



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**GRIETAS EN EL CONCRETO REFORZADO DEL CANAL DE
ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II**

LILIANA JUAREZ MORATAYA

Asesorado por Ing. Marco Antonio Molina Higueros

Guatemala, noviembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GRIETAS EN EL CONCRETO REFORZADO DEL CANAL DE
ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II**

Trabajo de graduación

Presentado a Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería

Por

LILIANA JUAREZ MORATAYA

Asesorado por Ing. Marco Antonio Molina Higueros

Al conferírsele el título de

INGENIERA CIVIL

Guatemala, noviembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Erik Rosales Torres
EXAMINADOR	Ing. Venancio Dimas de Paz Juárez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GRIETAS EN EL CONCRETO REFORZADO DEL CANAL DDE ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II

Tema que me fuera asignado por la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Civil con fecha 25 de octubre de 2002.

Liliana Juarez Morataya

DEDICATORIA

Este acto lo dedico a:

DIOS Por su infinito amor, por darme la vida y guiarme en cada momento, Él quien es la luz de mi camino y la fuente inagotable del saber, el Señor Todopoderoso que hasta aquí me ha ayudado.

Mi esposo Héctor Fernando Alonzo Dávila, por ser la razón de mi vida, quien con su amor, comprensión, paciencia y esfuerzo me incentivó a seguir adelante.

Mi hija Ana Sofía Alonzo Juárez, por ser mi alegría, quien con sus demostraciones de amor y cariño me inspira a alcanzar mis metas.

Mis padres María Teresa Morataya de Juárez e Isidro Arturo Juárez Carrillo, mi más profunda gratitud por su amor incondicional, paciencia, comprensión y apoyo continuo, a quienes dedico mi triunfo con especial amor.

Mi hermana Evelyn Juárez Morataya, por su cariño y apoyo.

Mi familia Por su ayuda, cariño y comprensión.

Mis amigos Por su amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	X
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XII
1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALIN II	 01
2. DATOS GENERALES DEL CONCRETO	
2.1 Proporción de los componentes del concreto	07
2.1.1 Peso específico	08
2.1.2 Agregado para concreto	09
2.1.3 Permeabilidad y hermeticidad	09
2.1.4 Resistencia	11
2.1.5 Resistencia al desgaste	12
2.2 Aditivos en el concreto	13
2.3 Mezclado del concreto	21
2.3.1 Concreto recién mezclado	22
2.3.2 Trabajabilidad	23
2.3.3 Vigilancia de las mezclas	23
2.4 Forma de colocación	24
2.4.1 Descarga del hormigón elaborado	25
2.4.2 Transporte interno dentro de la obra	25
2.4.3 Concreto bombeado	26
2.4.4 Colocación del hormigón en los encofrados	27

3. FACTORES QUE AFECTAN EL AGRIETAMIENTO

3.1	Agua	29
3.1.1	Calidad del agua de mezclado	29
3.2	Cemento	30
3.2.1	Fabricación del cemento Pórtland	31
3.2.2	Hidratación del cemento	31
3.2.3	Fraguado	31
3.2.4	Finura del cemento	32
3.2.5	Resistencia mecánica del cemento	33
3.3	Agregados	34
3.3.1	Clasificación general del agregado	34
3.3.2	Adherencia del agregado	35
3.3.3	Sustancias perjudiciales en el agregado	36
3.3.4	Sanidad del agregado	37
3.4	Formaletas para el concreto	38
3.4.1	Remoción de formaleta	39
3.5	Curado del concreto	41
3.5.1	Métodos de curado	41

4. TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE GRIETAS EN EL CONCRETO

4.1	Problemas del concreto	45
4.2	Agrietamiento debido al asentamiento del concreto plástico	47
4.3	Contracción por fraguado y secado	49
4.3.1	Velocidad de secado del concreto	49
4.3.2	Estabilidad volumétrica	51
4.4	Agrietamiento por temperatura	52
4.4.1	Agrietamientos térmicos iniciales del concreto colado fresco.	53
4.4.1.1	Efectos de la temperatura	54
4.4.2	Influencia de la temperatura en la resistencia del concreto ..	57
4.4.2.1	Hormigonado en tiempo caluroso	60
4.4.3	Calor de hidratación del cemento	61
4.4.4	Efectos del clima y de la temperatura en la trabajabilidad	63

5. PREVENCIÓN DEL APARECIMIENTO DE GRIETAS EN EL CONCRETO REFORZADO	
5.1 Factores a considerar para minimizar y evitar el agrietamiento	65
5.1.1 Control de agrietamiento	65
5.1.2 Armadura para refuerzos por temperatura y de contracción	67
5.1.3 Diseño de mezclas	68
5.1.4 Vibrado y forma de aplicación del concreto	72
5.1.4.1 Compactación del hormigón después de colocado	72
5.1.4.2 Efectos de vibrado	73
5.1.4.3 Consolidación	74
5.1.4.4 Forma de aplicación del concreto	74
5.1.5 Curado	76
6. ANÁLISIS DEL AGRIETAMIENTO EN EL CANAL DE ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II	
6.1. Descripción general y detallada del canal de aducción	79
6.2. Situación inicial del canal de aducción	81
6.3. Descripción del tipo de grietas y dimensiones	87
6.4. Características del concreto aplicado	91
6.5. Análisis y evaluación de posibles causas del agrietamiento	93
6.6. Situación actual del canal de aducción	96
7. TRATAMIENTO DE GRIETAS	
7.1 Mezclas o morteros para inyección de grietas	99
7.2 Uso de aditivos	101
7.3 Métodos y procedimientos de inyección de grietas	104
7.3.1 Métodos de inyección	104
7.3.2 Procedimiento de inyección de grietas	105
7.4 Estabilización de grietas	107

8. PLANTEAMIENTO PARA LA CORRECCIÓN DEL AGRIETAMIENTO EN EL CANAL DE ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II	
8.1 Solución para el tratamiento de las grietas y corrección de las fallas	109
8.2 Definición de mezclas, morteros y aditivos y planteamiento del método de aplicación	112
8.2.1 Sello superficial de grietas	112
8.2.2 Resinas epóxicas de inyección	115
8.2.3 Selección de productos para la protección y reparación del concreto	119
8.3 Procedimiento de control en el proceso de aplicación y control futuro	121
8.4 Guía para reparar el concreto agrietado	123
8.4.1 Procedimiento en el campo	127
CONCLUSIONES	133
RECOMENDACIONES	136
REFERENCIAS	138
BIBLIOGRAFÍA	140
ANEXOS	142

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	El tiempo de fraguado depende de la temperatura de la mezcla de concreto	55
2.	Pérdida de asentamiento debida a la elevación de la temperatura de mezclado	56
3.	Efecto de la temperatura del hormigón sobre el agua requerida para cambiar el asentamiento	57
4.	Efecto de la temperatura inicial sobre la resistencia a la compresión del hormigón	58
5.	Colocación del Acero de Refuerzo del Canal de Aducción	82
6.	Colocación de formaleta en los muros del canal	85
7.	Grieta que pasa por los agujeros que dejaron los separadores y tensores de la formaleta	89
8.	Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II	97
9.	Procedimiento de inyección de grietas	131
10.	Inyección de grietas	132
11.	Plano del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II	143
12.	Resultados de la ruptura a compresión de 3 muestras de concreto de los muros del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II	145

TABLAS

I	Datos técnicos del Proyecto Hidroeléctrico Palín II	04
II	Aditivos para concreto	21
III	Tipos y clasificación de grietas	46
IV	Calor de hidratación de los compuestos puros	62
V	Control del despacho de camiones a la obra	84
VI	Clasificación de las grietas en el concreto	90

LISTA DE SÍMBOLOS

Kw	Kilo watt
Gwh	Gigawatt hora
Km²	Kilómetro cuadrado
m³/s	Metro cúbico por segundo
m	Metro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
KVA	Kilo vatio amperio
KV	Kilo vatio
Mm	Milímetro
Kg/cm²	Kilogramo por centímetro cuadrado
PSI	Libra por pulgada cuadrada
Kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
µm	Micro-metro
C₃A	Aluminato tricálcico
C₃S	Silicato tricálcico
C₂S	Silicato dicálcico
C₄AF	Aluminoferrato tetracálcico
J/g	Joules por gramo
Cal/g	Calorías por gramo
Hz	Hertz
m³/seg	Metros cúbicos por segundo
ton/m²	Tonelada por metro cuadrado
m³	Metro cúbico
Mpa	Mega Pascal
PA	Pascal
f'c	Resistencia del concreto
fy	Resistencia del acero
Acero No. 4 @ 0.40 m	Varilla de acero de ½" a cada 0.40 metros

rpm	Revoluciones por minuto
gr	Gramos
cps	Centi poises
Kg/l	Kilogramo por litro

GLOSARIO

Absorción	de una muestra de agregado, es la capacidad de aumentar su peso por el agua contenida en sus poros.
Adherencia	unión física entre el concreto y el acero.
Curado	proceso para promover la hidratación del cemento.
Deformación	cambio de forma de un elemento estructural.
Esfuerzo	intensidad de fuerza por unidad de área.
Fluencia del concreto	deformación continua del concreto bajo esfuerzos sostenidos.
Módulo de Elasticidad	relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente a los esfuerzos por tensión o compresión, inferiores al límite proporcional del material.
Sangrado	agua de la mezcla que tiende a elevarse a la superficie.
Sanidad del agregado	capacidad para resistir cambios excesivos de volumen, como consecuencia de las condiciones físicas.
Slump	revenimiento o asentamiento.
Lixiviación	proceso de arrastre por el agua de lluvia de los materiales solubles de la superficie a horizontes más profundos.
Tramie	estructura larga de madera que asegura los encofrados.

RESUMEN

Debido al interés en la durabilidad del concreto armado, por las cargas que deberán soportar las estructuras durante su vida útil y también al ambiente agresivo al que estarán expuestas, este trabajo se enfocó en el apareamiento de las grietas en los muros del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II, debido a la hermeticidad que se necesita en las paredes del mismo por ser un medio de conducción de agua desde el Río Michatoya hacia las demás obras del Proyecto, por tal razón, es de importancia la reparación de dichas grietas, para evitar fugas de agua y una posterior corrosión del acero de refuerzo.

Se determinó que existen varios factores que intervienen en el agrietamiento de toda estructura de concreto armado, entre los que podemos mencionar: el clima, la geología, el uso de agua contaminada en la mezcla, la fabricación del cemento, sustancias perjudiciales en los agregados, el uso y remoción inadecuado de las formaletas, así como un curado inapropiado.

Por lo anterior, se deben tomar en cuenta ciertas medidas para reducir y prevenir el agrietamiento, las cuales consisten en el buen control de la mezcla, esto incluye los materiales, dosificación, colocación, la temperatura del concreto y el curado, entre otras.

Para garantizar la efectividad de las reparaciones en las grietas de los muros del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II, se decidió utilizar el sistema SCB (*Structural Concrete Bonding*), presentado por MBT, el cual consiste en la colocación de un sello superficial, dejando puertos cada 20 cm para realizar las inyecciones con resina epóxica, utilizando la Bomba Concreto SCB 20:1 a presión constante (0 a 240 Psi). El procedimiento de aplicación, utilizado en los muros del canal, se considera fácil, económico y permanente.

OBJETIVOS

- **General**

Efectuar una reparación estructural permanente a las grietas del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II, de manera que se garantice la hermeticidad de las paredes del mismo y el correcto funcionamiento de la estructura en todo momento.

- **Específicos**

1. Clasificar los tipos de grietas para su estudio
2. Conocer las causas del agrietamiento en este tipo de estructura
3. Determinar los factores que minimizan y evitan el agrietamiento
4. Generar la solución más adecuada desde el punto de vista estructural y el económico para la reparación de las grietas del Canal de Aducción

INTRODUCCIÓN

Guatemala tiene como objetivo incrementar la producción a nivel nacional, lo que implica esperar nuevas inversiones a nivel global. Del plan de desarrollo del país, se derivan las necesidades del fluido eléctrico en forma definitiva; estas necesidades son satisfechas con inversiones concretas, que son luego estudiadas y evaluadas, como el caso del Proyecto Hidroeléctrico Palín II.

La planificación de la distribución de la energía eléctrica, tiene como objetivo poner a disposición de la población urbana y rural, los beneficios de la electrificación, a efecto de apoyar de esta forma la producción nacional y contribuir a elevar el nivel de vida de los guatemaltecos, por lo que estos proyectos de inversión se diseñan para una vida de trabajo útil, relativamente alta, con el fin de mantener una generación de energía permanente y satisfacer las necesidades de la población.

En lo que se refiere a la construcción de proyectos, se puede decir que toda estructura de concreto reforzado tiene una tendencia al agrietamiento, por lo que, es necesario estudiar cada caso, según las condiciones a las que estará expuesta y así evitar el deterioro de la estructura a una edad temprana.

El presente trabajo tiene un enfoque práctico, cuyo propósito es informar sobre los factores que intervienen en la aparición de las grietas y las medidas a tomar para minimizar y/o evitar el agrietamiento y en caso de existir agrietamiento en la estructura, se presenta una guía sencilla de reparación, donde se describen los aspectos técnicos a considerar para la selección de productos y procedimientos aplicables en dicha estructura.

ORGANIZACIÓN DE TRABAJO

GRIETAS EN EL CANAL DE ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II, consta de ocho capítulos: en el primero se hace una breve descripción de los componentes del Proyecto Hidroeléctrico Palín II.

Segundo capítulo, trata de aspectos generales del concreto, desde las proporciones de los componentes, los aditivos existentes en el mercado, el mezclado del concreto y la forma de colocación.

Tercer capítulo, este capítulo contiene los factores que afectan en el concreto y producen agrietamiento, los componentes de la mezcla deben llenar ciertos requisitos de calidad para obtener un concreto durable, también el uso y manejo de la formaleta adecuada, así como del curado inmediato.

Cuarto capítulo, se definen los tipos de grietas que aparecen en el concreto reforzado y las causas que las provocan.

Quinto capítulo, este es uno de los más importantes, porque se muestran algunos factores que pueden llegar a minimizar y/o evitar el agrietamiento en la estructura.

Sexto capítulo, se realizó un análisis y evaluación de las posibles causas del agrietamiento en el canal de aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II.

Séptimo capítulo, se definen métodos y procedimientos de inyección.

Octavo capítulo, se presenta la solución para el tratamiento de las grietas y al final del capítulo se presenta una guía para reparar el concreto agrietado.

Por último se tienen las conclusiones, como resultado de la investigación realizada así como de los resultados obtenidos en el campo; también se presentan las recomendaciones pertinentes para obtener mejores resultados durante la construcción.

Dentro de los anexos se tienen los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de los cilindros extraídos del canal de aducción, así como un plano del canal donde se muestra la planta y sección típica. Además, se presenta un glosario de términos necesario para la mejor comprensión de la investigación realizada. La bibliografía indica fuentes para profundizar el estudio de los diversos aspectos planteados en la investigación.

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II

Plantas hidroeléctricas: la potencia hidroeléctrica es la energía eléctrica obtenida mediante la conservación de energía potencial y cinética del agua. La energía potencial de un volumen de agua es el producto de su peso y la distancia vertical.

Como la energía cinética de la fuente de suministro es muy pequeña, o cero en la mayoría de las instalaciones hidroeléctricas, el término de energía cinética no aparece en las fórmulas para potencia. La potencia es la tasa o rapidez con la cual se produce o utiliza la energía.

Las plantas hidroeléctricas pueden clasificarse sobre la base de la capacidad del embalse y de uso como plantas sin almacenamiento y plantas para demanda o carga pico.

Planta con almacenamiento: un almacenamiento puede aumentar mucho la capacidad segura de una hidroeléctrica. El agua que no se requiere para generación durante las horas de poca demanda de energía puede almacenarse para la generación en los períodos de demanda pico.

El almacenamiento puede disponerse para ciclos diario, semanal o estacional. Para el ciclo diario, la capacidad requerida del embalse es menor que la del caudal diario del río. Para el ciclo semanal, se almacena el caudal durante los períodos de poca demanda durante los fines de semana, a fin de dar capacidad adicional para los períodos de estiaje. El almacenamiento para uso estacional requiere muchas veces más almacenamiento que para el ciclo diario o semanal y, por tanto, puede ser poco económico, salvo que el embalse sea necesario para diversos usos. Entonces, parte de su costo puede sufragarse con proyectos para control de inundaciones o para riego.

El INDE desde el año 1969 utiliza el recurso hidroeléctrico del río Michatoya en la Planta Hidroeléctrica Jurún Marinalá. La Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A., aprovechaba este recurso para generación en la antigua Planta de Palín I, desde el año 1896, pero la misma en el año 1998 quedó fuera de servicio por daños en la tubería de presión y en el equipo electromecánico instalado en la casa de máquinas.

El nuevo Proyecto Hidroeléctrico Palín II, utilizará parte de la infraestructura existente del proyecto Palín I, condición que permite reducir considerablemente los costos de construcción del nuevo proyecto.

El nuevo proyecto se construirá con una capacidad instalada de 5 MW, considerablemente mayor al antiguo proyecto, lo cual permite un mejor aprovechamiento del agua despachada del lago de Amatitlán para generación en la planta Jurún Marinalá.

Por las ventajas de que el INDE dispone para el diseño y construcción del proyecto, el costo del KW instalado es considerablemente bajo, en relación al costo de proyectos hidroeléctricos de esta capacidad, condición que permitirá una buena rentabilidad en la explotación del recurso.

Otra de las ventajas existentes para el desarrollo del proyecto la constituye la línea de 138 KV, Jurún Marinalá - Guatemala Sur que pasa a escasos metros de la casa de máquinas del nuevo proyecto Palín II, lo cual permitirá interconectar la nueva central al sistema eléctrico nacional con una baja inversión.

Localización

Se localiza en el Departamento de Escuintla en el Municipio de Palín, se llega a él desde la ciudad capital utilizando la carretera CA-9 Sur, que hasta el poblado de Palín es una autopista de primer orden. La distancia es de 38 Kilómetros. Su cuenca hidrológica pertenece a la vertiente del Océano Pacífico.

Ubicación

El proyecto forma parte del sistema del Río Michatoya, encabezando la cadena de explotación formada por los proyectos Palín, San Luis, El Salto, y Jurún Marinalá. Este sistema se basa en el aprovechamiento del embalse natural del Lago de Amatitlán, el cual viene siendo explotado con fines energéticos desde el año de 1896. Del embalse del Lago de Amatitlán al proyecto hay una distancia de 20 Km. La pendiente es suave, luego cambia teniendo 4 cataratas antes de alcanzar la llanura.

Principales estructuras. Las obras que conforman el proyecto son:

- **Compuertas de regulación:** fueron construidas en la embocadura del Río Michatoya con el Lago de Amatitlán y actualmente se encuentran en funcionamiento.
- **Presa derivadora:** se construirá en el lugar en que está la derivación actual del proyecto Palín I, aprovechando en lo posible la obra existente.
- **Desarenador:** esta obra no existe en la actualidad, y se ha planificado su construcción, aguas abajo de la presa derivadora.
- **Tubería de presión:** se aprovechará el derecho de vía de la actual, teniendo un desvío antes de la actual casa de máquinas para poder llegar así a la proyectada.
- **Casa de máquinas:** localizada en el derecho de vía de la actual línea de 69 Kv. Entre las primeras torres que están frente a la actual subestación, en la margen derecha del Río Michatoya.
- **Caminos de acceso:** estos están construidos y en uso actualmente, sólo se harán algunas ampliaciones.

A continuación se presenta la Tabla 1 con datos más específicos del Proyecto Hidroeléctrico Palín II.

Tabla I. Datos técnicos del proyecto

DESCRIPCIÓN	
<p>Generación</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Potencia ▪ Energía anual promedio 	<p>5000 kw 19.6 Gwh</p>
<p>Cuenca</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Río ▪ Cuenca ▪ Área de drenaje total ▪ Caudal promedio anual en sitio de presa ▪ Caída bruta 	<p>Michatoya Michatoya 583.21 Km² 3.8 m³/s 87.61 m</p>
<p>Presa</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo: gravedad de hormigón armado, con compuerta reguladora abatible ▪ Longitud de corona ▪ Cota de corona 	<p>10 m 1,098.50 msnm</p>
<p>Vertedor de demasías</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo: concreto, cimacio libre con compuerta abatible ▪ Caudal máximo probable de crecida diez milenaria ▪ Caudal de diseño del vertedero ▪ Carga máxima sobre el vertedor ▪ Localización 	<p>686 m³/s 200 m³/s 5.5 m Incorporado a la presa</p>
<p>Bocatoma</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo ▪ Caudal de diseño de la bocatoma ▪ Estructuras componentes 	<p>Convencional 7 m³/s Rejas gruesas, canal de limpieza, cámara de compuerta, reja fina y tubería</p>

<p>Desarenador</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo ▪ Localización ▪ Longitud ▪ Ancho ▪ Profundidad máxima 	<p style="text-align: center;">Bieri, de una cámara</p> <p style="text-align: center;">Margen izquierda del río después de bocatoma</p> <p style="text-align: center;">86.0 m</p> <p style="text-align: center;">7.0 m</p> <p style="text-align: center;">4.60 m</p>
<p>Tubería forzada</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Caudal de diseño ▪ Longitud total ▪ Diámetro interno ▪ Peso de la tubería 	<p style="text-align: center;">7.0 m³/s</p> <p style="text-align: center;">1,355.00 m</p> <p style="text-align: center;">1.71 m</p> <p style="text-align: center;">563 toneladas</p>
<p>Casa de máquinas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Localización ▪ Turbinas <ul style="list-style-type: none"> Número de unidades Caída bruta Potencia por turbina ▪ Generadores <ul style="list-style-type: none"> Número de unidades Potencia nominal ▪ Transformador <ul style="list-style-type: none"> Número de unidades Capacidad nominal 	<p style="text-align: center;">Margen derecha del Río Michatoya, 100 m aguas abajo de la casa de máquinas de Palín I y 300 m aguas arriba del embalse de Jurún Marinalá.</p> <p style="text-align: center;">Tipo Francis de eje horizontal</p> <p style="text-align: center;">2</p> <p style="text-align: center;">87.61 m</p> <p style="text-align: center;">2500 KW</p> <p style="text-align: center;">Tipo Sincrónico</p> <p style="text-align: center;">2</p> <p style="text-align: center;">3000 KVA</p> <p style="text-align: center;">Tipo Convencional</p> <p style="text-align: center;">1</p> <p style="text-align: center;">6000 KVA</p>
<p style="text-align: center;">Línea de transmisión</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Voltaje ▪ Longitud 	<p style="text-align: center;">138 KV</p> <p style="text-align: center;">100 metros</p>

Fuente: Base de datos del Instituto Nacional de Electrificación

2. DATOS GENERALES DEL CONCRETO

2.1 Proporción de los componentes del concreto

El objetivo al diseñar una mezcla de concreto consiste, en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de su uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las propiedades siguientes:

- 1) En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable**
- 2) En el concreto endurecido, durabilidad, resistencia y presentación uniforme**
- 3) Economía

La elección de las características de la mezcla, es en función del uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, el tamaño, forma de los miembros, y a las propiedades físicas del concreto (tal como la resistencia), que se requieren para la estructura. Cuando se prevea que el concreto haya de quedar fuertemente expuesto a la intemperie o a otros agentes de desintegración, habrá que proyectar un concreto que tenga la resistencia requerida, tanto para la estructura como para los agentes externos.

