 2305 | 2277 | 1.558 | 3502 | 3591 | 3547 | 2239 | 0.13 | 275960 | 191 | 1.315 | 251 |
| Columna D2 | primero | 2125 | 2198 | 2161.5 | 1.558 | 3311 | 3424 | 3368 | 2239 | 0.13 | 248783 | 168 | 1.315 | 221 |

12.4.1 Cuadro de resumen con resultados del ensayo de ultrasonido

| Elemento | Nivel | Velocidad de onda m/s | Resistencia kg/cm² |
|-----------------|--------------|----------------------------------|--|
| Columna F2 | cuarto | 3555 | 243 |
| Columna H1 | cuarto | 3218 | 204 |
| Columna C2 | cuarto | 3642 | 266 |
| Columna A1 | tercero | 3833 | 324 |
| Columna D1 | tercero | 2739 | 171 |
| Columna F2 | tercero | 3326 | 207 |
| Columna F1 | segundo | 3625 | 265 |
| Columna D2 | segundo | 3342 | 215 |
| Columna F2 | segundo | 3703 | 302 |
| Columna E1 | primero | 3806 | 315 |
| Columna C1 | primero | 3570 | 282 |
| Promedio | | 3487 | 254 |

| Elemento | Nivel | Velocidad de onda m/s | Resistencia kg/cm² |
|------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Columna A1 | cuarto | 3774 | 302 |
| Columna C1 | cuarto | 3549 | 251 |
| Columna E1 | cuarto | 3418 | 228 |
| Columna G1 | cuarto | 4010 | 372 |
| Columna D2 | cuarto | 3472 | 237 |
| Columna B1 | tercero | 3059 | 187 |
| Columna F1 | tercero | 3326 | 215 |
| Columna G2 | tercero | 3209 | 201 |
| Columna C2 | tercero | 3747 | 295 |
| Columna A2 | tercero | 3620 | 265 |
| Viga eje 1 eje D | tercero | 3620 | 265 |
| Columna G1 | tercero | 3940 | 349 |
| Columna H2 | segundo | 3664 | 275 |
| Columna B2 | segundo | 3549 | 251 |
| Columna B1 | segundo | 3423 | 229 |
| Columna D1 | segundo | 3597 | 260 |
| Viga eje D eje 1 | cuarto | 3227 | 203 |
| Columna H1 | primero | 3204 | 200 |
| Columna B2 | primero | 3547 | 251 |
| Columna D2 | primero | 3368 | 221 |
| Promedio | | 3516 | 253 |

12.5 Resultados obtenidos en el ensayo esclerométrico para determinar la resistencia referencial del hormigón

Para los cálculos de este ensayo se utilizó el promedio de las profundidades de carbonatación de los núcleos extraídos para los elementos complementarios en los que se desconoce la profundidad de carbonatación.

Datos de los elementos ensayados:

Altura relativa a la que se realizó el ensayo: desde 0.85m a 1.30 m en columnas y desde 0.10 m a 0.18m en vigas.

Tamaño de la muestra: 15cm x 15cm aprox.

Resistencia de diseño: desconocida:

Temperatura ambiental: 9°C

Edad del hormigón: 28 años aproximadamente

Exposición del elemento: interperie

Angulo de ensayo: 0°

Condiciones superficiales: seca con terminado

Preparación de la superficie: piedra abrasiva

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| Columna F2 Cuarta planta | Lectura del martillo | 40 | 38 | 40 | 38 | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| | Lectura corregida | 30.5 | 29.4 | 30.5 | 29.4 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 32.1 | 30.5 | 30.5 |
| | f _c (MPa) | 21 | 19 | 21 | 19 | 21 | 21 | 21 | 23 | 21 | 21 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 20.80 | | | | | 212.10 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 19.35 | | | | | 197.28 | | | | |
| Columna H1 Cuarta planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 40 | 40 | 42 | 42 | 42 | 40 | 42 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| | Lectura corregida | 32.1 | 32.1 | 30.5 | 30.5 | 32.1 | 32.1 | 32.1 | 30.5 | 32.1 | 30.5 |
| | f _c (MPa) | 23 | 23 | 21 | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 21 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.20 | | | | | 226.38 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 20.88 | | | | | 212.90 | | | | |
| Columna C2 Cuarta planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 |
| | Lectura corregida | 32.6 | 32.6 | 32.6 | 34.3 | 34.3 | 32.6 | 32.6 | 32.6 | 32.6 | 32.6 |
| | f _c (MPa) | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.20 | | | | | 246.77 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 23.66 | | | | | 241.27 | | | | |
| Columna A1 Tercera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| | Lectura corregida | 30.5 | 30.5 | 32.1 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 32.1 | 32.1 | 32.1 |
| | f _c (MPa) | 21 | 21 | 23 | 21 | 21 | 21 | 21 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.80 | | | | | 222.30 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 20.48 | | | | | 208.82 | | | | |
| Columna D1 Tercera planta | Lectura del martillo | 41 | 42 | 42 | 42 | 40 | 42 | 40 | 42 | 42 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| | Lectura corregida | 31.3 | 32.1 | 32.1 | 32.1 | 30.5 | 32.1 | 30.5 | 32.1 | 32.1 | 30.5 |
| | f _c (MPa) | 22 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 21 | 23 | 23 | 21 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.30 | | | | | 227.40 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 21.09 | | | | | 215.01 | | | | |
| Columna F2 Tercera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 42 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 |
| | Lectura corregida | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 32.1 | 32.1 | 32.1 | 32.1 |
| | f _c (MPa) | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.80 | | | | | 222.30 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 20.48 | | | | | 208.82 | | | | |

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Columna F1 Segunda planta | Lectura del martillo | 38 | 38 | 38 | 36 | 38 | 36 | 36 | 36 | 36 | 38 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 |
| | Lectura corregida | 31.4 | 31.4 | 31.4 | 29.8 | 31.4 | 29.8 | 29.8 | 29.8 | 29.8 | 31.4 |
| | f _c (MPa) | 22 | 22 | 22 | 19 | 22 | 19 | 19 | 19 | 19 | 22 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 20.50 | | | | | 209.04 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 18.48 | | | | | 188.40 | | | | |
| Columna D2 Segunda planta | Lectura del martillo | 38 | 38 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 | 38 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.73 | 0.73 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.73 | 0.72 | 0.73 | 0.72 |
| | Lectura corregida | 29.40 | 29.40 | 30.53 | 30.53 | 30.53 | 30.53 | 29.40 | 30.53 | 29.40 | 30.53 |
| | f _c (MPa) | 19 | 19 | 21 | 21 | 21 | 21 | 19 | 21 | 19 | 21 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 20.20 | | | | | 205.98 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 18.88 | | | | | 192.50 | | | | |
| Columna F2 Segunda planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 | 38 | 38 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.78 | 0.73 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 31.4 | 29.4 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 24 | 23 | 22 | 22 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.90 | | | | | 233.51 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 22.17 | | | | | 226.11 | | | | |
| Columna E1 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.40 | | | | | 238.61 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 22.32 | | | | | 227.61 | | | | |
| Columna C1 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 42 | 40 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | Lectura corregida | 42.4 | 42.4 | 42.4 | 42.4 | 44.5 | 44.5 | 44.5 | 42.4 | 42.4 | 44.5 |
| | f _c (MPa) | 37 | 37 | 37 | 37 | 41 | 41 | 41 | 37 | 37 | 41 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 38.60 | | | | | 393.61 | | | | |
| | Resistencia Característica (MPa) (kg/cm ²) | 35.96 | | | | | 366.65 | | | | |

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| Columna A1 Cuarta planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 42 | 38 | 42 | 38 | 40 | 38 | 42 | 38 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.77 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 31.0 | 33.8 | 31.0 | 32.2 | 31.0 | 33.8 | 31.0 |
| | f _c (MPa) | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 22 | 23 | 22 | 25 | 22 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.60 | | | | | 240.65 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.67 | | | | | 221.00 | | | | |
| Columna C1 Cuarta planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 38 | 42 | 38 | 38 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.77 | 0.77 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 31.0 | 33.8 | 31.0 | 31.0 | 33.8 |
| | f _c (MPa) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 22 | 22 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.10 | | | | | 245.75 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.25 | | | | | 226.84 | | | | |
| Columna E1 Cuarta planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 25 | 25 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.20 | | | | | 246.77 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.88 | | | | | 233.29 | | | | |
| Columna G1 Cuarta planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 40 | 38 | 40 | 40 | 42 | 42 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 31 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 33.8 |
| | f _c (MPa) | 25 | 25 | 23 | 22 | 23 | 23 | 25 | 25 | 23 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.90 | | | | | 243.71 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.37 | | | | | 228.09 | | | | |
| Columna H1 Tercera planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.40 | | | | | 238.61 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.32 | | | | | 227.61 | | | | |
| Viga D1-H1 Tercera planta | Lectura del martillo | 38 | 40 | 40 | 40 | 42 | 38 | 38 | 40 | 42 | 38 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.77 |
| | Lectura corregida | 31.0 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 31.0 | 31.0 | 32.2 | 33.8 | 31.0 |
| | f _c (MPa) | 22 | 23 | 23 | 23 | 25 | 22 | 22 | 23 | 23 | 22 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.80 | | | | | 232.50 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.62 | | | | | 220.50 | | | | |