En la práctica de la Ingeniería se supone que la resistencia del concreto a una determinada edad, con un curado a una temperatura prescrita, depende principalmente sólo de dos factores:

- La relación agua/cemento
- El grado de compactación

En esta etapa se considera únicamente el caso del concreto totalmente compactado, en la práctica esto significa que el concreto endurecido contiene alrededor de 1% de vacíos de aire.

En un sentido, la resistencia del concreto probablemente está influenciada por el volumen de todos los vacíos del concreto: aire atrapado, poros capilares, poros del gel y aire incluido, si lo hay. Tenemos que recordar que la relación agua/cemento determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación. De ahí que tanto la relación agua/cemento como el grado de compactación afectan el volumen de vacíos del concreto.

Para un concreto de agregados aceptables, la resistencia que puede desarrollarse por medio de una mezcla trabajable y bien controlada de cemento, agua y agregado (en las mismas condiciones de mezclado, curado y prueba) está bajo la influencia de:

- a) La relación del cemento al agua de mezclado
- b) La relación del cemento al agregado
- c) La granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez de las partículas del agregado
- d) El tamaño máximo del agregado

La resistencia del concreto resulta de:

- a) La resistencia del mortero
- b) La adherencia entre el mortero y el agregado grueso
- c) La resistencia de las partículas del agregado grueso, es decir, su capacidad para resistir los esfuerzos aplicados

2.1.1 Peso específico

El peso específico (densidad relativa) de un agregado, es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para proporcionamiento de mezclas y control, por ejemplo en la determinación del volumen absoluto ocupado por el agregado.

Uniformidad de dosificación

Una vez establecida la mezcla para un hormigón a partir de las muestras de agregado a emplear, es imprescindible que todo el árido que se adquiriera para la obra considerada sea de dosificación análoga a la de las muestras primitivas, ya que un cambio en la granulometría afecta a la facilidad de puesta en obra del hormigón resistente.

Uno de los mejores índices de medida de la granulometría en relación con el grado de consistencia o de docilidad de la mezcla es su módulo de finura.

2.1.2 Agregado para concreto

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido, en las proporciones de la mezcla, y en la economía. Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada, siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Los agregados gruesos consisten en grava, combinación de grava o agregado triturado, cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm; pueden encontrarse en algunos depósitos naturales de agregado, a veces llamados gravas de mina, río, lago o lecho marino, así mismo, se tiene el agregado triturado, el cual se produce triturando roca de cantera, piedra bola, guijarros, o grava de gran tamaño.

2.1.3 Permeabilidad y hermeticidad

El concreto empleado en estructuras como el Canal de Aducción que retengan agua o que estén expuestas a mal tiempo o a otras condiciones de exposición severa debe ser impermeable y hermético. La hermeticidad se define como la capacidad del concreto de refrenar o retener el agua sin escapes visibles.

La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.). Generalmente, las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable, también lo vuelven más hermético.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a la resaturación, al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ión cloruro.

La permeabilidad también afecta la capacidad de destrucción por congelamiento en condiciones de saturación. Aquí la permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque la misma recubre a todos los constituyentes del concreto. La permeabilidad de la pasta depende de la relación agua – cemento y del grado de hidratación del cemento o duración del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere de una relación agua – cemento baja y un período de curado húmedo adecuado. La inclusión de aire ayuda a la hermeticidad aunque tiene un efecto mínimo sobre la permeabilidad que aumenta con el secado.

Las relaciones Agua – Cemento bajas también reducen la segregación y el sangrado, contribuyendo adicionalmente a la hermeticidad. Para ser hermético, el concreto también debe estar libre de agrietamientos.

Ocasionalmente, el concreto poroso – concreto sin finos que permite fácilmente el flujo de agua a través de sí mismo – se diseña para aplicaciones especiales. En estos concretos, el agregado fino se reduce grandemente o incluso se remueve totalmente produciendo un gran volumen de huecos de aire.

Sin embargo, cuando han sido proporcionados adecuadamente, estos concretos se consolidan fácilmente por vibración.

2.1.4 Resistencia

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm²) a una edad de 28 días se le designa con el símbolo f_c .

La resistencia del concreto a la compresión es fundamentalmente una propiedad física. El concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350 kg/cm² (2,986.9 y 4,978.17 Psi). un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de cuando menos 420 kg/cm² (5,973.80 Psi). Una resistencia de 1,400 kg/cm² (19,912.68 Psi) se ha llegado a utilizar en aplicaciones de construcción.

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

El valor de la resistencia a la tensión del concreto, es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión y a menudo se estima como 1.33 a 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

La resistencia a la torsión, para el concreto, está relacionada con el módulo de ruptura y con las dimensiones del elemento de concreto.

La resistencia al cortante del concreto puede variar desde el 35% al 80% de la resistencia a compresión. La correlación existe entre la resistencia a la compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión, y cortante, de acuerdo a los componentes del concreto y al medio ambiente en que se encuentre.

El módulo de elasticidad, denota por medio del símbolo E, se puede definir como la relación del esfuerzo normal a la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal, E fluctúa entre 140,600 y 422,000 kg/cm², y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua – cemento y la edad, o el grado a que haya progresado la hidratación. Estos factores también afectan a la resistencia a flexión y a tensión, así como a la adherencia del concreto con el acero. Cuando se requiera de valores más precisos para el concreto se deberán desarrollar curvas para los materiales específicos y para las proporciones de mezclado que se utilicen en el trabajo.

Para una trabajabilidad y una cantidad de cemento dadas, el concreto con aire incluido necesita menos agua de mezclado que el concreto sin aire incluido. La menor relación agua – cemento que es posible lograr en un concreto con aire incluido tiende a compensar las resistencias mínimas inferiores del concreto con aire incluido, particularmente en mezclas con contenidos de cemento pobres e intermedios.

2.1.5 Resistencia al desgaste

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste; por tanto, en estas aplicaciones el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión. Los resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión o desgaste está estrechamente relacionada con la resistencia a la compresión del concreto.

Un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja.

Como la resistencia a la compresión depende de la relación agua – cemento baja, así como un curado adecuado son necesarios para obtener una buena resistencia al desgaste. El tipo de agregado, el acabado de la superficie o el tratamiento utilizado, también tienen fuerte influencia en la resistencia al desgaste. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando y esponjoso.

2.2 Aditivos en el concreto

La definición propuesta por el Comité ACI 116(26)¹, la cual dice que un aditivo es un material distinto del agua, los agregados, el cemento hidráulico y las fibras de refuerzo, que se utiliza como ingrediente del mortero o del concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o durante el mezclado.

La anterior definición se puede interpretar como: que un material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación.

Los aditivos para concreto se utilizan con el propósito de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido.

El uso de aditivos en el concreto, consiste en considerarlos como un medio complementario y no como un sustituto de otras medidas primordiales, tales como el uso de un cemento apropiado, una mezcla de concreto bien diseñada, o prácticas constructivas satisfactorias.

Según informes del Comité ACI 212 (76), (77), (78)², los aditivos suelen emplearse en la elaboración de concretos, morteros o mezclas de inyección, no sólo para modificar sus propiedades en los estados fresco y endurecido, sino también por economía, para ahorrar energía y porque hay casos en que el uso de un aditivo, puede ser el único medio factible para obtener el resultado requerido.

Los efectos que se persiguen con el uso de los aditivos son los siguientes:

En estado fresco

- Aumentar la trabajabilidad sin incrementar el contenido de agua, o bien, disminuir el contenido de agua con la misma trabajabilidad
- Retrasar o adelantar el tiempo de fraguado inicial
- Reducir o prevenir el asentamiento, o crear una ligera expansión
- Modificar la rapidez y/o la capacidad de sangrado
- Reducir la segregación
- Mejorar la aptitud para el bombeo
- Reducir la rapidez en la pérdida de revenimiento

En estado endurecido

- Retrasar o reducir la evolución de calor durante el endurecimiento inicial
- Acelerar la velocidad de desarrollo de la resistencia a edades tempranas
- Incrementar la resistencia (a compresión, tensión o flexión)
- Aumentar la durabilidad o la resistencia a las condiciones de exposiciones severas, que incluyen la aplicación de sales de deshielo
- Disminuir el flujo capilar de agua
- Disminuir la permeabilidad del concreto a los líquidos
- Controlar la expansión causada por la reacción de los álcalis con ciertos agregados
- Producir concreto celular
- Mejorar la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo

- Mejorar la adherencia entre concreto viejo y concreto nuevo
- Mejorar la resistencia al impacto y a la abrasión
- Inhibir la corrosión del acero de refuerzo y otros metales inmersos
- Producir mortero

Los aditivos pueden ser clasificados en seis grupos:

1. **Acelerantes**

a. De resistencia: mayor rapidez en la adquisición de la resistencia inicial, con reducción moderada en el tiempo de fraguado; trae como consecuencia una rápida pérdida de revenimiento y reducción significativa del tiempo de fraguado en clima cálido, detrimento en la resistencia final, deterioro en la resistencia a los sulfatos, cierto incremento de la contracción por secado.

b. De fraguado muy rápido: fraguado inmediato y muy rápida obtención de resistencia consecutiva, los efectos adversos son los siguientes: fuerte detrimento de la resistencia final y riesgo de corrosión del refuerzo si contiene cloruros.

2. **Inclusores de aire**

Dan protección al concreto endurecido contra los efectos de la congelación y el deshielo, y de las sales descongelantes. Mejoría en la manejabilidad y disminución del sangrado en mezclas de concreto con deficiencias en estos aspectos. Efectos adversos: Disminución moderada de la resistencia, drástica reducción de la resistencia por sobre dosificación.

3. **Reductores de agua y reguladores de fraguado**

3.1 Reductores de agua, simples: reducción del contenido de agua del concreto, sin modificar excesivamente el tiempo de fraguado. **Efectos:** algunos retrasan el tiempo de fraguado, y/o incrementan la pérdida de revenimiento, y/o la contracción por secado.

3.2 Retardadores simples: Retraso controlado del tiempo de fraguado, sin afectar excesivamente la adquisición de resistencia consecutiva. **Efectos:** incremento en la pérdida de revenimiento y/o la contracción por secado, y/o prolongan excesivamente el fraguado por sobredosificación.

3.3 Retardadores y reductores de agua: retraso controlado del tiempo de fraguado, con reducción adicional en el contenido de agua del concreto. **Efectos:** efectos secundarios similares a los del caso anterior.

4. **Minerales finamente divididos**

4.1 Puzolanas: aumento en la protección del concreto endurecido contra el ataque de los sulfatos y la lixiviación; prevención de la reacción álcali-agregado; reducción de la permeabilidad; disminución del calor de hidratación. **Efectos adversos:** disminución en las resistencias del concreto a corto y mediano plazo; aumento en la demanda de agua de mezclado, y/o incremento en la pérdida de revenimiento y/o en la contracción por secado.

5. **Para producir concreto fluido**

a) Plastificantes simples o reductores de agua en alto grado, los efectos útiles son los siguientes: igual que los reductores de agua simples, pero con mayor efecto en la reducción del contenido de agua, dirigido a incrementar la fluidez de las mezclas de concreto. **Efectos adversos:** igual que los reductores de agua simples, pero con efectos más pronunciados en la pérdida prematura de revenimiento.

b) Plastificantes y retardadores, o reductores de agua en alto grado y retardadores: igual que los retardadores y reductores de agua, pero con mayor efecto en la reducción del contenido de agua, dirigido a incrementar la fluidez de las mezclas de concreto. **Efectos adversos:** incremento pronunciado en la pérdida de revenimiento y/o la contracción por secado, y/o prolongan excesivamente el fraguado por sobredosificación.

6. Misceláneos

a) **Expansores por formación de gas**

b) **Para mezclas de inyección:** efectos principales diversos, según el uso destinado a la mezcla. Frecuentemente se requieren mezclas fluidas, sin asentamiento ni contracción, utilizando conjuntamente un reductor de agua y un agente expansor por formación de gas.

c) **Adhesivos integrales:** aumento de la adhesividad en el mortero o concreto frescos, al ser aplicados sobre concreto endurecido. **Efectos adversos:** incorporación de aire atrapado en la mezcla, y pérdida de resistencia al endurecer. Pérdida de adherencia de algunos productos, al entrar en contacto con agua.

d) **Auxiliares de bombeo:** incremento de la cohesividad y la viscosidad de las mezclas de concreto para facilitar el bombeo, mediante la incorporación de numerosas sustancias propuestas. **Efectos secundarios:** según la naturaleza de la sustancia adicionada al concreto. (son tantos los efectos adversos que no se recomiendan el uso de estos aditivos).

e) **Inhibidores de la corrosión del acero de refuerzo:** reducción de la permeabilidad del concreto de recubrimiento y aumento de su poder de protección contra la penetración de sales que propician la corrosión mediante:

- Disminución de la relación A/C con el uso de un reductor de agua en alto grado
- Disminución de la porosidad del concreto con el uso de microsilíce
- Uso propuesto de algunas sustancias químicas con el mismo fin

Los efectos secundarios se atribuyen a los reductores de agua en alto grado, la microsilíce, por su extraordinaria finura, incrementa la demanda de agua de mezclado en el concreto; para contrarrestarlo, se acostumbra emplear en unión con un reductor de agua en alto grado, cuyos efectos secundarios se han citado.

Retardadores de fraguado

Hay casos en que se requiere prolongar el lapso que antecede al fraguado, con objeto de disponer del tiempo necesario para cumplir con la colocación y la compactación del concreto en las formas, así como a reducir la necesidad de agua, compensando los efectos del tiempo caluroso sobre el asentamiento, fisuración, tiempo de fraguado y demanda de agua, antes de que éste pierda su condición de material moldeable.

Tal requerimiento suele manifestarse en tres circunstancias principales:

1. Cuando las temperaturas ambientales, durante el colocado, son tan altas que acortan inconvenientemente el tiempo de fraguado del concreto.
2. Cuando por condiciones de obra, transcurre demasiado tiempo entre la elaboración y la colocación del concreto en la estructura.
3. Cuando se requiere fundir una estructura monolítica y relativamente voluminosa, por capas sucesivas que deben ligarse sin presentar juntas frías.

El efecto que la temperatura produce sobre el tiempo de fraguado del concreto, es bien definido: el descenso de temperatura prolonga el tiempo de fraguado y el ascenso de temperatura lo reduce. De ahí la justificación para adelantarlo en tiempo frío y retrasarlo en tiempo cálido, con el fin de tratar de mantenerlo dentro de ciertos límites de duración que sean acordes con las prácticas operativas de la obra, las características de la estructura y sus condiciones de exposición al medio ambiente.

Para prolongar el tiempo de fraguado del concreto, hay dos medios factibles, que consisten en disminuir la temperatura del concreto al elaborarlo, o utilizar un aditivo que lo retarde. La disminución de la temperatura de elaboración del concreto, que es un procedimiento relativamente más costoso, se emplea en la construcción de estructuras voluminosas, no tanto para retrasar el tiempo de fraguado como para restringir la sobreelevación de la temperatura en el interior de la masa de concreto, por efecto del calor de hidratación del cemento. En consecuencia, por su sencillez y

economía, el medio más viable para prolongar el tiempo de fraguado del concreto consiste en adicionar a la mezcla una sustancia que produzca tal efecto.

Cuando se emplea un aditivo retardador en el concreto, se requiere que no afecte la evolución de las resistencias inmediatas. Sin embargo, debido a que el efecto retardador de algunas sustancias se prolonga más allá del fraguado del concreto, la adquisición de las resistencias en las primeras edades (1 a 3 días) también sufre un cierto atraso. Para compensar las consecuencias de este efecto secundario indeseable, es frecuente que los aditivos retardadores de fraguado desempeñen la función adicional de reducir el agua de mezclado, en cuyo caso se les designa como retardadores y reductores de agua.

Debido al clima cálido que impera en la mayoría del territorio nacional durante gran parte del año, junto a las diferentes condiciones de trabajo que son frecuentes en la construcción de centrales hidroeléctricas y a las características relativamente voluminosas de muchas de sus estructuras de concreto, esta clase de aditivos suele tener una función justificada en estas obras y por ello su utilización se admite con bastante frecuencia.

Adhesivos para concreto fresco

La adhesión entre concreto fresco y concreto endurecido, es un aspecto de mucha importancia en los trabajos de construcción y mantenimiento de las estructura de concreto reforzado, por la influencia que tiene en la adecuada liga entre los concretos, al efectuar reparaciones por defectos constructivos, deterioro y daños en las estructuras de concreto.

Para lograr una buena adhesión entre concretos en ambos estados, hay prácticas bien definidas que normalmente no requieren el uso de aditivos. Sin embargo, hay casos en que las características de la reparación son adversas a dicha adhesión, o bien las condiciones de exposición y servicio de la estructura ponen a prueba este aspecto del concreto reparado, en cuyos casos se manifiesta la necesidad de proveer medios adicionales adecuados para mejorar la adherencia del concreto fresco sobre el concreto endurecido.

Para tal finalidad existen dos procedimientos básicos:

1. Aplicar en la superficie del concreto endurecido, un producto que sirva como adhesivo de contacto entre ambos concretos: en este procedimiento, suelen emplearse resinas epoxy especialmente formuladas para reaccionar en presencia de agua (ASTM C 881) (98) y productos de base de látex (ASTM C 1059) (99) de los cuales hay dos tipos, los reemulsionables para emplearse en trabajos que prestarán servicio en condición seca y las no reemulsionables que pueden prestar servicio en condiciones de humedad.

Predosificado en seco, al cual se adiciona el agua necesaria para dar una mezcla de consistencia plástica que se aplica con una brocha o cepillo en la superficie del concreto endurecido, previamente recortada, escarificada y acondicionada conforme a las prácticas normalmente recomendadas para el logro de una buena adherencia.

2. Incluir en la mezcla de concreto fresco una sustancia (normalmente látex) que actúe como adhesivo integral y que fomente las propiedades de adhesividad en la mezcla: consiste en un adhesivo integral a base de látex en la mezcla de concreto fresco, existen algunos antecedentes de su empleo en áreas no expuestas a la humedad durante el servicio, pero no hay información de trabajos realizados con éxito en zonas expuestas a la humedad o en contacto con agua.

La siguiente tabla presenta un resumen de los efectos, ventajas y condiciones de aplicación de los aditivos para concreto fresco.

Tabla II. Aditivos para concreto fresco

Forma de empleo	Ventajas	Aplicaciones
<p>Efecto plastificante</p> <p>Se reduce el agua de amasado hasta un 30%. Resulta una reducción de la relación agua/cemento.</p>	<p>Mayores resistencias. Mejor adherencia del hormigón. Menor contracción por secado, expansión térmica y fluencia lenta. Mayor durabilidad e impermeabilidad. Menor exudación y segregación. Reduce costos de moldes y tiempo de obra.</p>	<p>Hormigón laborado. Hormigón bombeado. Hormigón pretensado. Hormigón premoldeado. Obras de ingeniería.</p>
<p>Efecto fluidificante</p> <p>Hormigones fluidos. No se reduce el agua de amasado, aumentando el asentamiento ($A > 18$ cm).</p>	<p>Menor segregación, exudación y contracción por secado. Leve incremento de resistencias. Facilita las tareas, reduciendo tiempos de ejecución, ahorro de mano de obra.</p>	<p>Zonas con mucha armadura, tabiques y superficies de gran calidad.</p>
<p>Reducir simultáneamente el contenido de agua y cemento</p>	<p>Economía. Menor calor de hidratación. Menor contracción por secado y por fragüe.</p>	<p>Hormigón masivo. Estructuras en general.</p>

Fuente: Instituto Argentino de racionalización de materiales. Manual de uso del concreto elaborado. Tema 4. Aditivos químicos y adiciones.

2.3 Mezclado del concreto

La operación de mezclado consiste en la rotación o batido, con el propósito de cubrir la superficie de todas las partículas del agregado con la pasta de cemento y mezclar todos los ingredientes del concreto en una masa uniforme; para asegurarse que los componentes estén combinados en una mezcla homogénea, se requiere de esfuerzo y cuidado. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado, sin embargo, se puede variar esa secuencia y aun así producir concreto de calidad. Las diferentes

secuencias requieren ajustes en el tiempo de adicionamiento de agua, en el número total de revoluciones del tambor de la mezcladora y en la velocidad de revolución.

Otros factores importantes en el mezclado son, el tamaño de la revoltura en relación al tamaño del tambor de la mezcladora, el tiempo transcurrido entre la dosificación y el mezclado, el diseño, la configuración y el estado del tambor mezclador y las paletas. Las mezcladoras aprobadas, con operación y mantenimiento correcto, aseguran un intercambio de materiales de extremo a extremo por medio de una acción de rolado, plegado y amasado de la revoltura sobre sí misma a medida que se mezcla el concreto.

2.3.1 Concreto recién mezclado

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. Una mezcla muy húmeda de concreto se puede moldear en el sentido de que puede colocarse en una cimbra, pero esto no entra en la definición de "plástico" aquel material que es plegable y capaz de ser moldeado o formado como un terrón de arcilla para moldar.

En una mezcla de concreto plástico todos los granos de arena y las piezas de grava o de piedra que eran encajonados son sostenidos en suspensión. Los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona sino que fluye como líquido viscoso sin segregarse.

El revenimiento se utiliza como una medida de la consistencia del concreto. Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia dura. En la práctica de la construcción, los elementos delgados de concreto y los elementos del concreto fuertemente reforzados requieren de mezclas trabajables, pero jamás de mezclas similares a una sopa, para tener facilidad en su colocación. Se necesita una mezcla plástica para que tenga resistencia y para mantener su homogeneidad durante el manejo y la colocación. Mientras que una mezcla plástica es adecuada para la mayoría

de trabajos con concreto, se puede utilizar aditivos superfluidificantes para adicionar fluidez al concreto en miembros de concretos delgados o fuertemente reforzados.

2.3.2 Trabajabilidad

La facilidad de colocar y consolidar al concreto recién mezclado, se denomina trabajabilidad.

El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar excesivamente. El sangrado es la migración de el agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado, provocada por el asentamiento de los materiales sólidos – cemento, arena y piedra dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación agua - cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se lleva acabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto fresco de segregarse y sangrar.

2.3.3 Vigilancia de las mezclas

En obras donde las cantidades de hormigón a manejarse son considerables, habrá que adoptar precauciones para que quede garantizada la economía de la puesta en obra y se consiga una calidad homogénea en el material.

El porcentaje de humedad de los áridos, en las pilas en que se almacenan, puede ser muy variable y podrá influir considerablemente en la resistencia y docilidad del hormigón. Por esta razón, será necesario realizar determinaciones periódicas del grado de humedad existente en los áridos.

Además, se realizarán pruebas de la calidad del concreto tomando muestras de éste para ser ensayadas, generalmente, a los 7 ó a los 28 días de hallarse sometidas a un curado normalizado. Es aconsejable, también, tomar muestras curadas en obra, cuyo proceso de curado sea semejante al curado de éste, con el fin de dictaminar el plazo de seguridad durante el cual es necesario dejar los encofrados en obra, y la capacidad del concreto para soportar una fracción o la totalidad de las solicitaciones del proyecto.

Amasado: el amasado durante períodos de tiempo largos es frecuente cuando el concreto es servido por una central de hormigoneado por medio de hormigoneras móviles; la experiencia hace ver que estas pueden continuar batiendo el hormigón durante una hora o más, sin que se produzcan efectos perjudiciales.

2.4 Forma de colocación

La colocación tiene como objetivo principal depositar el concreto tan cerca como sea posible a su posición final, evitando la segregación y permitiendo su compactación completa. Para lograr este propósito se debe tener en mente las reglas siguientes:

- a) Evitar el palear a mano y mover el concreto por inmersión
- b) El concreto debe colocarse en capas uniformes, no en grandes montones o en capas desniveladas
- c) El espesor de una capa debe ser compatible con el método de vibración, de modo que el aire atrapado pueda ser removido del fondo de cada capa
- d) Los índices de colocación y compactación deben ser iguales
- e) Cuando se requiera un buen acabado y un color uniforme en columnas y muros, los encofrados deben llenarse a razón de, por lo menos, 2m (6ft) por hora, evitando demoras prolongadas que resultan en la formación de juntas frías
- f) Cada capa debe quedar totalmente compactada antes de colocar la siguiente; cada capa subsecuente debe colocarse cuando la inferior esté aún plástica, de modo que se logre una construcción monolítica

- g) Evitar el choque entre el concreto y los encofrados o el refuerzo. Para secciones profundas, un tubo largo (hacia abajo) o un tremie asegura precisión en la ubicación del concreto y una segregación mínima
- h) El concreto se coloca en un plano vertical. Cuando se vierta en cimbras horizontales o en pendiente, debe colocarse verticalmente en contra del concreto colocado previamente. Para pendientes de más de 10°, debe emplearse una maestra de forma deslizante

2.4.1 Descarga de la motohormigonera en obra

Deberá hacerse de modo que no se produzca segregación de los materiales, para lo cual el hormigón nunca se dejará en caída libre desde más de un metro de altura. Si la descarga se hace directamente sobre la estructura (caso típico : pavimentos) el hormigón deberá caer verticalmente y en la cantidad aproximada al espesor necesario, corriendo la canaleta de descarga para evitar la acumulación de material en exceso que luego haya que correr lateralmente.

2.4.2 Transporte interno dentro de la obra

Para llevar el hormigón desde el punto de descarga de la motohormigonera hasta el lugar de colocación, el transporte vertical u horizontal debe hacerse en recipientes que eviten la pérdida de lechada y con piso o paredes no absorbentes y permanentemente bien humedecidas, para evitar pérdidas de humedad a la mezcla y facilitar el corrimiento del material.

Si se descarga en canaletas, deben estar colocadas con un ángulo tal que permita el deslizamiento lento del hormigón, y al llegar a la parte inferior, la caída debe ser vertical y de no más de un metro de altura.

Actualmente, el mejor medio de transporte vertical y horizontal es la bomba de hormigón, impulsando el material por una tubería desde la canaleta de descarga de la motohormigonera hasta el lugar de colocación, con total uniformidad, en el mínimo de tiempo y conservando la calidad que tenía al salir del tambor de la motohormigonera. Además, las bombas modernas son de mecánica muy confiable y con un diseño tal, que la vena del hormigón sale del manguerote final en forma continua.

2.4.3 Concreto bombeado

Hoy en día se pueden transportar grandes cantidades de concreto por medio de bombeo, através de tuberías, por largas distancias a lugares donde no es fácil acceder por otros medios. El sistema consiste en una tolva en la que se descarga el concreto de la mezcladora, una bomba para concreto y tubería a través de la cual se bombea el concreto.

El diámetro de la tubería debe ser, por lo menos, tres veces el tamaño máximo del agregado. Puede emplearse tubería rígida o flexible, pero la segunda ocasionará pérdidas adicionales por fricción y problemas de limpieza. La mezcla que se va a bombear no debe estar dura o pegajosa, ni muy seca o demasiado húmeda, es decir, de consistencia crítica. Por lo general, se recomienda un revenimiento de entre 1 ½ y 4 pulgadas (40 y 100mm).

El bombeo ocasiona compactación parcial, por lo que a la entrega, el revenimiento puede disminuir de ½ a 1 pulgada (10 a 25mm). Los requerimientos de consistencia son necesarios para evitar una excesiva resistencia por fricción en la tubería en el caso de mezclas demasiado secas, o segregación con mezclas demasiado húmedas.

2.4.4 Colocación del hormigón en los encofrados

Un buen proceso de colocación es el que tiende al llenado completo de los encofrados, en especial en las esquinas, sin alterar la uniformidad del hormigón y con un perfecto recubrimiento de las armaduras de refuerzo (sin vacíos, ni segregación).

Para ello deberá cumplir con los siguientes requisitos :

1. No depositar una gran masa en un solo punto y esperar que por su propio peso o con ayuda de algún elemento para correrlo, se vaya deslizando lateralmente hasta alcanzar la altura que corresponde y se llene el encofrado. Estos deslizamientos producen segregación del agua de mortero y de lechada de cemento, dejando en algunos casos separado el agregado grueso.
2. Evitar un exceso de compactación, en especial vibración, que hace subir a la superficie el mortero y lechada de cemento enviando hacia abajo el agregado grueso.
3. Evitar la compactación insuficiente porque se produce el fenómeno conocido como formación de **nidos de abeja**, es decir, oquedades ocupadas por macroburbujas de aire o bolsones de agua segregados de la mezcla que dejan huecos al desaparecer. En los **nidos de abeja** la resistencia del hormigón es cero.
4. Realizar una correcta colocación del hormigón en los moldes, haciéndolo caer en vertical sobre el lugar asignado, y nunca desde alturas superiores a un metro. Descargar desde alturas mayores produce inevitablemente segregación del material. En algunos casos habrá que dirigir el hormigón hacia los moldes, utilizando trozos cortos de tuberías que deben tener un diámetro de por lo menos tres veces el tamaño máximo del agregado.

El peligro de segregación es tanto mayor cuanto más grande es el tamaño del agregado y más discontinua su curva granulométrica. Las consecuencias son más graves cuanto menor es la sección de la pieza.

5. Para desplazar el hormigón, no se debe tratar de arrojarlo con palas a gran distancia, ni tratar de distribuirlo con rastrillos. Tampoco hacerlo avanzar desplazándolo más de un metro dentro de los encofrados.
6. En las estructuras muy gruesas (como plateas de fundación) debe fundirse por secciones cuyo espesor no supere los 50 cm. ya que en espesores superiores, la compactación es ineficaz.

Es frecuente obligar a que el hormigón sea distribuido en los encofrados dentro de las 1.50 horas siguientes a la iniciación del amasado.

3. FACTORES QUE AFECTAN EL AGRIETAMIENTO

3.1 Agua

La cantidad de agua por saco de cemento o por metros cúbicos de concreto es un importante factor, probablemente el más importante. A más agua, mayor tendencia al agrietamiento. Hay que recordar que la relación agua/cemento determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación. De ahí que tanto la relación agua/cemento como el grado de compactación afectan el volumen de vacíos del concreto.

Las mezclas con una relación agua/cemento muy baja y un contenido de cemento extremadamente alto (470 a 530 kg/m³) exhiben un retroceso de resistencia, particularmente cuando se usa agregado de gran tamaño. Por lo tanto, a edades posteriores, con este tipo de mezcla, una relación agua/cemento menor no conducirá a una resistencia superior.

Este comportamiento puede deberse a los esfuerzos inducidos por la contracción, que al ser obstruida por las partículas de agregado, causa el agrietamiento de la pasta de cemento o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

3.1.1 Calidad del agua de mezclado

Se ha mencionado la vital influencia de la cantidad de agua en la mezcla sobre la resistencia del concreto. La calidad del agua tiene también importancia: las impurezas del agua pueden interferir con el fraguado del cemento, afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie, y provocar la corrosión del acero de refuerzo. Por estas razones, debe considerarse la cantidad conveniente de agua en relación al mezclado y el curado.

En muchas especificaciones, la calidad del agua está cubierta por una cláusula que dicta que el agua debe ser potable. Como regla, el agua que no contiene un sabor áspero resulta apropiada, y el color oscuro o el mal olor no indican necesariamente la presencia de sustancias nocivas. Un método simple para determinar si el agua es adecuada consiste en comparar el tiempo de fraguado del cemento y la resistencia de cubos de mortero usando el agua en cuestión, con los resultados obtenidos usando agua buena conocida. Usualmente se permite una tolerancia de un 10% posible para variaciones aleatorias en la resistencia.

Los efectos indeseables que el agua de mezclado de calidad inadecuada puede producir en el concreto están relacionados con el tiempo de fraguado, las resistencias iniciales como posteriores, ataque de sulfatos, la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo.

3.2 Cemento

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto.

Para efectos de construcción el significado del término cemento se rige a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos. Los cementos que se utilizan para la fabricación de concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella, y por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos.

Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente de silicatos y aluminatos de cal y pueden clasificarse, en general, como cementos naturales, cementos Pórtland y cementos aluminosos.

3.2.1 Fabricación del cemento Pórtland

El cemento Pórtland está principalmente compuesto por materiales calcáreos, tales como caliza, alúmica y sílice, que se encuentran como arcilla o pizarra. También se utiliza marga que es un material calcáreo-arcilloso.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio, a una temperatura de 1300 a 1400°C, a la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como *clinker*. El *clinker* se enfría y tritura hasta obtener un polvo fino; a continuación se adiciona un poco de yeso y el producto comercial resultante es el cemento Pórtland.

3.2.2 Hidratación del cemento

La reacción mediante la cual el cemento Pórtland se transforma en un agente de enlace se produce en una pasta de cemento y agua. En otras palabras, en presencia del agua, los silicatos y aluminatos forman productos de hidratación, que con el paso del tiempo producen una pasta firme y dura. La pasta de cemento endurecida.

Se ha calculado que la hidratación completa bajo condiciones normales es sólo posible para partículas de cemento menores de 50 μm , pero se ha obtenido hidratación completa al moler continuamente cemento en agua durante 5 días.

3.2.3 Fraguado

Este es el término para describir la rigidez de la pasta de cemento, aún cuando la definición de rigidez de la pasta puede considerarse un poco arbitraria. El fraguado se refiere a un cambio de un fluido a un estado rígido.

Durante el fraguado la pasta requiere de alguna resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último se refiere al aumento de resistencia de una pasta de cemento fraguada.

El proceso de fraguado va acompañado por cambios de temperatura en la pasta de cemento: el fraguado inicial corresponde a un rápido aumento de temperatura. En este momento también se produce una fuerte caída en la conductividad eléctrica, por lo que se han realizado algunos intentos de medir el fraguado por medios eléctricos.

El tiempo de fraguado de un cemento disminuye al aumentar la temperatura, pero sobre los 30°C se puede observar un efecto inverso.

3.2.4 Finura del cemento

Debe recordarse el hecho de que una de las últimas etapas en la fabricación del cemento es la mezcla de *clinker* molido con el yeso. Puesto que la hidratación comienza sobre la superficie de las películas de cemento, el área superficial total del cemento constituye el material de hidratación. De este modo, la velocidad de hidratación depende de la finura de las partículas de cemento; por lo tanto, para un desarrollo rápido de la resistencia requiere un alto grado de finura.

Por otro lado, moler las partículas de cemento hasta obtener más finura representa un costo considerable; además, cuanto más fino sea un cemento, se deteriorará con mayor rapidez por la exposición a la atmósfera. Los cementos más finos experimentan una reacción más fuerte con los agregados reactivos alcalinos y forma una pasta, aunque no necesariamente de concreto, que exhibe una contracción mayor y más susceptibilidad de agrietamiento. Sin embargo, un cemento fino sangra menos que un cemento más grueso.

El contenido de agua de una pasta de consistencia normal es mayor en un cemento fino pero, por el contrario, un aumento en la finura del cemento mejorará levemente la trabajabilidad de una mezcla de concreto. Puede deberse, en parte, a que los resultados de las pruebas de consistencia de la pasta de cemento y de la trabajabilidad establecen propiedades diferentes de la pasta fresca; además, el aire que se encuentra en forma accidental afecta la trabajabilidad de la pasta de cemento, y los cementos de diferente finura pueden contener distintas cantidades de aire.

Se puede observar que la finura es una propiedad vital del cemento y tiene que someterse a un control cuidadoso.

3.2.5 Resistencia mecánica del cemento

Los productos de hidratación del cemento tienen una solubilidad más baja que los componentes originales, de tal forma que los hidratos se precipitan desde una solución sobresaturada.

Un trabajo experimental ha mostrado que los silicatos de calcio hidratado son de hecho cristales engranados extremadamente pequeños, los cuales, debido a su tamaño, podrán describirse como gel. Si se mezcla cemento con una pequeña cantidad de agua, el grado de cristalización es probablemente más pobre y se obtienen cristales mal formados.

Por otra parte, un área superficial de tanta magnitud como la del gel de cemento no es una condición necesaria para que se desarrolle una alta resistencia, tal como la de pastas de cemento curadas con vapor a alta presión, que tienen una reducida área superficial y excelentes propiedades hidráulicas.

Por lo tanto, no se puede estimar la importancia relativa de los enlaces físicos y químicos, pero no hay duda de que ambos contribuyen a la adquisición de la considerable resistencia de la pasta endurecida.

3.3 Agregados

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia a la pasta del cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables. Los agregados que contengan cantidades apreciables de esquistos o de otras rocas esquistas, de materiales suaves y porosos deberán evitarse, puesto que tiene baja resistencia al intemperismo y pueden ser causa de defectos en la superficie tales como erupciones.

Los agregados ocupan, por lo menos, tres cuartas partes del volumen del concreto, no es de sorprender que su calidad sea de gran importancia. El agregado limita la resistencia del concreto, ya que un agregado débil no puede producir concreto resistente y, además, afecta mucho la durabilidad y comportamiento estructural del concreto.

El agregado se consideraba, originalmente, como un material inerte, que estaba disperso dentro de la pasta de cemento cuya motivación era, sobre todo, económica.

El agregado es más barato que el cemento y, por lo tanto, resulta económico poner en la mezcla un máximo de agregado y el mínimo posible de cemento. Pero la economía no es la única razón por la que se utiliza este material: el agregado confiere considerables ventajas técnicas al concreto, el cual tiene más estabilidad de volumen y mejor durabilidad que la pasta de cemento sola.

3.3.1 Clasificación general del agregado

El agregado usado en el concreto varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. El tamaño máximo varía pero en cualquier mezcla se incorporan partículas de diferentes tamaños.

Todas las partículas de agregado proceden de una masa mayor, que puede haberse fragmentado por procesos naturales de intemperismo y abrasión o mediante la trituración artificial. Por lo tanto, muchas de las propiedades del agregado dependen de las propiedades de la roca original; tal es el caso de las propiedades químicas, la composición mineral, la descripción petrográfica, la densidad, la dureza, la resistencia, la estabilidad física y química, la estructura de poros, el color, etc. Algunas propiedades corresponden al agregado, pero no a la roca original: forma y tamaño de la partícula, textura superficial, absorción. Todas estas propiedades ejercen gran influencia en la calidad del concreto, ya sea fresco o endurecido.

3.3.2 Adherencia del agregado

La adherencia entre el agregado y la pasta de cemento es un factor importante en la resistencia del concreto, especialmente la resistencia a la compresión. La adherencia se debe, en parte, a la fuerza de fricción entre el agregado y la pasta por la aspereza de la superficie del agregado. Cuando se emplean partículas trituradas, con una superficie más áspera, el resultado es una mejor adherencia; se obtiene también una buena adherencia con el empleo de partículas suaves, porosas y mineralógicamente heterogéneas. Además, es afectada por otras propiedades físicas y químicas del agregado, relacionadas a la composición mineralógica y con la condición electrostática de la superficie de la partícula.

Un exceso de partículas fracturadas, sin embargo, puede sugerir que el agregado es demasiado débil. Debido a que la resistencia de la adherencia depende de la resistencia de la pasta, así como de las propiedades de la superficie del agregado, dicha resistencia de adherencia aumentará con la edad del concreto; al parecer la relación de la resistencia de adhesión a la resistencia de la pasta se eleva con el paso del tiempo. Por lo tanto, si la adherencia es adecuada, la resistencia de adhesión no es un factor que controle la resistencia del concreto. En el concreto de alta resistencia, la resistencia a adhesión es menor que la resistencia a la tensión de la pasta de cemento.

3.3.3 Sustancias perjudiciales en el agregado

Entre estas sustancias perjudiciales que encontramos en los agregados y que pueden provocar daños al concreto podemos mencionar:

- Impurezas, que interfieren en el proceso de hidratación del cemento
- Recubrimientos, que impiden el desarrollo de una buena adherencia entre el agregado y la pasta de cemento; y
- Partículas en sí que son débiles e inestables

Un agregado puede ser total o parcialmente dañino, debido al desarrollo de reacciones químicas entre el agregado y la pasta de cemento.

Impurezas orgánicas: la materia orgánica que se encuentra en el agregado suele consistir en productos de la descomposición de materia vegetal y se manifiestan en la forma de humus o margas orgánicas. Es más probable encontrar estas sustancias en la arena, la cual puede lavarse con facilidad.

Arcilla y otros materiales finos: la arcilla puede presentarse en el agregado en la forma de recubrimientos superficiales que interfieren en la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. Como una buena adherencia resulta indispensable para obtener una resistencia satisfactoria y buena durabilidad del concreto, el problema de los recubrimientos de arcilla resulta importante³.

Contaminación salina: la arena obtenida de playas contiene sal. El procedimiento consiste en lavar esta arena con agua dulce, pero es necesario tener cuidado porque la arena se encuentra en lugares donde hay grandes cantidades de sal, a veces hasta del 6% por peso.

Partículas Inestables: hay dos clases: las que no mantienen su integridad y las que experimentan expansión destructiva sometidas a congelación o aún en contacto con agua. Las propiedades destructivas son características de determinadas rocas.

3.3.4 Sanidad del Agregado

Se le da este nombre a la capacidad del agregado para resistir cambios excesivos en volumen en consecuencia de los cambios en las condiciones físicas.

Las causas físicas de cambios de volumen grandes o permanentes del agregado son el deshielo y congelamiento, los cambios térmicos a temperatura sobre el punto de congelamiento y los estados mojados y secos sucesivos.

Se dice que los agregados son inestables cuando las causas anteriores inducen cambios en volumen que resultan en deterioro del concreto. Estos daños pueden variar de descascaramientos locales hasta el agrietamiento superficial y desintegración de una profundidad considerable; es decir, los efectos van de tan sólo un aspecto deficiente hasta una situación peligrosa desde el punto de vista estructural.

Considerando la forma del agregado, el esfuerzo en el cual empieza el agrietamiento significativo es afectado por la forma del agregado: la grava pulida conduce al agrietamiento a esfuerzos menores que el agregado áspero y anguloso en condiciones iguales. El efecto, similar en tensión y compresión, se debe a una mejor adherencia y menos microagrietamiento con un agregado despedazado y anguloso.

De hecho, la influencia de la forma del agregado es más evidente en la prueba del módulo de ruptura que en las pruebas de compresión o de tensión uniaxiales, probablemente debido a la presencia de un gradiente de esfuerzos se retrasa el avance del agrietamiento hacia la falla última. Por lo tanto, un concreto con agregado de forma angular tendrá una mayor resistencia a flexión que otro en que es usado agregado de forma especialmente en mezclas con baja relación agua/cemento. Sin embargo, para mezclas prácticas de la misma manejabilidad, un agregado de forma redondeada requiere menos agua que uno anguloso, por consiguiente, las resistencias flexurales de los dos concretos son similares.

3.4 Formaletas para el concreto

El encofrado: es la estructura temporal que sirve para darle al concreto la forma definitiva. Su función principal es ofrecer la posibilidad de que el acero de refuerzo sea colocado en el sitio correcto, darle al concreto la forma y servirle de apoyo hasta que endurezca, está constituido por el molde y los puntales (tacos), que pueden ser metálicos o de madera.

Los encofrados de los muros deben poseer la resistencia y rigidez que se precisen con el menor costo posible y en consecuencia se debe prestar especial atención a los materiales, a la mano de obra y el equipo necesario para la construcción, colocación y retirada de los encofrados.

Los revestimientos de plásticos, una buena capa de aceite o la mojadura completa, pueden proteger el encofrado contra el deterioro y la contracción antes de colar el concreto.