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| Columna C2 Tercera planta | Lectura del martillo | 42 | 38 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 40 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 31.0 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 25 | 22 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 23 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.30 | | | | | 247.79 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.82 | | | | | 232.66 | | | | |
| Columna B1 Tercera planta | Lectura del martillo | 42 | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 25 | 23 | 23 | 23 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.40 | | | | | 248.81 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.16 | | | | | 236.20 | | | | |
| Columna A2 Tercera planta | Lectura del martillo | 40 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.00 | | | | | 244.73 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.65 | | | | | 230.97 | | | | |
| Viga D-1 Tercera planta | Lectura del martillo | 40 | 42 | 42 | 42 | 42 | 38 | 38 | 38 | 38 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 31.0 | 31.0 | 31.0 | 31.0 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 23 | 25 | 25 | 25 | 25 | 22 | 22 | 22 | 22 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.60 | | | | | 240.65 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.67 | | | | | 221.00 | | | | |
| Columna E1 Segunda planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 42 | 42 | 42 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 25 | 25 | 25 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.80 | | | | | 242.69 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.48 | | | | | 229.21 | | | | |
| Columna G1 Segunda planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 38 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 22 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.80 | | | | | 232.50 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.26 | | | | | 226.99 | | | | |

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| Columna H2 Segunda planta | Lectura del martillo | 40 | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 |
| | f _c (MPa) | 23 | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.40 | | | | | 238.61 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.32 | | | | | 227.61 | | | | |
| Columna B2 Segunda planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 42 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 | 23 | 23 | 25 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.40 | | | | | 238.61 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.32 | | | | | 227.61 | | | | |
| Columna A1 Segunda planta | Lectura del martillo | 42 | 40 | 40 | 38 | 40 | 42 | 40 | 42 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 25 | 23 | 23 | 22 | 23 | 25 | 23 | 25 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.50 | | | | | 239.63 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.12 | | | | | 225.54 | | | | |
| Columna D1' Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 38 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 23 | 23 | 22 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.10 | | | | | 235.55 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.16 | | | | | 225.92 | | | | |
| Columna D1 Primera planta | Lectura del martillo | 42 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 25 | 23 | 23 | 23 | 22 | 23 | 23 | 23 | 22 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.95 | | | | | 223.88 | | | | |
| Columna B1 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f _c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| Columna F1 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.40 | | | | | 238.61 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.32 | | | | | 227.61 | | | | |
| Columna H1 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.20 | | | | | 236.57 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.39 | | | | | 228.32 | | | | |
| Columna H2 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 36 | 40 | 40 | 42 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 29.4 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 20 | 23 | 23 | 25 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.10 | | | | | 235.55 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.35 | | | | | 217.67 | | | | |
| Columna A1 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.90 | | | | | 233.51 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.50 | | | | | 229.39 | | | | |
| Columna A2 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.20 | | | | | 236.57 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.39 | | | | | 228.32 | | | | |
| Columna B2 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |

Tabla de resultados ensayo esclerométrico

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| Columna D2 Primera planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 |
| | f_c (MPa) | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 24.00 | | | | | 244.73 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.65 | | | | | 230.97 | | | | |
| Columna E2 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.00 | | | | | 234.53 | | | | |
| Viga D-1 Primera planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 38 | 36 | 38 | 40 | 38 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.78 | 0.77 | 0.76 | 0.77 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 29.8 | 31.0 | 32.2 | 31.0 |
| | f_c (MPa) | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 21 | 20 | 21 | 23 | 21 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.50 | | | | | 229.44 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 20.30 | | | | | 207.04 | | | | |
| Columna F2 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 42 | 44 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 35.4 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 23 | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 25 | 28 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.90 | | | | | 243.71 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.77 | | | | | 222.00 | | | | |
| Columna G2 Primera planta | Lectura del martillo | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 42 | 40 | 40 | 38 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 |
| | Lectura corregida | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 31.0 |
| | f_c (MPa) | 23 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 25 | 23 | 23 | 21 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.20 | | | | | 236.57 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.75 | | | | | 221.76 | | | | |
| Viga D1'-E1' Primera planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 42 | 38 | 42 | 40 | 40 | 38 | 40 | 40 |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.76 |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 33.8 | 31.0 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 32.2 |
| | f_c (MPa) | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 23 | 23 | 22 | 23 | 23 |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.60 | | | | | 240.65 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 21.98 | | | | | 224.14 | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|-------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|--|
| Viga E1 Primera planta | Lectura del martillo | 42 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 40 | 42 | |
| | Factor de corrección | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | |
| | Factor de carbonatación | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.77 | 0.76 | 0.72 | |
| | Lectura corregida | 33.8 | 33.8 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 31.0 | 32.2 | 32.1 | |
| | f _c (MPa) | 25 | 25 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 23.40 | | | | | | 238.61 | | | | |
| | Resistencia Promedio (MPa) (kg/cm ²) | 22.32 | | | | | | 227.61 | | | | |

12.5.1 Cuadro de resumen con resultados del ensayo esclerometrico

| Elemento | Nivel | Resistencia kg/cm ² | Resistencia Característica kg/cm ² |
|------------|---------|-----------------------------------|---|
| Columna F2 | cuarto | 212 | 197 |
| Columna H1 | cuarto | 226 | 213 |
| Columna C2 | cuarto | 245 | 241 |
| Columna A1 | tercero | 222 | 209 |
| Columna D1 | tercero | 227 | 215 |
| Columna F2 | tercero | 222 | 209 |
| Columna F1 | segundo | 209 | 188 |
| Columna D2 | segundo | 206 | 193 |
| Columna F2 | segundo | 234 | 226 |
| Columna E1 | primero | 239 | 228 |
| Columna C1 | primero | 394 | 367 |
| Promedio | | 240 | 226 |

12.6 Cuadro comparativos de las resistencias del hormigón

| Nº | Elemento | NÚCLEOS Resistencia kg/cm ² | ESCLEROMETRICO Resistencia kg/cm ² | ULTRASONIDO Resistencia kg/cm ² | |
|----|------------|--|---|--|-----|
| | columna F2 | cuarto | 311 | 212 | 243 |
| | columna H1 | cuarto | 245 | 226 | 204 |
| | columna C2 | cuarto | 376 | 245 | 266 |
| | columna A1 | tercero | 371 | 222 | 324 |
| | columna D1 | tercero | 221 | 227 | 171 |
| | columna F2 | tercero | 284 | 222 | 207 |
| | columna F1 | segundo | 384 | 209 | 265 |
| | columna D2 | segundo | 321 | 206 | 215 |
| | columna F2 | segundo | 409 | 234 | 302 |
| | columna E1 | primero | 513 | 239 | 315 |
| | columna C1 | primero | 397 | 394 | 282 |
| | PROMEDIO | | 348 | 240 | 254 |

12.7 Factores de correlación entre resistencias obtenidas con los diferentes ensayos

| Elemento | Nivel | NÚCLEOS Resistencia kg/cm ² | ESCLEROMETRICO Resistencia kg/cm ² | Factor de correlación |
|------------|---------|--|---|--------------------------|
| columna F2 | cuarto | 311 | 212 | 1.47 |
| columna H1 | cuarto | 245 | 226 | 1.08 |
| columna C2 | cuarto | 376 | 245 | 1.53 |
| columna A1 | tercero | 371 | 222 | 1.67 |
| columna D1 | tercero | 221 | 227 | 0.97 |
| columna F2 | tercero | 284 | 222 | 1.28 |
| columna F1 | segundo | 384 | 209 | 1.83 |
| columna D2 | segundo | 321 | 206 | 1.56 |
| columna F2 | segundo | 409 | 234 | 1.75 |
| columna E1 | primero | 513 | 239 | 2.15 |
| columna C1 | primero | 397 | 394 | 1.01 |
| Promedio | | 348 | 240 | 1.48 |

| Elemento | Nivel | NÚCLEOS Resistencia kg/cm² | ULTRASONIDO Resistencia kg/cm² | Factor de correlación |
|------------|---------|--|--|----------------------------------|
| columna F2 | cuarto | 311 | 243 | 1.28 |
| columna H1 | cuarto | 245 | 204 | 1.20 |
| columna C2 | cuarto | 376 | 266 | 1.41 |
| columna A1 | tercero | 371 | 324 | 1.15 |
| columna D1 | tercero | 221 | 171 | 1.29 |
| columna F2 | tercero | 284 | 207 | 1.37 |
| columna F1 | segundo | 384 | 265 | 1.45 |
| columna D2 | segundo | 321 | 215 | 1.49 |
| columna F2 | segundo | 409 | 302 | 1.35 |
| columna E1 | primero | 513 | 315 | 1.63 |
| columna C1 | primero | 397 | 282 | 1.41 |
| PROMEDIO | | 348 | 270 | 1.37 |