Tensiones admisibles de la madera

Hay diferentes materiales a utilizar en el diseño de formaletas para el concreto, la elección del tipo de material va a depender de varios factores como lo es la estructura que va a soportar, el clima donde se esté trabajando y la economía.

Se ha comprobado que los encofrados bajo ciertas condiciones climatológicas pueden llegar a afectar al concreto reforzado.

Condiciones generales de los encofrados

En clima cálido, la formaleta metálica actúa como barrera contra la disipación del calor interno del concreto hacia el ambiente exterior, provocan un sobrecalentamiento de la estructura que es indeseable; asimismo, la permanencia de estas formaletas impide la pronta ejecución del tratamiento de curado previsto para mantener la humedad necesaria en el interior del concreto.

Por estas razones, el desencofrado en tiempo caluroso es deseable realizarlo a la mayor brevedad posible, en cuanto lo permita el grado de endurecimiento necesario en el concreto, e iniciar de inmediato la aplicación del tratamiento de curado.

3.4.1 Remoción de Formaleta

La remoción de formaleta es una actividad que se realiza al principio de la etapa de endurecimiento del concreto; debido a ello, es necesario definir el grado de endurecimiento que el concreto debe tener en el momento de efectuar esta actividad, de manera que posea la capacidad de soportar, sin daño, los efectos de las acciones y cargas que con tal motivo se le comuniquen.

Es pertinente diferenciar dos tipos de formaletas: las que corresponden a los moldes que dan forma y confinamiento al concreto y las que suministran el apoyo para soportarlo durante el lapso indicado. Al referirse a las primeras, se acostumbra designarlas como formas, forros, moldes o cimbras no soportantes. En cuanto a las segundas, que es la formaleta soportante, suelen constar de diversos elementos como puntales, travesaños, cuñas, etc. También hay casos en que la formaleta puede cumplir ambas funciones.

Por lo general, se requieren diferentes grados de endurecimiento en el concreto para permitir la remoción de los dos tipos de formaleta, siendo lo usual que primero se retiren las que solamente actúan como forma, ya que no proporcionan apoyo estructural al concreto; sin embargo, en ambos casos es necesario asegurarse que el concreto haya obtenido el grado de endurecimiento apropiado. Lo que se busca en retirar el encofrado en el menor tiempo posible para que sea compatible con el requisito de no causar daño a la estructura.

Remoción de la formaleta, en climas extremos consultar informes de los comités ACI 305 (68)⁴.

Formaletas no soportantes

Normalmente tienen contacto directo con el concreto porque le dan forma y confinamiento, y aunque le sirven de apoyo lateral no le proporcionan soporte estructural. El requisito de carácter mecánico para el retiro de las mismas es que el concreto posea suficiente rigidez para autoportarse lateralmente y para no sufrir roturas o hendiduras al aplicar las herramientas acostumbradas en esta actividad.

En estructuras sin grandes superficies laterales, no expuestas a bajas temperaturas externas y colados con un concreto hecho con cemento Portland sin aditivos retardadores de fraguado, es probable que el retiro de formaleta pueda iniciarse a las 24 horas de concluido el colado después de una verificación del estado de endurecimiento superficial del concreto.

Formaletas soportantes

Para el desencofrado de este tipo de cimbras, el concreto tendrá que tener un grado de endurecimiento tal que lo capacite para resistir los esfuerzos provenientes del soporte de su propio peso y de cualquier otra carga impuesta, previamente considerada.

La formaleta deberá tener gran resistencia para soportar una fuerte vibración de concreto de bajo revenimiento.

Deberá evitarse la exposición de superficies calientes de concreto a condiciones de secado rápido, o a bajas temperaturas antes del curado, durante el desencofrado, si se quiere prevenir el agrietamiento térmico y por secado.

3.5 Curado del concreto

Las principales alteraciones en las condiciones de curado, que afectan al proceso de endurecimiento y a la resistencia del concreto, son las variaciones en el grado de humedad y en las condiciones térmicas. Aún cuando es importante que la cantidad de agua usada en las mezclas sea controlada, de manera que la consistencia se mantenga tan próxima a la fijada como sea posible, asimismo, es tan importante que no se permita que el concreto se seque inmediatamente, si se desea obtener la máxima resistencia. Todo concreto tendrá que ser protegido contra una desecación prematura durante un plazo de una semana, como mínimo y durante un tiempo más largo si persisten las bajas temperaturas.

3.5.1 Métodos de curado

Los procedimientos que se usan varían ampliamente y dependen de las condiciones de la obra y del tamaño, la forma y la posición del elemento estructural.

En el caso de miembros con una relación volumen/superficie pequeña, se ayuda el curado humedeciendo los encofrados de la colocación del concreto; los encofrados pueden mojarse también durante el endurecimiento, y después del desencofrado, el concreto debe rociarse y forrarse con hojas de polietileno o alguna otra cubierta adecuada.

En superficies de concreto grandes, a fin de prevenir el agrietamiento de la superficie por secado, se impiden pérdidas de agua, aún antes de la colocación. Como el concreto es en ese momento débil mecánicamente, es necesario suspender una cubierta sobre la superficie del concreto. Esta protección requiere únicamente el clima seco, pero puede ser útil también para evitar que la lluvia pique la superficie del concreto.

Una vez colocado el concreto, puede proporcionarse un curado húmedo si se mantiene el concreto en contacto con una fuente de agua. Esto se logra rociando, inundando o cubriendo el concreto con arena o tierra húmeda, aserrín o paja, todos húmedos. La diferencia es mayor con relaciones agua/cemento bajas, donde la desecación opera más rápidamente. La influencia de las condiciones de curado sobre la resistencia es menor, en el caso de concreto con aire incluido, que en el que no lo tiene.

El período de curado no puede prescribirse con sencillez, pero se especifica un mínimo de siete días para concreto hecho de cemento Portland ordinario. Con cementos de endurecimiento más lento es deseable un período de curado. El concreto de alta resistencia debería de curarse a edad temprana, ya que una hidratación parcial podría crear discontinuidad en los capilares: al renovarse el curado, tal vez el agua no entre al interior del concreto, esto impide la hidratación posterior. Sin embargo, las mezclas con una relación agua/cemento alta siempre retienen un gran número de capilares, así que el curado puede reiniciarse efectivamente en cualquier momento. No se causa ninguna pérdida de resistencia por retrasar el curado, pero en la práctica un secado a edad temprana puede conducir a la contracción y la formación de grietas, y no es aconsejable retrasar el curado.

Después del colado: aunque no constituyen estrictamente un recubrimiento o protección permanente, los agentes de curado son de primordial importancia en la obtención de un concreto de buena calidad, puesto que las superficies de concretos no curados son inevitablemente más permeables y, por lo tanto, menos durables que las del concreto curado.

El curado inicial es vital para los efectos de la durabilidad, y cualquier día que se omita de aplicación del mismo, equivale aproximadamente a tres meses de exposición al efecto intermitente de humedecimiento y secado.

En lo que respecta a proporcionar protección al acero contra la corrosión, existen aditivos que la inhiben al generar una película de espesor molecular que protege y estabiliza la capa pasiva, y su efecto se mantiene aún en ausencia de contacto directo con el concreto. Estos productos muestran la propiedad de migrar a través del concreto por distancias de 1 a 2 metros, con lo cual, además de utilizarse como constituyente de la formulación original del concreto, puede extenderse su uso y desempeñarse como tratamiento preventivo de la corrosión cuando el concreto original no haya sido tratado, o como tratamiento correctivo en casos en los que esté desarrollándose un proceso de corrosión para detener el avance del mismo.

Existen en el mercado materiales para la protección posterior del concreto, reducir su permeabilidad superficial e incluso impedir el paso de cualquier agente agresivo, los cuales están elaborados con una amplia gama de componentes que van desde las parafinas hasta los productos epóxicos. Evidentemente, la elección de uno u otro producto será función directa del grado de exposición del elemento, así como del grado de vulnerabilidad propia que posea originalmente.

En general, el éxito de estos recubrimientos depende de su aplicación, pues todos ellos requieren que la superficie se encuentre libre de agua, grasa u objetos extraños, de tal manera que permitan una estrecha adherencia sobre la superficie del elemento que se ha de proteger. Para que puedan considerarse efectivos, debe garantizarse que la resistencia adhesiva con el concreto, sea cuando menos, igual a la resistencia en tensión del concreto en la superficie.

Es importante remarcar que cualquiera de estas protecciones es temporal –unas tienen mayor durabilidad que otras– y, por lo tanto, todas requieren una supervisión y mantenimiento programados. Asimismo, cualquier agrietamiento en la superficie de concreto, incluyendo aquellos que ocurren después de la aplicación de la protección, se reflejarán a través de ésta si la estructura está sujeta a movimientos por cambio de temperatura o cargas externas. Este movimiento del concreto puede llegar a anular la habilidad de la barrera para brindarle protección al concreto.

4. TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE GRIETAS EN EL CONCRETO

Cabe destacar que el concreto reforzado es realmente un método de construcción con grietas, lo cual significa que, en la fase de diseño de las partes que soportan cargas de una estructura de concreto reforzado, se prevé la zona de agrietamiento por tensión y se presupone que las grietas se presentan en las partes del concreto sujetas a fuerzas de tensión, debido a que éste presenta una resistencia muy baja a la tensión y por lo que dichas fuerzas se transmiten al acero de refuerzo.

4.1 Problemas del concreto

Hay dos aspectos generales del ambiente: el clima y la geología. A estos se le puede agregar la mano de obra sin experiencia o con poca experiencia. Pero la producción de concretos durables en las áreas cálidas es significativamente más difícil que en áreas templadas.

El ambiente climático adverso se caracteriza por temperaturas altas, radiación solar intensa y humedad relativamente baja; y alta cerca de la costa.

El agua frecuentemente es de suministro restringido, el cemento puede que necesite transportarse a localidades diferentes y lejanas, y la infraestructura puede que no esté técnicamente desarrollada, lo que representa factores negativos en la producción de un buen concreto.

La tabla III presenta una clasificación de grietas que pueden aparecer en el concreto reforzado, el momento y las causas principales de su aparición, así como las medidas de prevención que se pueden tomar en cuenta para evitar el apareamiento de las mismas.

Tabla III. Tipos y clasificación de grietas

Clases o tipo de grietas	Momento de aparición	Causa principal	Medidas Preventivas
Grietas de contracción plástica	Primeras horas	Movimientos plásticos Perdida de humedad	Mejorar el curado
Asentamiento plástico	Primeras horas antes del fraguado	Movimientos verticales, exudación, pérdida de humedad	Mejorar el diseño de la mezcla, reducir el retardo, mejorar el curado
Grietas por contracción por secado	De días a meses	Contracción por pérdida de humedad	Mejorar el curado, mejorar la mezcla reduciendo relación agua/ cemento
Cuartheaduras	De días a meses	Contracción superficial menor de la lechada	Mejorar el curado, no revibrar
Grietas térmicas	De días a semanas, para el movimiento inicial, de meses para los movimientos finales.	Movimiento de expansión y contracción a corto y largo plazo, calor de hidratación	Reducir la temperatura pico y las diferenciales, además de contemplar en el diseño estructural los movimientos a largo plazo
Grietas de tensión; contracción por carbonatación	De meses a años	Dióxido de carbono atmosférico	Concreto denso
Grietas de corrosión del refuerzo.	De meses a años	Expansión del refuerzo por oxidación, especialmente en concretos porosos y ambientes marinos.	Cubrir bien el acero con 50 a 75 mm de concreto como mínimo; concreto denso.

Fuente: Edgar Enrique Gramajo Barrios, Grietas en edificaciones de concreto: causas, prevención y control. Caso: Proyecto Nimajuyú. Págs. 45-46

4.2 Agrietamiento debido al asentamiento del concreto plástico

Durante el endurecimiento del concreto, éste tiende a asentarse ligeramente en el molde cuando está en estado plástico, lo que hace que el concreto se separe ligeramente de las varillas que normalmente están en posición fija. Se pueden producir líneas de agrietamiento que siguen al refuerzo.

Las temperaturas altas del concreto, alta velocidad del viento y baja humedad, causa rápida evaporación del agua en la superficie; por otra parte, la velocidad de mezclado depende de los ingredientes y proporciones de la mezcla, y del tipo de consolidación y acabado; la probabilidad del agrietamiento por asentamiento plástico aumenta cuando se incrementa la evaporación, debido a las condiciones ambientales o cuando el concreto reduce la velocidad de sangrado.

La contracción induce esfuerzos a la tensión en las capas de la superficie porque están restringidos por el concreto interior no contraído, y como el concreto es muy débil en su estado plástico, se puede producir rápidamente agrietamiento plástico en la superficie, esta contracción es mayor cuanto mayor sea el porcentaje de evaporación del agua, que depende a su vez, de la temperatura del concreto, aire, humedad relativa del aire y velocidad del viento.

Mientras la pasta de cemento es plástica, experimenta una contracción volumétrica cuya magnitud es del orden de 1% del volumen absoluto del cemento seco. Esta contracción se conoce como contracción plástica. Una prevención total de la evaporación inmediatamente después del vaciado disminuye la contracción plástica. Debido a que la pérdida de agua de la pasta de cemento es la causante de la contracción plástica.

Cuanto más grande es el contenido de cemento en la mezcla mayor será la contracción plástica y disminuye cuando aumenta el contenido de agregado en volumen.

El agrietamiento por contracción plástica es frecuentemente asociado al tiempo caliente en climas áridos.

El agrietamiento debido a asentamiento del concreto plástico aparece en la superficie del concreto fresco durante operaciones de acabados, o después. Las grietas son generalmente de 1 a 3 pies (0.30 a 0.90 m), de 1 a 2 pulgadas de profundidad y rara vez se extiende al perímetro o afecta la resistencia del concreto, pero adquiere mala apariencia.

Factores que contribuyen al apareamiento de grietas:

- Decrecimiento de la humedad relativa
- Aumento de la velocidad del viento
- Aumento en la temperatura ambiente o decaimiento substancial de la humedad relativa
- Alta temperatura del concreto

El uso de aditivos puede afectar la tendencia al agrietamiento mediante combinaciones de efectos sobre el endurecimiento, la contracción y la fluencia. Los retardantes pueden producir una mayor contracción que sea absorbida en la forma de contracción plástica y, probablemente, incrementar la extensibilidad del concreto; por lo tanto, reducen el agrietamiento. Si el concreto logra rápidamente un estado rígido, no puede absorber la posible contracción plástica y como tiene poca resistencia, se agrieta.

La temperatura en el tiempo de colocación determina las dimensiones del concreto cuando deja de deformarse plásticamente. Un descenso inmediato de temperatura produce contracción potencial. Por lo tanto, la colocación a elevadas temperaturas implica una alta tendencia al agrietamiento. Los elevados gradientes térmicos o de humedad causan agrietamiento.

Para minimizar el agrietamiento plástico se debe:

- Reducir la absorción de agua o usar la barrera de vapor
- Trabajar bajo techo
- Levantar una pared temporal para reducir el movimiento del viento
- Programar las fundiciones temprano por la mañana o en últimas horas de la tarde
- Realizar la fundición del concreto con el personal calificado, abastecimiento y equipo apropiado
- Realizar un curado apropiado
- Empezar el procedimiento de curado lo más pronto posible

Las fisuras por agrietamiento plástico son difíciles de cerrar una vez que han ocurrido. Tales fisuras pueden constituir puntos focalizados para otras formas de deterioro, ya que permiten penetrar en el hormigón, humedad y sales disueltas, y pueden afectar su comportamiento.

4.3 Contracción por fraguado y secado

Uno de los factores más importantes del agrietamiento es la relación agua/cemento de la mezcla, ya que su incremento tiende a aumentar la contracción y al mismo tiempo, a reducir la resistencia del concreto. Incremento en el contenido de cemento aumenta también la contracción y por lo tanto, la tendencia a formar grietas; sin embargo, el efecto sobre la resistencia es positivo. Esto se aplica a la contracción por secado. Por otro lado, la presencia de arcilla en el agregado lleva a un aumento, tanto de la contracción como del agrietamiento.

4.3.1 Velocidad de secado del concreto

El concreto ni endurece ni se cura con el secado. El concreto (o de manera precisa, el cemento en el contenido) requiere de humedad para hidratarse y endurecer.

El secado del concreto únicamente está relacionado con la hidratación y el endurecimiento de manera indirecta. Al secarse el concreto, deja de ganar resistencia; el hecho de que esté seco, no es indicación de que haya experimentado la suficiente hidratación para lograr las propiedades físicas deseadas.

El conocimiento de la velocidad de secado es útil para comprender las propiedades o la condición física del concreto; debe seguir reteniendo suficiente humedad durante todo el período de curado para que el cemento pueda hidratarse. El concreto recién colado tiene agua abundante, pero a medida que el secado progresa desde la superficie hacia el interior, el aumento de resistencia continuará a cada profundidad únicamente mientras la humedad relativa en ese punto se mantenga por encima del 80%.

La superficie de un piso de concreto que no ha tenido suficiente curado húmedo es una muestra común. Debido a que se seca rápidamente, el concreto de la superficie es débil y se produce descascaramiento en partículas finas provocado por el tránsito.

Asimismo, el concreto se contrae al secarse, de forma semejante a la madera, papel y la arcilla (aunque no tanto). La contracción por secado es una causa fundamental de agrietamiento, y el ancho de las grietas es función del grado del secado.

En tanto que la superficie del concreto se seca rápidamente, al concreto en el interior le lleva mucho más tiempo secarse.

El contenido de humedad en elementos delgados de concreto que han sido secados al aire con una humedad relativa de 50% a 90% durante varios meses es de 1% a 2% en peso del concreto, del contenido original de agua, de las condiciones de secado y del tamaño del elemento de concreto.

El tamaño y la forma de un miembro de concreto mantiene una relación importante como la velocidad de secado.

Los elementos del concreto de gran área superficial en relación a su volumen (tales como losas de piso) se secan con mucha mayor rapidez que los grandes volúmenes de concreto con áreas superficiales relativamente pequeñas.

Muchas otras propiedades del concreto endurecido se ven también afectadas por su contenido de humedad; en ellas incluye la elasticidad, flujo plástico, valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica, durabilidad.

4.3.2 Estabilidad volumétrica

El concreto endurecido presenta ligeros cambios de volumen debido a variaciones en la temperatura, en la humedad y a los esfuerzos aplicados. Estos cambios de volumen o de longitud pueden variar de aproximadamente 0.01% hasta 0.08%. En el concreto endurecido los cambios de volumen por temperatura son casi para el acero.

El concreto que se mantiene continuamente húmedo se dilatará ligeramente. Cuando se permite que seque, el concreto se contrae. El principal factor que influye en la magnitud de la contracción por el secado, aumenta directamente con los incrementos de este contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de otros factores, como las cantidades de agregado empleado, las propiedades del agregado, tamaño y forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación, y tiempo. El contenido de cemento tiene un efecto mínimo a nulo sobre la contracción por secado para contenidos de cemento entre 280 y 450 kg por metro cúbico.

Cuando el concreto se somete a esfuerzo, se comporta elásticamente, los esfuerzos sostenidos resultan en una deformación adicional llamada fluencia. La velocidad de la fluencia (deformación por unidad de tiempo) disminuye con el tiempo.

Un fraguado rápido puede provocar insuficiencia de tiempo para maniobrar y dejar compactado el concreto en la estructura.

En cuanto a un fraguado excesivamente lento puede tener diversas consecuencias indeseables, como por ejemplo:

1. Mayor tiempo y oportunidad para que el concreto se asiente y sangre
2. Aumento de la presión que el concreto sin fraguar produce sobre el encofrado
3. Mayores cambios volumétricos iniciales por secado, con la posibilidad que se produzcan agrietamientos por contracción plástica
4. Retrasos en las operaciones de acabado superficial, en la remoción de los encofrados soportantes y en la ejecución de colados sucesivos
5. Riesgos de daños por congelación al concreto expuesto a muy bajas temperaturas

Por estas razones, se busca el efecto contrario, aplicar medidas para reducir el tiempo de fraguado del concreto con el objeto de prevenir alguna de estas consecuencias indeseables.

4.4 Agrietamiento por temperatura

Hay algunos problemas especiales en la colocación del concreto en un clima como el de Guatemala, causados tanto por la alta temperatura del concreto y, en muchos casos, por la mayor evaporación en la mezcla fresca. Estos problemas son también relativos al mezclado, la colocación y el curado del concreto.

Una mayor temperatura en el concreto fresco produce una hidratación más rápida, y conduce a un fraguado acelerado y una resistencia más baja del concreto endurecido, pues se establece una estructura menos uniforme del gel.

Una evaporación rápida puede causar contracción plástica y agrietamiento superficial, y el enfriamiento posterior del concreto endurecido introduce esfuerzos de tensión. Una disminución de la humedad relativa del ambiente fomenta el agrietamiento.

Las diferencias de temperatura sobre las dos caras de una losa expuesta directamente a los rayos solares, pueden alcanzar en su parte superior cerca de 48°C, mientras que en su parte inferior permanece con 26°C a 22°C. Esto tiende a ocasionar mayor expansión en la superficie superior, que en la inferior.

El resultado será un movimiento ascendente durante el calentamiento y otros descendente durante el enfriamiento.

La influencia de las proporciones de la mezcla proviene del hecho de que los dos constituyentes principales del concreto, la pasta de cemento y el agregado, tienen coeficientes térmicos diferentes. El coeficiente del concreto afectado por estos dos valores y también por las proporciones volumétricas y las propiedades elásticas de ambos componentes. De hecho el papel que aquí desempeña el agregado es similar al de la contracción y el flujo plástico; es decir, el agregado reprime el movimiento térmico de la pasta de cemento, la cual tiene un coeficiente térmico más alto.

4.4.1 Agrietamientos térmicos iniciales del concreto colado fresco

El concreto fresco sufre un aumento de temperatura debido a la generación del calor de hidratación del cemento. Durante las primeras horas o días sube la temperatura y luego se enfría por la temperatura del ambiente circulante. Cuando el enfriamiento ocurre dos o tres días después de la fundición, el concreto aún tiene muy poca resistencia al esfuerzo de tensión.

Las débiles resistencias a la tensión junto con la contracción térmica de los miembros, ocasiona probablemente grietas por tensión.

Factores que afectan el aumento de la temperatura inicial:

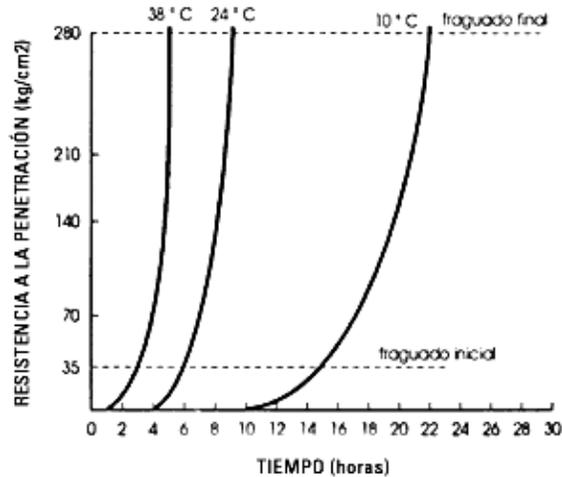
- Temperatura inicial de los materiales, especialmente de los agregados.
- Temperatura del ambiente, cuando es alta genera picos altos.
- Dimensiones, secciones grandes generan más calor.
- Curado, el agua de curado disipa el calor durante la construcción, se pueden evitar choques térmicos.
- Tiempo de retiro del encofrado (moldes): el retiro temprano de encofrados reduce los picos de temperatura.
- Tipos de encofrados: moldes de madera no permiten disipar el calor tan rápidamente como los de acero, sin embargo, los primeros son más aislantes al calor de los rayos solares que los segundos.
- Contenidos de cemento: más cemento en la mezcla genera mayor calor de hidratación.
- Tipo de cemento: el tipo III produce más calor que los demás.

Basta decir que el objetivo es una temperatura no menor de 16°C, sin exceder, de ser posible, de 32°C. Después de la colocación, el concreto debe protegerse del sol; de lo contrario, en una noche fría probablemente haya agrietamiento.

4.4.1.1 Efectos de la temperatura

El tiempo de fraguado depende de la temperatura de la mezcla del hormigón; la figura 1 ilustra este fenómeno. Notemos que para una variación de temperatura de 14° C, cambia el fraguado inicial del hormigón en un factor de aproximadamente 2. A pesar que la figura está basada sobre datos limitados, se manifiesta un decidido efecto de la temperatura sobre el tiempo de fraguado cuando la temperatura de colocación del hormigón está en el rango de 10 a 38° C.

Figura 1. El tiempo de fraguado depende de la temperatura de la mezcla del concreto



Fuente: Instituto Argentino de racionalización de materiales. Manual de uso del concreto elaborado. Tema 13.

Todas las marcas de cemento y todos los hormigones exhibirán este fenómeno. Si se acelera el tiempo de fraguado del hormigón en clima caluroso, aumenta la posibilidad de formación de uniones sin continuidad y **nidos de abeja**.

Es importante estudiar la forma de mantener el tiempo de fraguado -tanto inicial como final-, dentro de los valores correspondientes a los tiempos normales, (aproximadamente a 20° C de temperatura ambiente), recurriendo por ejemplo a utilizar agua fría; mojar los agregados en las pilas, etc. Este enfriamiento en los materiales, para lograr una temperatura en el interior de la masa de hormigón, acorde con los tiempos de fraguado ya conocidos para épocas normales.

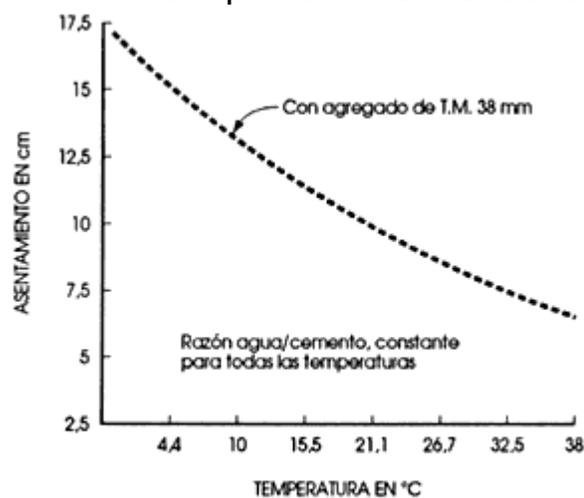
Tiempo de fraguado inicial muy corto, acorta los tiempos de entrega y colocación en los encofrados; a medida que aumenta la temperatura, aumentarán también los requerimientos de agua, el agua, como un ingrediente del hormigón, tiene gran influencia sobre muchas de sus propiedades significativas, tanto en el estado plástico como en el endurecido.

Elevadas temperaturas del agua, provocan mayores temperaturas del hormigón y a medida que ésta aumenta, también aumenta la demanda de agua y disminuye la resistencia, para hormigones de la misma consistencia.

El agua adicional, sin corrección de sus efectos sobre la relación agua/cemento, afectará negativamente la calidad final del hormigón colocado.

Notemos en la Figura 2 que el hormigón a temperaturas de laboratorio, presentaba en este ensayo un asentamiento de 10 cm., pero que a 38° C tenía solamente 7,5 cm. de asentamiento.

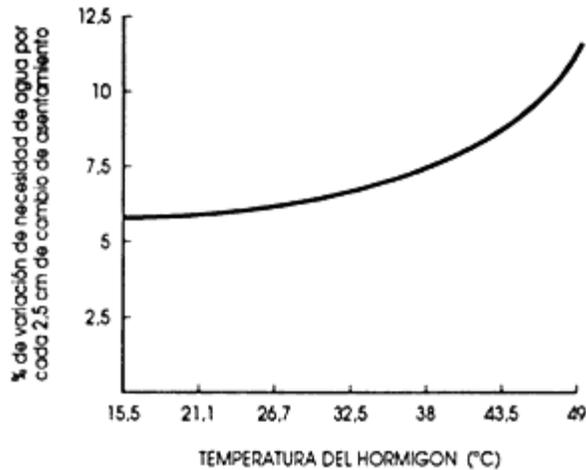
Figura 2. Pérdida de asentamiento debida a la elevación de la temperatura de mezclado



Fuente: Instituto Argentino de racionalización de materiales. Manual de uso del concreto elaborado. Tema 13.

Si el pliego de condiciones le permite al contratista un asentamiento de 10 cm. (y él puede necesitar 10 cm. para una operación dada), a 38° C debería agregar agua al hormigón para obtenerlo (respecto de las dosificaciones de laboratorio). Por otra parte, a medida que la temperatura aumenta, también aumenta la cantidad de agua requerida para cambiar el asentamiento como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Efecto de la temperatura del hormigón sobre el agua requerida para cambiar el asentamiento



Fuente: Instituto Argentino de racionalización de materiales. Manual de uso del concreto elaborado. Tema 13.

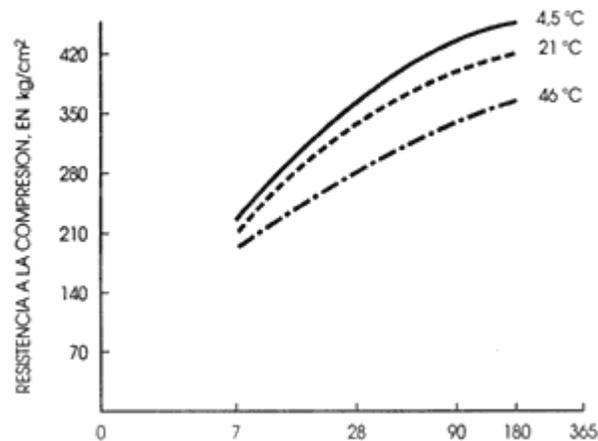
Incluso si el contratista es obligado a utilizar una relación agua/cemento preestablecida, y aún si él decide colocar el hormigón con asentamiento reducido a temperaturas elevadas, ello sería en detrimento de la resistencia del hormigón.

4.4.2 Influencia de la temperatura en la resistencia del concreto

Una elevación en la temperatura de curado acelera las reacciones químicas de la hidratación, y esto afecta benéficamente la resistencia temprana del concreto, sin efectos contrarios en la resistencia posterior. Sin embargo, una temperatura más alta durante la colocación y el fraguado, aunque incrementa la resistencia a muy temprana edad, puede afectar adversamente la resistencia a partir de aproximadamente los 7 días. La explicación es que una rápida hidratación inicial parece formar productos de una estructura física más pobre, probablemente más porosa, por lo que una proporción mayor de poros se mantendrá siempre sin llenar. Esto viene de la regla de la relación gel/espacio que conducirá a menos resistencia, comparada con una menos porosa, en donde, aunque con hidratación lenta de la pasta, se alcanzará, finalmente una mayor relación gel/espacio.

Un mayor contenido de agua en el hormigón, disminuye la resistencia, la durabilidad, la impermeabilidad y demás propiedades relacionadas del hormigón endurecido. Esto, que es común a todos los hormigones colocados bajo cualquier condición climática, puntualiza la necesidad especial de controlar el empleo del agua en el hormigón colocado bajo condiciones de tiempo caluroso, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Efecto de la temperatura inicial sobre la resistencia a la compresión del hormigón



Fuente: Instituto Argentino de racionalización de materiales. Manual de uso del concreto elaborado. Tema 13.

A medida que aumenta la temperatura del hormigón, aumentará también la velocidad de pérdida de asentamiento. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que, a temperaturas más elevadas, hay menos tiempo disponible para el transporte, colocación y compactación del hormigón.

El rápido grado inicial de hidratación a más alta temperatura retarda la hidratación subsecuente, y produce una distribución no uniforme de los productos de la hidratación dentro de la pasta. La razón de esto es que, a mayor grado inicial de hidratación, no hay suficiente tiempo disponible para la difusión de los productos de la hidratación fuera del grano de cemento ni para una precipitación uniforme en el espacio intersticial.

En consecuencia, una mayor concentración de los productos de la hidratación se apoya en la vecindad de los granos hidratantes, y esto retarda la hidratación subsecuente y afecta adversamente la resistencia a largo plazo.

Además, la distribución no uniforme de los productos de la hidratación, afecta adversamente la resistencia, porque la relación gel/espacio en los intersticios es menor de la que se tendrá en el caso de un grado igual de hidratación las áreas locales más débiles disminuyen la resistencia de la pasta como un conjunto.

Efectos de un clima cálido en las propiedades del concreto:

Las propiedades del concreto pueden ser afectadas adversamente por un clima cálido.

Fuerza, impermeabilidad, estabilidad dimensional y resistencia del concreto al desgaste, durabilidad y ataques químicos todos dependen de los siguientes factores:

- Selección y control apropiado de la selección de los materiales y proporcionamiento de la mezcla
- Temperatura inicial del concreto
- Velocidad del viento
- Radiación solar
- Temperatura ambiente
- Condiciones de humedad durante el período de colocación y curado
- Un concreto mezclado, colocado y curado a elevadas temperaturas normalmente alcanza mayor resistencia a temprana edad, que el concreto producido y curado a menor temperatura, pero la resistencia del concreto es generalmente menor a los 28 días y a edades posteriores
- Un curado inadecuado en combinación con la colocación del concreto a altas temperaturas empeora el proceso de hidratación y reduce la resistencia

- Otras investigaciones determinan que un curado insuficiente es más perjudicial que las altas temperaturas, y también que requiere niveles de resistencia que pueden ser mantenidos con el manejo apropiado de las mezclas de concreto que son usadas

4.4.2.1 Hormigonado en tiempo caluroso

Cuando nos acercamos a la época del año del tiempo caluroso, inevitablemente se verifica (entre otros factores) un aumento creciente de la temperatura, siendo también éste el momento en que debido a esos factores puede tornarse dificultoso el control del hormigón y desmejorar la calidad del concreto fresco o endurecido.

Entramos en la época del año en que pueden presentarse problemas, razón por la cual hay que plantearse fundamentalmente, el análisis de los distintos factores como son una disminución de la resistencia y/o agrietamiento o fisuramientos de las estructuras.

El hormigón endurece y gana resistencia debido a la reacción química que se verifica entre el cemento Portland y el agua (hidratación), reacción que se acelera a medida que aumenta la temperatura.

Con el aumento de temperatura, aumenta la velocidad de reacción. Y si el hormigón se seca prematuramente, la cantidad de agua disponible para esta reacción será insuficiente; sin agua, no hay hidratación, por lo tanto, no hay ganancia de resistencia.

Las medidas precautorias que se requieren en un día calmo y húmedo, serán menos estrictas que las requeridas en un día seco y ventoso, aún si la temperatura del aire es la misma.

Efectos del tiempo caluroso

Los efectos indeseables sobre el hormigón en estado plástico pueden incluir:

- a) Demanda creciente de agua
- b) Velocidad creciente de pérdida de asentamiento con la correspondiente tendencia a agregar agua en obra.
- c) Disminución del tiempo de fraguado, resultante en una mayor dificultad en el manipuleo, terminado y curado, aumentando la posibilidad de las uniones defectuosas entre una superficie y otra (juntas frías).
- d) Tendencia creciente al agrietamiento en estado plástico.
- e) Dificultad en el control del contenido de aire incorporado.

Los efectos indeseables sobre el hormigón en el estado endurecido pueden incluir:

- a) Disminución de resistencia debido a la mayor demanda de agua.
- b) Tendencia creciente a la contracción por secado y agrietamiento térmico diferencial.
- c) Disminución de la durabilidad.
- d) Uniformidad decreciente de la apariencia superficial.

4.4.3 Calor de hidratación del cemento

Como muchas reacciones químicas, la hidratación de los compuestos del cemento es exotérmica, y la cantidad de calor por gramo de cemento no hidratado, desarrollada hasta una hidratación total a una temperatura dada, se define como calor de hidratación.

La hidratación de compuestos del cemento puede liberar hasta 500 *joules* por gramo (120 calorías por gramo). Puesto que la conductividad del concreto es relativamente baja, actúa como aislante, y en el interior de una masa grande de concreto, la hidratación puede producir un fuerte aumento en temperatura. Al mismo tiempo, la masa exterior del concreto pierde algo de calor, de modo que se produce un fuerte gradiente de temperatura y, durante el enfriamiento posterior del interior, pueden producirse graves agrietamientos. Sin embargo, este comportamiento se modifica por la fluencia del concreto.

Para el promedio usual de cementos Pórtland, aproximadamente la mitad del calor total se libera entre uno y tres días, alrededor de tres cuartas partes en siete días y casi el 90% en seis meses. El calor de hidratación depende de la composición química del cemento, y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los componentes individuales puros, cuando sus proporciones respectivas en la masa se hidratan por separado.

Los dos principales encargados de la resistencia del cemento hidratado son el C3A y C3S, y hay una regla que establece que el C3S contribuye más al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas, mientras que el C2S influye en el incremento posterior de la resistencia.

Tabla IV Calor de hidratación de los compuestos puros

Compuesto	Calor de hidratación	
	J/g	Cal/g
C3S	502	120
C2S	260	62
C3A	867	207
C4AF	417	100

Fuente: Jassit Neftalí Alvarado Rodríguez. Características del concreto. Tema 3.

Para efectos prácticos no importa necesariamente el calor total de hidratación sino la velocidad de desarrollo del calor. La misma cantidad total de calor producida en un período mayor puede disiparse en mayor grado, con menor aumento consecuente de la temperatura.

Puesto que durante las primeras etapas de la hidratación los diferentes compuestos se hidratan a distintas velocidades, la velocidad de desarrollo del calor al igual que el calor total, dependen de la mezcla de compuestos del cemento. De aquí se deduce que reduciendo las proporciones de los compuestos que se hidratan más rápidamente C3A y C3S, el calor de hidratación del cemento se reducirá.

La finura del cemento afecta el índice de incremento de calor, pero no la cantidad total de calor liberada, que puede ser controlada por la cantidad de cemento en la mezcla del concreto.

4.4.4 Efectos del clima y de la temperatura en la trabajabilidad

Los efectos de aire de temperatura alta, radiación solar y baja humedad relativa más pronunciada con incrementos de la velocidad del viento. Los problemas con el concreto por bajas temperaturas pueden ocurrir en cualquier época del año en clima cálido, tropical o árido.

El temprano agrietamiento debido a contracción térmica generalmente es más severo cuando la diferencia de temperatura por cada período de 24 horas sea mayor. Las medidas de precaución requeridas van a ser más estrictas en los días con viento o soleados que en días húmedos o con poco viento, incluso si la temperatura es idéntica.

Problemas potenciales en clima cálido

Entre los problemas potenciales en mezclas frescas de concreto se pueden incluir:

- Aumento en la demanda de agua
- Aumenta la velocidad en la pérdida de revenimiento correspondiente a la tendencia de agregar agua al sitio de trabajo
- Aumenta la velocidad de fraguado, dificultando el manejo, compactación, acabado y provocando un alto riesgo del apareamiento de juntas frías.
- Aumenta la probabilidad del agrietamiento por contracción plástica
- La dificultad aumenta en controlar el contenido de humedad

Deficiencias potenciales del concreto en estados más duros se pueden incluir:

- Disminución a los 28 días y luego fortalezas que resultan para incluso más altas demandas de agua, altas temperaturas del concreto o ambos durante el tiempo de colocación o en los primeros días

- Aumenta la tendencia de contracción por secado y de agrietamiento por diferencial térmica incluso por enfriamiento total de la estructura, o por diferencia de temperatura dentro de la sección transversal del miembro
- Disminuye la durabilidad como resultado del agrietamiento
- Aparición de gran variedad de superficies, como juntas frías o diferentes colores, debido a la diferencia en la velocidad de hidratación
- Mayor probabilidad de entrada de soluciones corrosivas, aumentando potencialmente la corrosión del acero de refuerzo
- Aumento de permeabilidad como resultado de altos contenidos de agua, curado inadecuado, carbonatación, agregados livianos o proporciones inadecuadas de agregados

5. PREVENCIÓN DEL APARECIMIENTO DE GRIETAS EN EL CONCRETO REFORZADO

5.1 Factores a considerar para minimizar y evitar el agrietamiento

5.1.1 Control de agrietamiento

Las dos causas básicas por las que se producen grietas en el concreto son: 1) esfuerzos debidos a cargas aplicadas y 2) esfuerzos debidos a contracción por secado o cambios de temperatura en condiciones de restricción.

La contracción por secado es una propiedad inherente e inevitable del concreto, por lo que se utiliza acero de refuerzo colocado en una posición adecuada para reducir el ancho de la grieta, o bien juntas que predeterminen y controlen la ubicación de las grietas.

Los esfuerzos provocados por las fluctuaciones de temperatura pueden causar agrietamientos, especialmente en edades tempranas.

Las grietas por contracción del concreto ocurren debido a restricciones que pueden ser provocadas por diversas causas. Si no existe una causa que impida en movimiento del concreto ocurren contracciones, el concreto no se agrieta. La contracción por secado siempre es mayor cerca de la superficie del concreto; las porciones húmedas interiores restringen al concreto en las cercanías de la superficie con lo que se pueden producir agrietamientos. Otras causas de restricción son el acero de refuerzo embebido en el concreto, las partes de una estructura interconectadas entre sí, y la fricción de la sub-rasante sobre la cual va colocado el concreto.

Las juntas son el método más efectivo para controlar agrietamientos. Si una extensión considerable de concreto (una pared, losa o pavimento) no contiene juntas convenientemente espaciadas que alivien la contracción por secado y por temperatura, el concreto se agrietará de manera aleatoria.

Las juntas de control se ranuran, se forman o se aserran en banquetas, calzadas, pavimentos, pisos y muros de modo que las grietas ocurran en esas juntas y no aleatoriamente. Las juntas de control permiten movimientos en el plano de una losa o de un muro.

Las juntas de separación aíslan a una losa de otros elementos de otra estructura y le permiten tanto movimientos horizontales como verticales. Se colocan en las uniones de pisos con muros, columnas, bases y otros puntos donde pudieran ocurrir restricciones. Se desarrollan en todo el espesor de la losa.

Las juntas de construcción se colocan en los lugares donde ha concluido la jornada de trabajo; separan áreas de concreto colocado en distintos momentos. En las losas para pavimentos, las juntas de construcción comúnmente se alinean con las juntas de control o de separación, y funcionan también como estas últimas.

Los métodos para controlar el agrietamiento incluyen:

Uso apropiado de juntas, aumento del acero de refuerzo, reducir contenido de cemento, límite en la temperatura del concreto, bajo calor de hidratación del cemento, apropiada selección y dosificación de la mezcla⁵.

Para reducir o evitar los problemas del concreto por climas cálidos:

- Seleccionar de los materiales y proporciones adecuadas de acuerdo a experiencias en condición de calor
- Uso de un concreto con consistencia que permita la colocación rápida y consolidación efectiva
- Minimizar el tiempo para transportar, colocar, consolidar y hacer el acabado del concreto

- Planear el trabajo a manera de evitar la exposición adversa del concreto al ambiente
- Realizar el trabajo durante el día o la noche cuando las condiciones del clima sean favorables
- Proteger el concreto de pérdidas de humedad durante la colocación y curado del mismo

5.1.2 Armadura para refuerzos por temperatura y de contracción

Un refuerzo colocado en forma correcta y en cantidades adecuadas, no sólo reducirá la cantidad de agrietamiento, sino que evitará agrietamientos desagradables. Al distribuir las deformaciones de contracción a lo largo del refuerzo, el cual pasa a través de los esfuerzos de adherencia, las grietas se distribuyen de tal manera que aparecerá un mayor número de grietas, pero serán más finas en lugar de algunas grietas anchas.

En el Reglamento de construcciones de concreto reforzado ACI 318-77⁶ se indica la cantidad mínima y el espaciamiento del refuerzo que deben usarse en pisos, losas y muros de concreto, debido a que el congestionamiento de acero en una cara, hace que el concreto no fluya correctamente quedando vacíos.

Como ya se indicó, en el concreto se produce una contracción cuando la pasta de cemento endurece, es aconsejable reducir al mínimo esta concentración utilizando concretos con los contenidos mínimos de agua y cemento compatibles con los requerimientos de la mezcla tal como la resistencia y la trabajabilidad, mediante un completo curado húmedo de duración suficiente. Sin embargo, sean cuales fueren las precauciones que se tomen, usualmente es inevitable la contracción.

Usualmente, los elementos están unidos rígidamente a otras partes de la estructura y no pueden contraerse libremente, lo que da lugar a tensiones que se conocen como tensiones de retracción o contracción.