Capítulo 13

CONCLUSIONES

- La profundidad de carbonatación del hormigón, en los diferentes elementos ensayados fue de 3.1 mm, lo que nos indica que el hormigón sigue protegiendo al acero de refuerzo de la corrosión.

El avance de profundidad de carbonatación en los elementos de hormigón en la estructura ha sido relativamente lento, esto se debe principalmente al medio ambiente que rodea a la estructura; en el que no hay temperaturas elevadas, ni humedades del orden del 65% al 98% ya que la mayoría de los elementos no están expuestos a la lluvia.

- Para evitar que la profundidad de carbonatación avance se recomienda quitar la capa de macillado, en los elementos que lo tienen y colocar una nueva.
- La resistencia del hormigón en los ensayos de compresión de núcleos va desde 221 kg/cm² a 513 kg/cm² con un promedio de 348 kg/cm², lo que nos indica que es un hormigón con una muy buena resistencia y de buena calidad.
- Los resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido para los elementos en los que se realizaron extracción de núcleos fueron de 171 kg/cm² a 324 kg/cm² con un promedio de 254 kg/cm². El factor de correlación entre este ensayo y el de compresión de núcleos es de 1.37 en promedio, teniendo los resultados del ensayo en grado de confiabilidad alta.
- Los resultados obtenidos en el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico están por debajo de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión en ciertos elementos debido a factores como el acabado superficial del elemento, que dificulta un buen contacto entre los transductores y el hormigón y a pequeños movimientos durante el ensayo.
- En los elementos complementarios en los que se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasonico se obtuvo una resistencia promedio de 253 kg/cm² que es la resistencia para un hormigón de mediana resistencia.

- Las velocidades de onda obtenidas en el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico son un indicativo de la calidad del hormigón y se obtuvo un promedio de 3487 m/s en los elementos en los que se realizaron extracción de muestras, por lo que se puede decir que la condición actual del hormigón es muy buena basándonos en los estudios de Leslie y Cheesman. El promedio de las velocidades de onda en los elementos complementarios del estudio fue de 3516 m/s estando en la misma condición que los otros elementos ensayados.
- En lo que respecta a los ensayos con el esclerómetro se obtuvieron resistencias desde 206 kg/cm² hasta 394 kg/cm² con un promedio de 240 kg/cm² en los elementos en los que se realizó la extracción de núcleos. El factor de correlación entre este ensayo y el de compresión de núcleos es de 1.48 en promedio.
- En los elementos complementarios del estudio en los que se realizó el ensayo esclerométrico se obtuvieron resistencias de 235 kg/cm² a 249 kg/cm² con un promedio de 240 kg/cm², estando en un rango de variación muy aceptable ya que este tipo de ensayo se recomienda para determinar la uniformidad del hormigón dentro de una estructura.
- El módulo de elasticidad del hormigón estudiado tiene valores de 193632 kg/cm² hasta 256585 kg/cm²; con los que se obtienen valores de α desde 11110.34 hasta 13238.95. Estos valores son los normalmente encontrados en el Ecuador debido al tipo de agregado que se utiliza entre otros factores.
- El 75% de las varillas ensayadas cumplen con los requisitos de esfuerzos a la fluencia, con valores de 513 MPa, 499MPa y 535MPa, que indica la Norma INEN 2167 como límite inferior 412 MPA y como superior 539 MPa.
- La resistencia a la tracción de todas las varillas ensayadas está muy por encima de las especificaciones de la Norma INEN 2167 en la que se especifica una resistencia mínima de 549 kg/cm², ya que se obtuvo en promedio resistencias de 750 MPa.
- Las varillas ensayadas cumplen con la especificación del código ACI del capítulo 21 (21.2.5) en el que se indica que para varillas de grado 280 y 420 la

relación entre la resistencia real de tracción y la resistencia real de fluencia no será menor de 1.25, teniendo relaciones de 1.59 como promedio