Como el concreto tiene poca resistencia a la tracción, es probable que estas tensiones térmicas de contracción produzcan agrietamientos, por estas razones es necesario el uso de acero dentro de la estructura para soportar las fuerzas de tensión que se produzcan. Las grietas de esta naturaleza no son perjudiciales, siempre que su tamaño se limite a las llamadas grietas capilares. Cuando el concreto tiende a contraerse las armaduras resisten esfuerzos que se producen, y por consiguiente, quedan sometidas a una compresión y distribuyen las grietas uniformemente.

Las grietas que se produzcan serán de menor anchura y estarán mejor distribuidas por efecto de la armadura.

5.1.3 Diseño de mezclas

Para minimizar el agrietamiento debido a la mezcla, es recomendable utilizar el mayor contenido posible de agregado, con el máximo tamaño; asimismo utilizar agregado fino que esté libre de arcilla y limpio.

La relación agua/cemento es un factor muy importante, como ya se mencionó anteriormente. A mayor cantidad de agua, mayor contracción por secado; a mayor contenido de cemento, mayor contracción química. Es recomendable, entonces, ponderar cuidadosamente estos dos elementos.

Para obtener la menor contracción, el proporcionamiento de la mezcla deberá incluir los factores que contribuyen al mínimo el contenido de agua. Esto es:

1. El tamaño práctico máximo del agregado.
2. El menor contenido práctico de arena.
3. El menor revenimiento práctico.

4. La temperatura más baja práctica.

5. Menos de la mitad de la cantidad de la curva de granulometría suave, núm. 4 de 3/8 o 3/4 (4.75 mm, de 9.5 o 19 mm), en especial si se trata de material triturado.

En climas cálidos, hay varias medidas correctivas que pueden tomarse en cuenta. En principio, el contenido de cemento debe mantenerse tan bajo como sea posible; a fin de que el calor de hidratación no agrave indebidamente los efectos de la alta temperatura ambiente. La temperatura del concreto fresco puede bajarse al enfriar previamente uno o varios ingredientes de la mezcla. Por ejemplo, puede usarse hielo en vez de una parte de agua de la mezcla, pero es esencial que el hielo se halla derretido completamente antes de que el mezclado se complete.

Actualmente se usan mezclas diseñadas, más que mezclas prescritas, para cuyas especificaciones existen valores límites con respecto de un rango de propiedades que deben cumplirse; estas son usualmente la relación máxima de agua/cemento, el contenido mínimo de cemento, la resistencia mínima, la manejabilidad mínima, el tamaño máximo del agregado y el contenido de aire dentro de los límites especificados.

La relación agua/cemento requerida para producir una resistencia compresiva media dada se determina mejor a partir de relaciones establecidas previamente para mezclas hechas de ingredientes similares o mediante pruebas en las que se emplean mezclas de ensayo elaborados con los ingredientes reales que se van a usar en la construcción, incluidos los aditivos.

Algunas mezclas afectan el agrietamiento, porque sus efectos sobre factores contribuyentes a éste, en proporción del endurecimiento, el cambio volumétrico y la trabajabilidad, le son adversos; puede decirse que las propiedades del concreto se estudian con la finalidad de determinar el diseño de la mezcla.

Las propiedades requeridas del concreto endurecido quedan especificadas por el proyectista de la estructura, y las propiedades del concreto fresco se rigen por el tipo de construcción y por las técnicas de colocación y transporte. Estos dos grupos de requisitos facultan al ingeniero para determinar la composición de la mezcla.

El diseño de la mezcla puede definirse por lo tanto, como el proceso de seleccionar los ingredientes adecuados para el concreto y determinar sus cantidades relativas, con el objeto de producir, tan económicamente como sea posible.

Costo

Se tienen que tomar en cuenta los factores económicos y técnicos, así como los procedimientos para estimar las cantidades de la mezcla.

El costo de la elaboración del concreto, como en cualquier tipo de construcción está constituido por los costos de materiales, planta y mano de obra. La variación en el costo de los materiales se debe a que el cemento es varias veces más caro que el agregado, debido que un objetivo del diseño de mezclas consiste en reducir en lo posible la proporción de cemento.

El exagerar la riqueza de la mezcla no es deseable, aún sin tomar en cuenta el costo, debido a que estas pueden provocar contracción y agrietamiento.

Al estimar el costo del concreto resulta imprescindible considerar también la variabilidad de la resistencia, porque el proyectista estipula un valor mínimo de la resistencia para la estructura, el cual funciona como criterio de aceptación del concreto.

El costo de mano de obra está influido por la trabajabilidad de la mezcla. Una trabajabilidad insuficiente para los medios existentes de compactación, resulta en un alto costo de mano de obra.

Si se cumplen los requisitos de resistencia, proporciones de mezcla, forma y granulometría del agregado, no se deja lugar a las consideraciones económicas en el diseño.

Es natural, que hoy en día se dan valores límites, pero a menudo sirven como guía sobre las tradicionales mezclas. Los valores límite pueden abarcar una gama de propiedades; las más usuales son:

1. La resistencia a la compresión mínima necesaria por consideraciones estructurales.
2. Máxima relación agua/cemento y/o contenido mínimo de cemento, y en ciertos climas, contenido mínimo de aire para obtener una durabilidad adecuada.
3. Máximo contenido de cemento para evitar el agrietamiento debido al ciclo de temperatura en concreto masivo.
4. Máximo contenido de cemento para evitar agrietamientos por contracción bajo condiciones de exposición a muy baja humedad.
5. Densidad mínima para presas de gravedad y estructuras similares.

Factores que intervienen en la selección de las proporciones de la mezcla

Resistencia:

Esta es una de las propiedades más importantes del concreto, tanto por sí misma como por su influencia sobre otras propiedades deseables del concreto endurecido.

Básicamente, la resistencia media a la compresión requerida a una edad especificada, generalmente a los 28 días, determina la relación nominal agua/cemento. Los concretos con cementos modernos tienden a tener mayor resistencia que la indicada. Sin embargo, si se va a usar en la totalidad de la obra un lote de cemento es posible sacar ventaja de la resistencia de un cemento dado y usar una relación experimental de resistencia a proporción agua/cemento.

Deberá conocerse el tipo de cemento, puesto que es variable la rapidez de fraguado de cementos de diferentes tipos.

Relación entre la resistencia media y la mínima:

El diseño estructural está basado en la suposición de una resistencia mínima del concreto, pero la resistencia del concreto producido, ya sea en la obra o en el laboratorio, es una cantidad variable. En el diseño de una mezcla de concreto se debe tener como objetivo una resistencia media mayor que la mínima establecida.

La relación agua/cemento requerida para producir una resistencia compresiva media dada, se determina mejor a partir de relaciones establecidas previamente para mezclas hechas de ingredientes similares o mediante pruebas en las que se emplean mezclas de ensayo elaborados con los ingredientes reales que se van a usar en la construcción, incluidos los aditivos.

5.1.4 Vibrado y forma de aplicación del concreto

El vibrador consiste en un atizador que contiene una varilla excéntrica manejada a través de una guía flexible desde un motor. El atizador se sumerge en el concreto y así aplica fuerzas aproximadamente armónicas; de aquí los nombres de vibrador, de atizador, de inmersión.

Por lo general, la frecuencia de la vibración varía entre 70 y 200 Hz, el atizador debe moverse fácilmente de un lado a otro, de modo que el concreto se pueda hacer vibrar cada 0.5 a 1 m (2 a 3ft) de 5 seg a 2 min, dependiendo de la consistencia de la mezcla. La compactación puede juzgarse por la apariencia de la superficie del concreto, que no debe formar panal ni contener exceso de mortero. Se recomienda el retiro gradual del atizador a aproximadamente 80mm por segundo, para que el agujero dejado por éste cierre sólo, sin atrapar aire.

5.1.4.1 Compactación del hormigón después de colocado

Es la operación que -bien ejecutada-, hace llegar el hormigón a su máxima compactación, llenando perfectamente los encofrados y cubriendo totalmente las armaduras de refuerzo.

Las mezclas duras y plásticas (aproximadamente 5 y 10 cm. de asentamiento en el Cono de Abrams) deben compactarse con vibradores internos, de encofrado o de mesa. Las mezclas blandas y fluidas (aproximadamente 15 cm. y más de asentamiento en el Cono de Abrams) se compactan normalmente con varilla, pisón o muy cuidadosamente con vibración.

Para que los vibradores sean efectivos, la frecuencia de vibración será de por lo menos 6000 ciclos por minuto.

La vibración debe hacerse sumergiendo la aguja rápida y profundamente en dirección vertical hasta el fondo del concreto fresco depositado y en la capa inferior si aún está o puede volverse plástica; y luego retirándola lentamente y con velocidad constante, de este modo se obtendrá un concreto monolítico y se evitará un plano débil en la unión de dos capas, posibles grietas de asentamiento y efectos de exudación. Durante la vibración, debe evitarse todo movimiento de corrimiento transversal o inclinación de la vela fuera de la vertical. Los puntos de aplicación no deben estar separados más de 50 cm. entre sí y su efecto puede apreciarse visualmente al aparecer toda la superficie vibrada con una humectación brillante. Es preferible vibrar más puntos en menos tiempo, que menos puntos en más tiempo. La vibración en cada punto debe demandar no más de un minuto a un minuto y medio, lo que depende del espesor a vibrar. Cuando el hormigonado se realice por secciones, el vibrador debe penetrar ligeramente (3 a 5 cm.) en la capa inferior.

5.1.4.2 Efectos de vibrado

Una plena compactación es esencial para expeler todo el aire atrapado, para consolidar el concreto, reducir el riesgo de agrietamiento por contracción o asentamiento, así como para asegurar una buena liga tanto entre las capas de concreto colocado, como con el acero de refuerzo, con el resultado de un elemento homogéneo. Un vibrado inadecuado resultará en un incremento del número y tamaño de los huecos y por consiguiente, en un notable incremento de la permeabilidad, con las consecuencias que se han discutido anteriormente.

Un apisonado excesivo del concreto hace refluir a la superficie mucha agua y árido fino, dando lugar a una capa blanda de material.

5.1.4.3 Consolidación

La vibración pone en movimiento a las partículas en el concreto recién mezclado, reduciendo la fricción entre ellas y dándole a la mezcla las cualidades móviles de un fluido denso. La acción vibratoria permite el uso de la mezcla dura que contenga una mayor proporción de agregado grueso y una menor proporción de agregado fino. Empleando un agregado bien graduado, entre mayor sea el tamaño máximo del agregado en el concreto, habrá que llenar de pasta un menor volumen y existirá una menor área superficial de agregado por cubrir con pasta, teniendo como consecuencia que una cantidad menor de agua y de cemento es necesaria. con una consolidación adecuada de las mezclas más duras y ásperas pueden ser empleadas; lo que tiene como resultado una mayor calidad y economía.

Si una mezcla de concreto es lo suficientemente trabajable para ser consolidada de manera adecuada por varillado manual, puede que no exista ninguna ventaja en vibrarla. De hecho, tales mezclas se pueden segregar al vibrarlas. Sólo al emplear mezclas más duras y ásperas se adquieren todos los beneficios de un vibrado.

El vibrado mecánico tiene muchas ventajas. Los vibradores de alta frecuencia posibilitan la colocación económica de mezclas que no son fáciles de consolidar a mano bajo ciertas condiciones.

El mezclado genera calor, de manera que se tiene que tener el vibrado a las mínimas revoluciones.

5.1.4.4 Forma de aplicación del concreto

Cuando se coloca hormigón en moldes, deben enfriarse las armaduras y encofrados, rociándolos con agua. Debe efectuarse el hormigonado durante las horas de menor temperatura. Programar las operaciones durante las horas más frescas.

Los efectos de la pérdida de asentamiento pueden ser minimizados acelerando las operaciones. Es aconsejable instalar pantallas protectoras contra el viento para disminuir la velocidad del aire.^{7, 8}

Debe colocarse el hormigón en capas de poco espesor, para asegurar que las capas previas todavía responderán al vibrado, evitando por lo tanto las uniones discontinuas.

Colocación del hormigón en los encofrados

Como se dijo anteriormente, un buen proceso de colocación es el que tiende al llenado completo de los encofrados, en especial en las esquinas, sin alterar la uniformidad del hormigón y con un perfecto recubrimiento de las armaduras de refuerzo (sin vacíos ni segregaciones).

Para ello, deberá cumplir con los requisitos indicados en el capítulo 2, inciso 4, Forma de Colocación. Llenando por completo los encofrados con un buen procedimiento de compactación para evitar la formación de oquedades ocupadas por macro-burbujas de aire o bolsones de agua segregados de la mezcla.

Descarga del hormigón elaborado

Toda demora en la descarga del hormigón elaborado una vez salido de la planta de elaboración, terminado su mezclado y completado el viaje hasta la obra, puede afectar la resistencia a compresión y otras características importantes del material, en especial la consistencia. A medida que transcurre el tiempo entre la salida de planta de la moto-hormigonera y la terminación de la descarga en obra, va produciéndose una disminución del asentamiento en el Cono de Abrams, hasta el punto de dificultar la manipulación normal del material, lo que obliga a agregarle agua para poder manejarlo. Y esto significa elevar el valor de la relación agua/cemento y con ello disminuir la resistencia del hormigón.

Por estas razones, la Norma IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales) 1666 de Hormigón Elaborado⁹, especifica que la descarga del hormigón debe estar terminada dentro de los 90 minutos, a contar desde la salida de la moto-hormigonera de la planta de carga (para condiciones atmosféricas normales con 25° C como máximo y sin aditivos retardadores). Dentro de ese tiempo, la obra dispone de 30 minutos para efectuar la descarga.

Si la temperatura ambiente fuera mayor, la misma Norma autoriza con temperatura ambiente hasta 32° C, pero tomando precauciones especiales (uso de aditivos retardadores de fraguado, enfriamiento de los agregados y del agua, etc.)

5.1.5 Curado

Si el concreto fresco se seca rápidamente en los encofrados, dentro de un lapso de pocos minutos después de su colocación, la superficie alcanza cierta rigidez inicial pero no se puede adaptar a los rápidos cambios de volumen del desplazamiento por contracción plástica. El desarrollo de resistencia, especialmente la resistencia a la tensión no es suficiente para soportar la fuerza de tensión y en consecuencia se pueden presentar grietas de contracción plástica, como ya se trató anteriormente. Para minimizar el agrietamiento, se debe disponer de las condiciones adecuadas para proteger rápidamente del secado las superficies expuestas. La aplicación rápida de compuestos curadores es el método más práctico para curar áreas extensas de placas y/o losas. En climas cálidos se deben tomar precauciones como son las de usar barreras para el viento y cubiertas para dar sombra.

Protección y curado después de la terminación

Tienen por objeto mantener el hormigón con la temperatura y humedad que resulten indispensables para el proceso químico de hidratación del cemento.

Hay distintos sistemas de protección -que se emplean en especial en días calurosos y ventosos-, para que no se seque velozmente la superficie del hormigón.

Los más comunes son el uso de láminas de polietileno con las que se tapa o se envuelve el hormigón lo más herméticamente posible; o también la formación de membranas plásticas de curado, especie de pintura plástica que se aplica con sopletes especiales.

El curado se hace directamente con agua, primero en forma de neblina para no dañar la superficie del hormigón, luego por rociado fino y después puede llegarse inclusive a la inundación, si el formato de la estructura y las condiciones de obra lo permiten. También se recurre a la formación de las membranas de curado siguiendo las indicaciones de los fabricantes.

Lo más importante del curado es que debe ser continuo, y abarcar desde pocas horas después del hormigonado hasta un número de días que depende de las condiciones atmosféricas. Para cemento Portland normal y temperaturas normales (16 a 25° C) el curado debe prolongarse durante 7 días como mínimo.

El curado inadecuado o la falta total de curado, incrementan el riesgo de fisuración plástica por contracción de fraguado y lo que es más grave, puede perderse hasta un 50% de la resistencia a compresión a 28 días, con relación a la que tendría el mismo hormigón con un curado correcto

La protección y el curado deberán asegurar la presencia de humedad adecuada, para soportar la hidratación y el desarrollo de resistencia en la superficie del concreto. Deberá evitarse el secado rápido de las superficies al terminar el período de curado especificado. Si se permite que el concreto se ajuste y se contraiga gradual y lentamente, se minimizarán los agrietamientos.

6. ANÁLISIS DEL AGRIETAMIENTO EN EL CANAL DE ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II

6.1 Descripción general y detallada del Canal de Aducción

Breve descripción del Canal de Aducción

El Proyecto Hidroeléctrico Palín II, como se mencionó en el capítulo 1 **Descripción General del Proyecto Hidroeléctrico Palín II**, que está compuesto por estructuras que permitirán el buen funcionamiento de la futura planta. A continuación se hará una breve descripción de los componentes del Proyecto.

En operación normal la Hidroeléctrica Palín II está supeditada al régimen hidráulico de la Planta Hidroeléctrica Jurún Marinalá. El sistema del Proyecto lo componen:

La presa derivadora que actuará como un embalse regulador de agua (Río Michatoya), para esto en la margen derecha consta con una compuerta 1) tipo abatible hidráulica automática de 10.00 x 2.55 metros, donde se ubica el vertedor tipo cimacio, también tiene dos compuertas de fondo, la compuerta 2) tipo guillotina de 2.90 x 2.70 metros y la compuerta 3) sector de 2.90 x 4.00 metros equipada por una compuerta 3A) abatible de 2.00 x 1.25 metros que servirá para evacuar el caudal excedente.

En condiciones normales el agua se desvía a la bocatoma; se consideró necesario remodelar la bocatoma de la Planta Palín I, con el objeto de darle capacidad para aceptar un caudal de 7 m³/seg. El diseño debe permitir una limpieza previa de sedimentos, antes de entrar a las obras de aducción y para tal efecto, debe preverse una cámara de limpieza de manera que los azolves vuelvan al río aguas abajo del dique.

La bocatoma se localiza sobre la margen izquierda y estará equipada con una reja gruesa y una cortina de 50 a 70 cm. bajo el nivel mínimo de operación; el Canal de Bocatoma tiene una longitud de 8.00 metros y 2.50 metros de altura, que se va reduciendo gradualmente en curva y con pendiente negativa hasta empalmar con el canal de aducción de 4.00 metros de ancho por 2.50 metros de profundidad en promedio. La abertura de entrada está equipada con una viga flotante y con una reja gruesa de barras de acero verticales de 1" colocadas a 0.40 m c/u. El diseño de la viga flotante está enfocada a retener la mayor cantidad de material flotante que será eliminada al abrirse el tablero abatible de limpieza de la superficie (compuerta 3A).

El Canal de Aducción se desarrolla con una pendiente del 4% hasta llegar al canal de limpieza de la compuerta tipo sector; dicho canal estará regulado por compuerta guillotina de 0.90 x 0.90 metros.

La función principal del Canal de Aducción es la de conducir el agua proveniente del Río Michatoya hacia las demás obras de aducción. El muro de retención del canal debe de funcionar con una pared guía hasta una elevación de 1098.00 msnm. para dar paso al caudal a través de la descarga de fondo. Consta también con una compuerta tipo sector de 4.00 x 2.55 metros y una reja con rastrillo de limpieza en el inicio del tramo C, la cual tiene un canal de descarga con una compuerta tipo guillotina de 0.90 x 0.90 metros.

El canal encauza el agua hacia el desarenador que como su nombre lo dice tiene como fin despojar al agua de la mayor cantidad de arena y sedimentos que esta pueda arrastrar, lo que es necesario para evitar el deterioro tanto de la tubería de presión como de las turbinas; para esto el desarenador consta de rejas metálicas gruesas en el inicio de este para hacer que el agua disminuya su velocidad en esta estructura, para después abrir las compuertas bieri que se localizan en el fondo del mismo, las cuales se programan para abrir automáticamente cuando se requiera limpiar el desarenador, después el agua entra a la tubería de presión que la conducirá aproximadamente unos 1,300 metros hasta llegar a la casa de máquinas donde se encuentran dos turbinas tipo Francis de eje horizontal; estas turbinas son capaces de generar 2,500 Kw cada una.

6.2 Situación inicial del Canal de Aducción

El canal es una estructura de forma monolítica de gran duración, resistente a los terremotos, al fuego, insectos y roedores.

El proceso constructivo, puede describirse como sigue:

Se comenzó con el trabajo de topografía del canal, determinando las cotas en el terreno y posteriormente la delimitación de cada estructura para continuar con el movimiento de tierras y luego la nivelación del área donde se ubicará el canal.

Trabajos de excavación en el área del canal que conectará la bocatoma con el desarenador.

Se compactó el área del canal de bocatoma con vibrocompactadora.

Se realizó un estudio de suelos para determinar densidad y proctor en el canal, este fue realizado por el laboratorista, del Laboratorio de Suelos y Pavimentos L.S.P; para este estudio se tomaron dos muestras alteradas. El resultado de estas pruebas:

- Tipo de suelo Arcilla limo arenosa con fragmento de roca café.
- Peso unitario que debe soportar proveniente de la estructura y del peso del agua es entre 3.8 ton/m² (800 libras por pie cuadrado) y 4.9 ton/m² (1000 libras por pie cuadrado). Carga que estructuralmente es muy baja.

Relleno con concreto ciclópeo del túnel de la antigua Planta Hidroeléctrica Palín I para evitar hundimientos, debido a que el canal de aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II se ubicó sobre el mismo, este túnel conducía el agua hacia un canal, posteriormente a la tubería forzada para llegar a las turbinas que se encontraban en la antigua casa de máquinas.

Se le aplicó una torta de 0.05 metros de concreto pobre como una base de protección y nivelación del mismo.

Se colocó acero de refuerzo de los cimientos como se puede ver en la figura 5 y se fundieron éstos en tres secciones. Las especificaciones de diseño se detallan más adelante.

Figura 5. Colocación del Acero de Refuerzo del Canal de Aducción



Se vertió el concreto en los moldes de madera a una altura no mayor de 1 metro de altura del lugar donde se necesitaba colocar, se utilizó concreto con una resistencia de 4000 PSI de la empresa Pronto Mix desde la planta ubicada en Amatitlán, la forma de colocación a través de equipo de bombeo, en trabajo diurno normalmente.

Datos de la fundición del Canal de Aducción

El canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II, está compuesto por cuatro sectores, el sector “A” lo constituye la vuelta de entrada del agua al canal, el sector “B”, es el tramo recto del mismo, el sector “C”, es el tramo donde se colocará la Compuerta tipo sector hidráulica automática de 2.90m x 4.00m, que se utilizará en caso que se necesite detener el flujo de agua hacia el desarenador y tubería de Presión para limpieza de estas obras de conducción del agua o en caso de emergencia y el sector “D” es el tramo final del canal y el inicio del desarenador.

El proceso de fundición de cada sector del canal se realizó en tres etapas de aproximadamente un metro, para la unión entre el concreto endurecido y el concreto fresco se utilizó un adhesivo.

En los muros de los diferentes sectores del canal ya fundidos aparecieron grietas verticales, pero el sector "B", el cual tiene una longitud de 21.26m., fue donde se encontraron la mayoría de estas, a continuación se detallarán las etapas de fundición del mismo.

- Primer etapa: la fundición se ejecutó el 10 de julio del 2001, en la cual se fundieron 34.02m³ con concreto de 4000 PSI. En esta etapa se fundió toda la longitud del sector B de la losa del canal de sección 4.50 x 0.30 metros así como una sección de 0.25 x 0.50 m. de las paredes de ambos lados del canal.
- Segunda etapa: se realizó el 27 de julio del 2001, se fundieron 10.63 m³, con concreto de 4000 PSI. En esta etapa se fundió un metro lineal de paredes en continuación de la primer etapa, en este segundo tramo del sector B aparecieron dos grietas verticales una en cada muro, estas grietas se encuentran en la parte central del canal.
- Tercera etapa: se realizó el 20 de agosto del 2001, se fundieron 10.63 m³, con concreto de 4000 PSI. Se fundieron con un slump entre 4 ½" a 4 ¾" en el tramo se encontraron 24 grietas verticales, más adelante se ampliará esta información.

Datos adicionales de la tercer etapa de fundición correspondiente a las paredes del canal de aducción donde se encontraron las grietas verticales. El contratista requirió de la empresa Pronto mix, un asentamiento mínimo de 4".

El despacho de camiones y los resultados de las pruebas de revenimiento de la empresa que suministró el concreto a la obra fue de la siguiente manera:

Tabla V. Control del despacho de camiones a la obra

Camión No. 1	Hora de entrada del camión 9:45 horas, con 7.5 m³. La primer prueba presentó un asentamiento de 4 3/8"; la temperatura del concreto tomada en ese momento fue de 33.3°C. En la segunda prueba se obtuvo 4" de asentamiento.
Camión No. 2	Hora de entrada del camión 11:00 horas, con 7.5 m³. El asentamiento en este caso fue de 2 3/4", el cual fue rechazado por no cumplir con las especificaciones pedidas por el contratista a la empresa suministradora del concreto.
Camión No. 3	Hora de entrada del camión 12:40 horas, con 7.5 m³. La prueba de asentamiento fue de 4 3/4".
Camión No. 4	Hora de entrada del camión 14:16 horas, con 7.5 m³. La prueba de asentamiento fue de 4 3/4".
Camión No. 5	Hora de entrada del camión 15:11 horas, con 7.5 m³. La prueba de asentamiento fue de 4 1/2".
Camión No. 6	Hora de entrada del camión 16:15 horas, con 7.5 m³. La prueba de asentamiento fue de 4 3/4". Temperatura del concreto al inicio fue de 34°C.

El formaleta de los muros del canal se quitó a las 72 horas de la fundición (23 de agosto del 2001) y se inició inmediatamente el proceso de curado, para alcanzar la resistencia de diseño del concreto.

Para comprobar que la resistencia de los muros del canal de aducción estuviera conforme a lo especificado en el diseño, se realizó la extracción y ruptura de 3

muestras de concreto; ver anexo 2, en tales resultados podemos constatar que el esfuerzo máximo alcanzado por estos, es superior al esfuerzo requerido.

Encofrado, desencofrado Y curado

Encofrado

En los muros del canal se utilizó formaleta de madera con una cubierta de lámina en la parte interna, se utilizaron elementos de 1 metro de largo por 1 metro de alto, cada una tiene cuatro agujeros de 1 pulgada en sus cuatro extremos, con la finalidad de ajustar la formaleta interna con la externa; para fijar las formaletas se usaron pernos y tensores, estos se colocaron dentro de tubos de PVC que atravesaban el muro, como se puede observar en la figura 6. Una característica del proceso constructivo de este proyecto, consistió en el reaprovechamiento de la formaleta; esta se utilizó en las diferentes etapas de la fundición del canal.

Figura 6. Colocación de formaleta en los muros del canal



Como se observa en la foto anterior, el apuntalamiento de la formaleta se hizo de la siguiente manera: la formaleta de madera se colocó en ambos muros, estas se sostenían en la parte exterior por 3 o 4 puntales, del lado derecho se apoyaron en el suelo y los del lado izquierdo en el talud; en los muros interiores se colocaron cuatro puntales, los cuales se apoyaban en la formaleta del otro lado del muro estos mantenían unida toda la estructura.

Desencofrado

Fueron necesarias las siguientes maniobras para remover la formaleta:

- Quitar los puntales que la mantenían fija
- Quitar los pernos y tensores que atravesaban el muro

Curado

El curado de los muros se inició inmediatamente después de realizado el desencofrado, en los muros del canal, este consistió en un curado con agua el que se aplicó con manguera por espacio de 3 días de manera intermitente.

Consideraciones sobre el diseño estructural

El diseño estructural en todo el proyecto se realizó usando el Programa STAAD PRO que incluye la ejecución de un modelo estructural del canal al que se aplican las cargas y resistencias.

Los códigos de diseño utilizados fueron: 1) para cargas tanto vivas como sísmicas el *Uniform Building Code* versión 97; 2) para diseño en concreto el ACI 318-95¹⁰, utilizando concreto de 27.6 Mpa (4,000 Psi) y acero de 276 Mpa (40,000 Psi) y 3) según las cargas reportadas por el fabricante de las compuertas.

Criterios de diseño:

Carga viva 100 PSF (4788 PA)

Carga sísmica 0.3 Wp

Materiales

Concreto $f'c = 4000$ PSI (27.6 Mpa)

Acero de Refuerzo $f_y = 40000$ PSI (276 Mpa)

Todo el refuerzo longitudinal se hizo con acero No. 4 @ 0.40 m, con traslapes mínimos de 0.40 m en cada cama.

Recubrimientos mínimos:

Fondo de cimiento: 0.075 m

Losa de pasarela: 0.02 m

Todos los demás: 0.05 m

El concreto usado fue de 4000 PSI a los 28 días, cuya mezcla fue diseñada por el laboratorio de Pronto Mix, sometida a consideración por MWA al INDE, previo al uso de las mezclas se hicieron cilindros testigos con las que se tuvieron en algunos hasta 6000 PSI. El revenimiento con que se trabajo antes de aplicarle fluidificante fue de 4” llegando a 5 ó 5 1/2”.

6.3 Descripción del tipo de grietas y dimensiones

Los muros del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II, se fundieron por tramos longitudinales de aproximadamente 80 a 90 cm de altura, con concreto de 4,000 PSI, como se indicó en el inciso 6.2 de este trabajo de investigación.

Las grietas aparecieron en los muros del canal de aducción en los sectores A, B, C y D; en el sector B, es el tramo mas largo del canal y donde se observó la mayor cantidad, por lo que se estudiarán las grietas que aparecieron en este sector, específicamente en los tramos dos y tres esto se describe a continuación:

Se observaron dos tipos de grietas:

- Una grieta longitudinal en la parte superior del grosor del muro del segundo tramo de fundición, de 1mm. de espesor, esta grieta horizontal es poco continúa, teniendo una longitud promedio de 60 centímetros, corriendo con cierta inclinación en la zona del recubrimiento de concreto del lado interno.
- Se presentaron también 26 grietas verticales en los tramos dos y tres, estas grietas atravesaron la sección del muro, mismas que se describen a continuación.

Segundo tramo de fundición realizado el 26 de julio de 2001

Se observaron 2 grietas verticales de 1 mm o mas de espesor, una de ellas localizada en el muro izquierdo a 7.90 metros aguas arriba de la junta de dilatación, y la otra en el muro derecho a 8.50 metros de la misma junta; ambas grietas atraviesan de lado a lado el muro, teniendo una longitud promedio de 1.30 metros, y corriendo a lo largo de una vertical que pasa por los agujeros que dejaron los tubos separadores de PVC que se usaron para fijar la formaleta del muro como se observa en la figura 7.

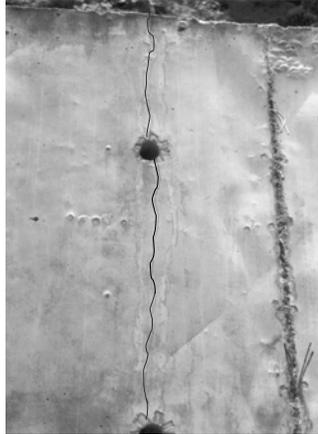
En el muro derecho se encontraron otras 2 grietas verticales de 0.50 mm o menos de espesor.

Tercer tramo de fundición realizado el 20 de agosto de 2001

Se observaron en el muro izquierdo 13 grietas verticales de 0.50 mm o menos de espesor, de las cuales 11 de ellas se encontraban uniendo los agujeros que dejaron los separadores y tensores de la formaleta como se observa en la figura 7 y las otras 3 se encuentran de 10 a 25 cm antes del final de la formaleta.

En el muro derecho se encontraron 11 grietas verticales de 0.50 mm o menos de espesor, 5 de ellas se encuentran a 10 cm desde la separación entre formaletas y las demás 6 grietas se encuentran a las siguientes longitudes: 39, 8, 7, 40, 24 y 25 cm, respectivamente.

Figura 7. Grieta que pasa por los agujeros que dejaron los separadores y tensores de la formaleta.



En resumen

En el tramo 3 de este sector “B” del canal se presentaron varias grietas verticales en ambos muros. En el muro izquierdo (cercano al talud), aparecieron 13 grietas de 0.80 metros lineales, pero especialmente uniendo dos agujeros que dejaron los separadores y tensores de la formaleta. Y en el muro derecho, se presentaron 11 grietas, de 0.80 metros lineales estas se encontraron de 7 a 40 cm de la unión entre formaletas.

En el tramo 2 se encontraron 4 grietas verticales 2 de 1.30 metros lineales una en el muro derecho y la otra en el muro izquierdo y las últimas 2 de 0.90 metros lineales en el muro derecho, esto nos da un total de 23.60 metros lineales de grietas.

Existen dos razones principales para limitar el agrietamiento de elementos de concreto reforzado: apariencia de la estructura y corrosión del acero de refuerzo. Respecto a la corrosión del refuerzo, se han hecho algunos estudios sobre la influencia del agrietamiento en relación a las condiciones ambientales, pero no se ha llegado a establecer en forma definitiva el ancho tolerable para evitar la corrosión. La corrosión

también depende de factores tales como el vibrado del concreto y la magnitud de los recubrimientos del refuerzo, más que del ancho de grietas.

El ancho de grietas no puede reducirse disminuyendo los recubrimientos, ya que éstos suelen fijarse en los reglamentos de construcción según las condiciones ambientales para tener una protección adecuada. Debe observarse que en la resistencia a la corrosión influyen no sólo las grietas de flexión, sino también las grietas longitudinales que se presentan cuando los recubrimientos son insuficientes.

Algunos investigadores y algunos reglamentos de construcción establecen límites en los anchos de grietas que son del orden de 0.1 a 0.2 mm para ambientes agresivos, y de 0.2 a 0.3 para ambientes normales.

Según el comité del Instituto de Concreto Americano 224-R-72¹¹ tienen la siguiente guía concerniente a la clasificación de las grietas:

Tabla VI. Clasificación de las grietas en el concreto

Condición de Exposición	Ancho Máximo Permisible en la Grieta
Aire seco	0.41 mm
Humedad, aire húmedo, suelo	0.30 mm
Descongelamiento de químicos	0.18 mm
Agua de mar o agua rociada	0.15 mm
Estructuras para retener agua	0.10 mm

Fuente: *American concrete institute (ACI 224-R-72). control of cracking in concrete structures.* pp. 717-753.

6.4 Características del concreto aplicado

El concreto utilizado en este Proyecto fue concreto premezclado, esto quiere decir que en lugar de prepararse y mezclarse en la obra, el concreto se trasladó para su colocación desde una planta central; en este caso suministrado por la empresa ProntoMix, ubicada en Amatitlán, ya que este procedimiento ofrece numerosas ventajas:

- a) Un mayor control de calidad, que reduce la variabilidad de las propiedades deseadas del concreto endurecido
- b) Uso en sitios donde hay poco espacio para una planta de mezclado
- c) Uso de camiones agitadores para asegurar buen cuidado durante la transportación, evitando así la separación y conservando la manejabilidad
- d) Es de conveniente cuando se requieren cantidades pequeñas de concreto o colocado intermitente

Hay dos categorías principales de concreto premezclado: mezclado en planta y mezclado en trayecto o mezclado en camión. El método utilizado fue el segundo, los materiales fueron bacheados en una planta central, pero se mezclan en el camión, durante el trayecto, este permite un acarreo más largo y tiene una menor vulnerabilidad, en caso de demora.

La velocidad de mezclado es de 4 a 16 rpm. La norma ASTM C 94-83 fija un límite de 300 revoluciones, para el mezclado, el concreto tiene que ser colocado a más tardar 1 ½ hora después de mezclado.

En el caso de mezclado en tránsito, no se necesita añadir agua hasta que esté cerca el momento de iniciar el mezclado, de acuerdo con la norma británica BS 5328:1981, el tiempo durante el cual el cemento y el agregado húmedo pueden permanecer en contacto, debe limitarse a 2 horas. Estos límites tienden a inclinarse del lado de la seguridad y excederlos, no necesariamente afecta de manera adversa la

resistencia del concreto, suponiendo que la mezcla se conservará manejable para lograr una compactación completa.

Los efectos del mezclado prolongado son los siguientes:

Puede ocasionarse la evaporación del agua de la mezcla, con la consiguiente disminución de la manejabilidad y un incremento en la resistencia. Un efecto secundario es la trituración del agregado, especialmente si es suave; la degradación se vuelve entonces más fina y la manejabilidad disminuye. El efecto de fricción produce también un incremento en la temperatura de la mezcla.

El remezclado intermitente por un máximo de entre tres y seis horas no es dañino en lo que concierne a resistencia y durabilidad, pero la manejabilidad disminuye a menos que se evite la pérdida de humedad de la mezcladora. El añadir agua para restaurar la permeabilidad reduce la resistencia e incrementa la contracción, pero el efecto depende de qué tanto contribuya el agua añadida a la relación efectiva de agua/cemento del concreto.

Los requerimientos de diseño mínimos en el Canal de Aducción para el concreto fue de 4,000 PSI, (27.6 Mpa), se utilizó un agregado de diámetro $\frac{3}{4}$ " y un revenimiento mínimo de 4", para que pudiera desplazarse en la formaleta de los muros del canal. Como podemos ver en el anexo 2, en los resultados obtenidos de dos muestras la resistencia del concreto superó los 4,000 PSI requeridos.

Tareas realizadas en la obra

- a. Se programó la frecuencia de entregas, de modo que no hubiera mucha demora en el uso del hormigón, pero debido a contratiempos por falta de coordinación por parte del contratista en la preparación de las áreas de fundición, se tuvieron atrasos de hasta una hora y media para el inicio de las fundiciones, estas demoras en la colocación del concreto en el lugar la mayoría de las veces trajo efectos de pérdida de humedad, por lo que se tuvo que utilizar en algunos casos aditivos fluidificantes debido a que se necesitaba un asentamiento mínimo especificado, para no tener problemas con el bombeo del concreto por la tubería y la colocación en la formaleta de los muros del canal.

- b. El mezclado genera calor, de manera que se detuvo el agitado o el mezclado a las mínimas revoluciones.
- c. Cuando se colocó el hormigón en moldes, se enfriaron previamente las armaduras y encofrados, rociándolos con agua.
- d. Se deben programar las operaciones durante las horas más frescas y de menor temperatura. Los efectos de la pérdida de asentamiento pueden ser minimizados acelerando las operaciones. Las fundiciones en los muros del Canal de Aducción, se programaron a partir de las 8:00 de la mañana pero se iniciaron aproximadamente a las 9:30 horas esto se realizó en tiempo caluroso, en los meses de julio y agosto.
- e. Se colocó el hormigón en capas de poco espesor, para asegurar que las capas previas todavía responderían al vibrado, evitando por lo tanto las uniones discontinuas.

6.5 Análisis y evaluación de posibles causas del agrietamiento

Se consideran varios factores que actuaron independientemente y en conjunto. Las grietas fundamentalmente se pueden catalogar como grietas de 0.50 a 1 mm, estas aparecieron en las paredes del canal las cuales atravesaron en su totalidad el espesor del muro.

Sector en estudio: Sector "B"

- ❖ En el tramo 2, se presentaron dos grietas verticales en ambos muros del canal, situadas al centro del mismo.

- ❖ En el tramo 3 del canal se presentaron varias grietas verticales en ambos muros. En el muro izquierdo (cercano al talud), se presentaron 13 grietas, especialmente uniendo los agujeros que dejaron los separadores y tensores de la formaleta. Y en el muro derecho, se presentaron 11 grietas, estas se encontraron de 10 a 15 cm de la unión entre formaletas, la causa probable de agrietamiento, actúa en conjunto con el tipo de formaleta y el apuntalamiento de la misma (como se puede observar en la figura 2), con la cual se formó un marco uniforme en toda la estructura; al aplicarle cargas laterales en la estructura a edad temprana, debidas a la tubería de bombeo del concreto y la debida al personal encargado de la colocación del concreto y de la supervisión del mismo.

- ❖ En el tramo 2, apareció una sola grieta longitudinal que vista en planta está localizada entre las varillas de refuerzo vertical y el rostro del muro, esta grieta por sus características, su posición y forma en sí hacen suponer que fue provocada por excesiva brusquedad en el retiro de las formaletas y manipuleo del acero.

El concreto tiende a expandirse debido a:

- Cambios en el contenido de humedad
- Cambios en la temperatura
- Cambios en carga mecánica

Evaluación

La grieta longitudinal no se considera típica de un refuerzo interno, es probable que se haya producido por alguna acción externa de fuerza lateral al quitar la formaleta, o por algún palanqueo contra el refuerzo después del desencofrado. Se considera que esta grieta es relativamente superficial, ya que se presentó en el ancho del muro del segundo tramo longitudinal de fundición por lo que al fundir el tercer tramo

esta grieta no traería ningún efecto secundario debido a que no queda expuesta al medio ambiente.

Las grietas verticales son típicas de esfuerzos de contracción de fraguado y temperatura. Son de tipo estático y estructuralmente no tienen importancia si tomamos en cuenta la forma de trabajo del canal. El único problema es lo concerniente a la protección del acero de refuerzo.

El agrietamiento también aparece cuando las respuestas diferenciales exceden la capacidad del concreto a resistirlas en ese momento. Con esto se enfatiza la importancia de proteger el concreto nuevo de la pérdida de humedad o del descenso de temperatura.

Otra causa probable es el uso de formaletas recubiertas de lámina; la publicación más reciente del código ACI especifica que las formaletas en clima cálido y con contacto metálico se deben retirar a la mayor brevedad, para evitar el efecto horno que acelera la deshidratación del concreto. El retiro y manejo de la formaleta debe hacerse cuidadosamente, así como la aplicación de un agente curador inmediatamente después de retirar la formaleta.

Adicionalmente a lo anterior, se pudo constatar que la temperatura del concreto en el momento de colocarse en algunos casos fue superior a los 32°C con los consecuentes efectos.

Otro factor que se originó desde el diseño de la formaleta, es el tipo y forma de embreizado que se use para lograr la rigidez en la formaleta durante la fundición. Si el embreizado no es fácil de remover se inducirán sobre la estructura esfuerzos externos derivados de los que se aplican a la formaleta para retirarla.

Observación: el diámetro de las camisas de PVC de 1 pulgada para pernos, se consideró excesivo, por lo que se cambió el diseño de la formaleta y se redujo a ½ pulgada de diámetro.

De preferencia el concreto deberá tener una alta capacidad de deformación a la falla por tensión. Este se ve afectado en gran medida por los agregados, por lo que es deseable un bajo módulo de elasticidad a la tensión.

Un muro anclado en su base a la cimentación o a elementos estructurales inferiores, menos sujetos o menos sensibles a cambios de volumen, estarán restringidos por contracción.

6.6 Situación actual del canal de aducción

Actualmente el Proyecto Palín II se encuentra en fase final de construcción; en lo que se refiere al canal de aducción, está totalmente construido, faltando únicamente reparaciones y acabado de los muros y losa, también están pendientes los trabajos relacionados con el montaje del equipo electromecánico (colocación de las compuertas y servomotores así como cableado y conexiónado).

En el Canal de Aducción, los movimientos ocurren en las grietas porque se permite que suceda, por cambios de temperatura y cargas externas, no porque les corresponda acomodarse, debido a estos movimientos se han venido ensanchando a medida que pasa el tiempo, tampoco se le dio ninguna protección contra las lluvias o el viento a esta estructura dañada; sin embargo, no hubo indicio de daño al acero de refuerzo a pesar del mal tiempo que impera en esta zona durante el invierno. A continuación se presentan 4 fotos del Canal de Aducción del Proyecto.

Figura 8. Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II



Vista externa



Vista interna



Actualmente



Relleno estructural

7. TRATAMIENTO DE GRIETAS

7.1 Mezclas o morteros para inyección de grietas

Una grieta es inyectada con tres fines principales. Antes de establecer un método de reparación y escoger un producto para proceder al llenado del plano fracturado, debemos definir cuáles problemas deseamos solucionar con la inyección. Entre ellos pueden ser:

1. Problemas estéticos
2. Filtraciones de agua, vapores o polvos volátiles
3. Recuperación de la capacidad de carga de una estructura

De acuerdo a la solución, escoger el material adecuado para la reparación; teniendo en cuenta no sólo el costo inicial, sino su vida útil.