- La velocidad de corrosión es un tema muy complejo que depende de muchos factores presentes en los diferentes ambientes, siendo la temperatura y la humedad los más influyentes. Los resultados obtenidos de la velocidad de corrosión son menores a $0.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en las columnas por lo que se puede concluir que no existe corrosión en estos elementos ya que se encuentran en una condición pasiva; mientras que en las losas de entre pisos en las que se realizó el ensayo se obtuvieron resultados hasta de $0.30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ habiendo un nivel bajo de corrosión y de $0.68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en la losa de cubierta del edificio lo que nos indica que existe un nivel medio de corrosión.
- El nivel moderado que presenta la losa de cubierta se debe a que es el elemento que tiene más contacto con el agua lluvia lo que incrementa su vulnerabilidad por lo que el acero de refuerzo embebido en el hormigón se corroe.
- Los resultados de resistividad del hormigón son valores desde $42 \text{ k}\Omega\text{cm}$ hasta $138 \text{ k}\Omega\text{cm}$, este ensayo realizado con el equipo Gecor nos demuestran que existe una velocidad de corrosión muy baja y baja en la mayoría de elementos ensayados, con excepción de los resultados obtenidos en la losa de cubierta que tiene una moderada velocidad de corrosión; estos resultados respaldan a los obtenidos del I_{corr} .
- Se explica que los elementos ensayados no estén afectados por la corrosión del acero ya que el medio ambiente que rodea al edificio no tiene humedad que es el principal factor responsable de este daño.

En la losa de cubierta el proceso de corrosión en grado medio de la armadura se debe a que es un hormigón poroso, no compactado apropiadamente, lo que permite el ingreso de agua en el hormigón haciendo posible que se produzca la corrosión en un medio acuoso.

Bibliografía

- Calavera Ruiz José, Patología de las Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado Tomo 1, 1996
- Danis Harmer, Troxell Earl George, Wiskocil Clement. Ensayo e Inspección de los Materiales en Ingeniería, México, CIA Editorial Continental, Tercera Edición, 1982.
- Fernandez Cánovas Manuel, Patología y Terapeutica del Hormigón Armado, España, Séptima Edición, 2004
- Helene do Lago Paulo, Manual de Reparación, Refuerzo y Protección de las Estructuras de Concreto, Brasil, 1997
- Neville Adam M, Tecnología del Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, México, 1999
- <http://www.dinamoestudio.com/blog/articulostecnicos/la-durabilidad-de-las-estructuras-de-hormigon-y-el-nuevo-reglamento-cirsoc-201/>
- http://biblioteca.duoc.cl/bdigital/esco/Ingenieria_y_%20tec_construccion/071.pdf
- http://es.wikibooks.org/wiki/Patolog%C3%ADa_de_la_edificaci%C3%B3n/Estructuras_de_hormig%C3%B3n/Lesiones#Lesiones_Propias_Directas
- http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:X0JDZVIK3JUI:www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/frp.pdf+fisuras+plasticas%2Bhormigon&hl=es&gl=ec&pid=bl&srcid=ADGEEsGIREvDuvAvr599CtYBiWxwRvkkaFNW8hJtOeF5-Rydp3XdVyhWldwNhlVPO4Mlz9Y30U8LVHykX9jT46Q_9Cs7_bLqqdGjcZrPIBXOVUCAc3dGIQaDmhIDyeF25RYG4XGXAht&sig=AHIEtbS0-PzjihltN34GuczZV9G9ibTZiA
- http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:ZImR_0QdxHsJ:www.docentes.unal.edu.co/caechavarrial/docs/Durabilidaddelhormigon.pdf+agresividad+m+medio+ambiente%2Bclasificaci%C3%B3n%2Bestructuras&hl=es&gl=ec&pid=bl&srcid=ADGEEShy8mPjlWQqfHtEM3LaknoQdm0A22KIO4N0MnrCGs1bQnjz0TzVTtc1XBYmYIvknxAqFkwkB_IICMJ8frhpudyNm31lh4QsUAT

kiXkQj9DZSKae7u6cVgFsfzzBBURHM9S50wdI&sig=AHIEtbQQdeszPIFC
U68jH2OYTdxfgXhS5w

- <http://www.construaprende.com/t/10/T10Pag15.php>
- <http://www.belt.es/articulos/articulo.asp?id=653>