Los materiales más usados para inyectar son:

1. Lechadas y morteros de cemento, mejorados con plastificantes, expansores y adhesivos.
2. Resinas de poliuretano expandible.
3. Resinas epóxicas con diferentes viscosidades
4. Metacrilatos modificados de alto peso molecular

Antes de proceder a efectuar cualquier tipo de inyección, debe verificarse su estado de movimiento. Si la grieta es pasiva se procede con algunos de los métodos antes descritos, de tal manera que el producto ocupa todo el plano de falla.

Si la grieta es activa y presenta un continuo movimiento, es necesario utilizar un sellante u otro tipo de material que permita a la grieta funcionar como una junta.

Inyecciones con lechada y morteros cementosos

Las lechadas y morteros cementosos, se inyectan para transmitir únicamente cargas axiales a la compresión.

Por otra parte, son empleadas como relleno estético, donde las grietas dan mal aspecto a la construcción, aunque no causen compromiso en la estabilidad de la obra.

Estas requieren tres cualidades:

1. Alta fluidez: el producto final debe ser autonivelante, con el fin de garantizar el completo llenado del espacio de la grieta.
2. Sin contracciones: no debe disminuir su volumen durante el fraguado para evitar que aparezca una fisura en el elemento reparado. Con el uso de plastificantes se reduce la cantidad de agua de amasado, con el fin de reducir las contracciones por secado, las cuales se contrarrestan adicionalmente con el uso de expansores.
3. Excelente resistencia a la compresión: cuando se trata de transmitir cargas de compresión, generalmente es elemento de soporte o de nivelación donde se prevé que habrán cargas de tensión.

Resinas de poliuretano monocomponentes

Las resinas sirven para sellar grietas finas y juntas, para controlar la filtración de agua o para sellar espacios grandes en estructuras de concreto o de concreto lanzado y para parar fugas de agua. Las resinas reaccionan con el agua para formar una espuma de celda cerrada, rígida resistente a la mayoría de los solventes orgánicos, álcalis, microorganismos y al crecimiento de hongos. La expansión deseada y la reacción con el agua pueden alterarse por la temperatura o por la cantidad de acelerador utilizado.

Inyecciones de poliuretano expandible

Las grietas de concreto o mampostería, expuestas a flujo de agua, las cuales requieren el sello de la filtración, sin exigir la reparación monolítica estructural. El poliuretano expandible flexible, cuyas cualidades garantizan un taponamiento del agua, aún en casos extremos de filtraciones.

Resinas epóxicas:

La alta adhesividad temprana y de largo plazo son sólo una de las propiedades comprobadas en el campo de los adhesivos. Para inyección de grietas, además de su desempeño, disminuye los costos de instalación gracias a sus rangos de cobertura, su trabajabilidad superior, bombeabilidad y extendibilidad con agregado.

Inyecciones con metacrilatos modificados

Las superficies horizontales de concreto, especialmente pavimentos que presentan grietas tipo líneas de pelo, son llenadas por gravedad mediante un polímero que garantiza la penetración del producto con éxito, aún en fisuras muy finas. Adicionalmente proporciona protección al acero contra la corrosión.

7.2 Uso de aditivos

Para la inyección de lechadas y morteros cementosos:

Debido a la alta relación agua/cemento de estas mezclas, se recomienda utilizar la combinación de dos aditivos: un superplastificante y un expansor. La dosificación depende del tipo de cemento y la longitud del desplazamiento de la inyección.

Los plastificantes - reductores de agua se utilizan para conseguir:

- Aumentar la consistencia para un mismo contenido de agua. Con ello se mejora la trabajabilidad y se facilita la puesta en obra sin disminuir la resistencia.

- Disminuir el contenido de agua, manteniendo la misma consistencia. Normalmente, los plastificantes permiten una reducción de agua mínima del 5%. Esto incrementa la resistencia del hormigón y mejora su durabilidad. En climas calurosos puede aumentarse su dosificación habitual para mantener durante más tiempo la trabajabilidad del hormigón.
- Se reduce el agua de amasado hasta un 30%.
- Resulta una reducción de la relación agua/cemento.

Los aditivos superplastificantes – fluidificantes

Corresponden a una nueva generación de aditivos plastificadores en base a productos melamínicos o naftalínicos, constituyendo una evolución e los aditivos reductores de agua, que en la absorción y capacidad de dispersión del cemento es mucho más acentuada.

Los efectos principales que se derivan de la incorporación de algún componente tensoactivo son, por una parte, la ionización de los filamentos del aditivo que produce la separación de los granos de cemento entre sí, conduciendo a una efectiva desfloculación y por otra parte, las moléculas de aditivo son absorbidas y se orientan en la superficie de los granos de cemento en un espesor de varias moléculas, de lo que resulta una lubricación de las partículas.

En el modo de acción de los superfluidificantes pueden considerarse tres etapas consecutivas:

1. Absorción de los polímeros por parte de las partículas de cemento en la etapa de transición sólido-líquido.
2. Carga de la superficie de los granos con fuerzas electroestáticas de repulsión por tener el mismo signo.
3. Aparición de tensiones superficiales que aumentan la distancia entre partículas.

La dosis del aditivo superplastificante depende del fabricante y fluctúan desde 0.5% a 2% del peso del cemento. Estos aumentan las resistencias como reductores de agua y como fluidificantes, aumentan la docilidad.

En general, actúan como reductores de agua o fluidificantes otorgando:

- Consistencia fluida sin disminución de resistencias
- Calidad homogénea, mínima segregación y exudación
- Disminución de retracciones y fisuración
- Facilidad de colocación y mayor rendimiento de la faena de hormigonado

Aplicaciones del aditivo superplastificante

- Hormigón bombeado
- Hormigón pretensado
- Hormigón de alta resistencia
- Hormigón de buena terminación
- Hormigón bajo agua
- Morteros y lechadas de inyección
- Hormigón para elementos esbelto, con alta densidad de armaduras

La dosis de los aditivos expansores reductores de agua es de 2 a 3 gr. Por saco de cemento. Estos producen una ligera expansión de la masa de hormigón, contrarrestando las retracciones de éste.

Aplicaciones de los aditivosexpansores

- Aplicaciones de cavidades o grietas
- Anclaje de pernos y estructuras
- *Grouting*

7.3 Métodos y procedimientos de inyección de grietas

7.3.1 Métodos de inyección

Inyección por gravedad

Este sistema es aplicable a grietas sobre superficies horizontales y de 1.5 mm. como mínimo. para mejores resultados se recomienda abrir una pequeña canal a lo largo de la grieta y después de la limpieza regar sobre éste un adhesivo epóxico de baja viscosidad, evitando la formación de cámaras de aire que impiden la penetración del producto. En caso de que la grieta penetre enteramente, se procede a sellar la grieta por la parte inferior y lateral con otro adhesivo epóxico con consistencia gelatinosa para garantizar la pega de superficies.

Inyección por presión

Cuando el tamaño de la grieta es pequeño o las reparaciones se hacen en superficies de contra presión se hace necesaria la inyección con presión de aire. Para este caso se inicia con el sellado superficial de la grieta con un adhesivo epóxico, dejando válvulas a lo largo de la grieta cada 20 a 15 cm.

Generalmente, el método de inyección dependen del tipo de equipo que se requiera; anteriormente las inyecciones de lechada y mortero se realizaban mediante dos tipos de sistemas, según la distancia que se requiera transportar la mezcla:

- Olla de presión neumática: para trayectos cortos
- Bombas de pistón o similar: para transportes largos

Un requisito fundamental era la necesidad de mantener la homogeneidad de la mezcla, por lo cual el equipo debía ser complementado con agitadores los cuales debían funcionar permanentemente. De no hacerse así, cambiaba la consistencia del producto inyectado, colocando producto con más agua o más arena en caso que lo requiera, en la misma grieta. Las paletas de los agitadores van montadas en un eje generalmente horizontal para las bombas de pistón, o vertical para las ollas neumáticas.

Actualmente, se cuenta con equipo que es fácil de transportar, en donde los componentes de la resina a inyectar se mezclan al momento de la inyección, por esta razón no se toma en cuenta la distancia que se tenga que recorrer. Se utilizan compresores con pistolas de presión, tanque de presión, mangueras y boquillas de salida con control neumático, pistolas de presión manual con cuerpo hermético donde se introduce un cartucho con el producto ya mezclado.

Existen varios métodos para inyectar:

- Inyectores de baja presión, colocado directamente sobre la grieta y sosteniéndolo durante la inyección.
- Puerto de inyección adherido directamente sobre la grieta, para ser inyectada. Este método es mucho más efectivo y seguro.
- Ducto de inyección dentro de orificios perforados previamente, permite inyectar la resina desde el interior de la grieta. Es muy efectivo en casos en los cuales la grieta es muy angosta y la distancia entre sus caras es distante.
- Sistema de inyección de vacío: consiste en colocar una membrana de adhesivo por un extremo y haciendo vacío del otro. Por la otra cara, de todas maneras va sellada la grieta con epóxico.

7.3.2 Procedimiento de inyección de grietas

Las inyecciones epóxicas requieren un alto grado de certeza para una satisfactoria ejecución y la aplicación de una técnica, puede estar limitada por la temperatura ambiente. Los procedimientos generales de una inyección son los siguientes:

- 1. Limpieza de grietas:** retirar contaminantes como aceites, grasas, polvo o partículas sueltas de concreto que interfieran la penetración del epóxico y la pega. La contaminación se remueve con agua o algún solvente adecuado, haciendo fluir con presión de aire. Probablemente se retira el solvente con aire seco.

- 2. Sello de superficies:** la superficie de las grietas debe ser sellada manteniendo el epóxico libre de filtraciones antes de que éste endurezca. Donde las caras de las grietas no pueden ser alcanzadas por estar en la cara opuesta al llenado, donde la placa ha comenzado a ser reparada, el material de relleno o su base es a menudo un sellado adecuado. Una superficie puede ser sellada esparciendo un epóxico a lo largo de la grieta y dejando que endurezca. Si la presión de inyección es aproximadamente elevada, debe cortarse la grieta en una profundidad de 13 mm aproximadamente y un ancho cercano a los 19 mm, en una sección con forma de “V”, para llenarla con epóxico y enzararla con la superficie.
- 3. Instalación de los puertos de entrada**

 - a) Inserción de aditamentos en huecos perforados. El método más empleado, en combinación con las ranuras en “V”, donde se insertan un niple de tubo o una válvula, pegándolos con un adhesivo epóxico. Una boquilla de vacío se usa para prevenir que la grieta se llene con el polvo del taladro.
 - b) Soporte esparciendo pegante. Cuando no se usa la ranura “V”, frecuentemente se usa un puerto de entrada adherido sobre la grieta. El relleno esparcido queda con una sección como un sombrero abierto en la parte superior donde entra el adhesivo.
- 4. Mezcla del Epóxico:** esta debe hacerse por baches o por un método continuo. Los adhesivos deben ser premezclados de acuerdo con las instrucciones del fabricante y con el equipo apropiado. Se debe tener cuidado de mezclar únicamente la cantidad requerida para evitar el endurecimiento del material durante la inyección, cuando esto ocurre, el flujo comienza a cambiar al igual que la presión de inyección se hará más difícil. Los mezcladores de dos componentes independientes, facilitan el trabajo para inyecciones con adhesivos de corta vida de trabajo.

- 5. Inyección del epóxico:** se emplean bombas de presión, equipos de pintura o pistolas de aire a presión. La presión de inyección debe ser cuidadosamente seleccionada. Usar presiones excesivas propagan la aparición de grietas, causando daños adicionales.

Si la grieta es vertical, el proceso de inyección debe iniciarse bombeando por el puerto más bajo hasta que el epóxico alcance el puerto por encima de éste. El puerto de inyección más bajo es taponado y el proceso se repite sucesivamente por los puertos más altos hasta que la grieta quede completamente llena y todos los puertos tapados. Este método nos garantiza que el llenado no incluirá aire dentro del adhesivo.

Para las grietas horizontales, el procedimiento debe iniciarse de uno de los extremos hasta el otro de la misma manera. La grieta se llena si la presión se mantiene. Si la presión no se mantiene, el epóxico estará fluyendo por una porción no confinada o por una filtración de la grieta.

- 6. Remoción del sello superficial:** después del curado del epóxico, el sello superficial debe ser removido con métodos apropiados. Accesorios y orificios de entrada, deben ser pintados con un compuesto de parcheo epóxico.

Se necesita toda una variedad de accesorios para llevar la resina desde el dispensador hasta la grieta. Éstos incluyen: puertos de inyección en las grietas, tuberías para llevar el flujo, válvulas para controlar el flujo, multiplicadores para permitir la inyección múltiple, y conectores para unir todo esto.

7.4 Estabilización de grietas

Hay una gran variedad de técnicas para solucionar los problemas causados por agrietamiento en el concreto. Pueden generarse pérdidas de capacidad de carga, pueden conducir líquidos corrosivos (incluida el agua) o gases, a través del elemento.

Es muy común al reparar la grieta, restablecer la capacidad portante y la impermeabilidad de los elementos, introduciendo materiales poliméricos en el plano de fractura.

La reparación puede fallar como resultado de un defecto en la evaluación, el diseño, el material seleccionado, los métodos, o la mano de obra.

1. Considerando la temperatura: si inyectamos un epóxico cuando la temperatura del elemento es alta, la grieta estará en su punto más estrecho, al dilatarse el concreto. Entonces al disminuir la temperatura, el miembro se encogerá, desarrollando un esfuerzo de tensión que el elemento pegado no podrá soportar, causando una falla, probablemente adyacente a la pega.

Si inyectamos cuando la grieta está más expandida (con el elemento lo más frío posible), entonces al subir la temperatura, el adhesivo sufrirá compresión, al igual que todo el elemento, sin fallas posteriores.

2. Técnicas de inyección: la de fracturas en el concreto para restaurar su acción monolítica, tiene un buen desarrollo de técnicas de reparación. Los adhesivos más comunes para este tipo de reparación, son los epóxicos y los metacrilatos.

Varios sistemas son usados para inyectar estos adhesivos. El mejor método de determinar si un sistema trabaja mejor que otro, es medir la penetración en sitio y la pega del adhesivo, son herramientas usuales cuando se monitorea el objetivo del comportamiento.

Lo común es sellar la grieta en todo su recorrido, dejando tan solo los puntos de inyección o puertos. Generalmente este sellamiento se efectúa con material epóxico, no sólo por la velocidad del trabajo sino por la garantía en la calidad de pega.

8. PLANTEAMIENTO PARA LA CORRECCIÓN DEL AGRIETAMIENTO EN EL CANAL DE ADUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO PALÍN II

8.1 Solución para el tratamiento de las grietas y corrección de las fallas

Para comenzar, debemos tener claro que virtualmente todas las técnicas de reparación de grietas distintas a la inyección, han probado ser fijaciones temporales. Estos métodos incluyen: la aplicación de membrana líquida, la incorporación de membranas de fibra de vidrio entre las capas de epóxico, selladores de todos los tipos instalados sobre las superficies o sobre la grieta previamente abierta, el uso de masillas y pastas epóxicas para sellar las fallas, y la lista continúa.

En el lapso de uno a veinte años en cualquiera de las técnicas mencionadas, la falla está asegurada. En algunos casos, los materiales de reparación superficial se debilitarán por el envejecimiento, o bien se despegarán de la superficie a causa de los rayos ultravioleta o en este caso por desgaste debido al paso continuo de agua en el canal de aducción. Con frecuencia las grietas se alargan, especialmente cuando hay cargas vivas u ocurren cambios de temperatura significativos. El tráfico y el vandalismo también hacen su parte. Pero la falla más común se debe al desgaste de los materiales de reparación. Es necesario entender bien este factor de desgaste para apreciar en toda su extensión la probabilidad de falla de los procesos de reparación, los cuales simplemente colocan un puente en la grieta, no la llenan.

Las grietas en el concreto que están expuestas a los cambios de temperatura por el cambio de estaciones, se abren y cierran en su totalidad conforme el concreto cambia anualmente en la totalidad de su masa. Sin embargo, la boca de la grieta se abre y se cierra con mucha mayor frecuencia a medida que la superficie de concreto se mueve lentamente de regreso o hacia adelante en respuesta a los cambios diarios de temperatura; y en muchas áreas esto sucede con mayor frecuencia, debido a las exposiciones alternas al calor de la luz del sol y al frío de las sombras durante el día.

Aunque la cantidad de movimiento puede ser poca y la grieta estrecha, la falla es de todas formas inevitable, ya que el material de reparación desgastado se deforma repetidamente por este abrirse y cerrarse de la grieta.

En comparación a lo anterior, un epóxico inyectado es una fijación permanente por estas razones:

- La resina llena la grieta en lugar de hacer un puente, evitando la entrada del agua, aire de la atmósfera, y protegiendo del proceso de corrosión la parte expuesta del acero de refuerzo.
- Las altas resistencias de unión y tensión de los epóxicos evitan el abrirse y cerrarse de la grieta, así como su alargamiento.
- Y la resina inyectada no es vulnerable al clima, los rayos ultravioleta, el tráfico o el vandalismo.

La fijación permanente es la reparación más económica, para estructuras permanentes, no sólo debido a que el proceso no debe repetirse, sino también porque, una vez que las reparaciones temporales fallan, éstas son raras veces restauradas inmediatamente después de las inspecciones: antes de ello, la preparación de presupuestos y el estudio de prioridades debe tener lugar. Estos retrasos han probado resultar caros por la posterior corrosión del refuerzo.

Otra ventaja de escoger la inyección es la apariencia final. Esto no fue siempre así, ya que hubo un tiempo en que fue necesario perforar agujeros y usar una pasta epóxica para sellar las grietas que contenían la resina inyectada. Pero hoy en día, rara vez se necesita hacer agujeros y la tecnología de inyección a baja presión ha hecho posible sellar las grietas con bandas largas, selladores no corrosivos.

Aunque grietas menores a los 0.30 mm no son normalmente una amenaza para el refuerzo en condiciones de humedad, aire húmedo y suelo, a menos que se encuentren en un ambiente difícil como por ejemplo una estructura para retención de agua, el Comité del Instituto de Concreto Americano 224-R-72 en guías concernientes a las grietas indican que pueden tener un ancho máximo de 0.10 mm., grietas de 0.10 mm son con frecuencia las causantes de falla en los recubrimientos debido al fenómeno de abrirse y cerrarse.

La combinación de las altas resistencias de unión y la tensión de una resina epóxica inyectada no sólo detiene el alargamiento de la grieta, sino también el abrir y cerrar de la misma.

Solamente la inyección de una falla puede asegurar la integridad permanente de lo que está sobre ella. Aunque una unión puede no ser posible debido a la contaminación de aceite u otras sustancias, la inyección proporciona, sin embargo, una fijación permanente, puesto que la resina llena la grieta, restaurando así la interconexión de los agregados y deteniendo las deformaciones. No se requiere de una unión para detener el paso lento de agua a través de losas, puesto que ese vacío ha sido reducido a una capa impenetrable.

La inyección de las grietas, seguida de la protección de la superficie con resinas de penetración, relativamente baratas, proporciona una aplicación menos costosa y una reparación permanente de las grietas.

Los sistemas que están actualmente en el mercado -sencillos, creíbles, de bajo costo- han hecho de la fijación por inyección una solución accesible, sensata y rentable.

8.2 Definición de mezclas, morteros, aditivos y planteamiento del método de aplicación

Como se indicó en el tema anterior el mejor tratamiento de grietas es la inyección el cual consiste en una protección de la superficie (en ambos lados), seguida de la inyección de las grietas.

A continuación se presenta una serie de morteros con sus características técnicas y su método de aplicación:

8.2.1 Sello superficial de grietas

PRODUCTOS SIKA

1. SIKADUR HI MOD GEL: ADHESIVO EPÓXICO DE CONSISTENCIA GELATINOSA E INSENSIBLE A LA HUMEDAD.

“El SIKADUR HI MOD GEL es un sistema de resina epóxica de dos (2) componentes, 100% sólidos, libre de solventes. Adhesivo estructural de alto módulo, para pegas y reparaciones en caras verticales y superficies sobre la cabeza. Cura en condiciones secas, húmedas y saturadas.”

Características técnicas

Viscosidad: no se escurre, similar a la grasa.

Curado final: 16 horas a 23°C (75% de resistencia última) ASTM D-695.

Características técnicas:

Resistencia a la tensión ASTM D-638 a 14 días: 224 Kg/cm² min. 3,600 Psi.

Resistencia a la compresión ASTM D-695 a 7 días: 700 Kg/cm² min. 12,000 psi.

Usos

- Pega de materiales estructurales.
- Anclaje de pernos en caras verticales y superficies sobre la cabeza.
- Sellamiento superficial de grietas, para efectuar inyecciones epóxicas.
- Parcheo de superficies en espesores de 3.8 cms. Máx. Mezclado con agregado.

Modo de empleo

Preparación de la superficie: quitar el polvo, grasa, curadores y material desintegrado de la superficie; se recomiendan métodos mecánicos similares al chorro de arena hasta obtener el acabado apropiado.

Preparación del producto: agregar una parte de “B” con 2 partes de “A” en volumen dentro de un recipiente limpio. Mezclar durante 3 minutos con la paleta SIKA o un taladro de baja velocidad, (400-600 rpm), hasta obtener un color uniforme.

Pega de superficies irregulares: aplicar SIKADUR HI MOD GEL en ambas superficies a pegar, con espátula o plancha metálica.

Anclaje de pernos en superficies verticales y sobre la cabeza: llenar parcialmente el hueco.

Recomendaciones

El mortero epóxico sólo se usa para interiores. No se use para sellar grietas bajo presión hidrostática.

2. SIKADUR 55 SLV: RESINA EPÓXICA DE SUPER BAJA VISCOSIDAD.

“Es una resina epóxica de dos componentes, 100% de sólidos, insensibles a la humedad, sellador y soldador de grietas y fisuras, para apertura rápida al tráfico. Posee una bajísima viscosidad, altas adherencias, formulada especialmente para llenar tanto grietas húmedas como secas.

Características técnicas

Viscosidad: aproximadamente 95 cps.

Resistencia a la compresión ASTM D-695 a 28 días: 15,800 psi. ~ 1,110.85Kg/cm²

Usos

- Preparación estructural de grietas en elementos de concreto.
- Sella la superficie de losas en interiores y exteriores del agua, cloruros y ataque químico.
- Para losas horizontales patios, calles, estacionamientos y otras estructuras expuestas al tráfico peatonal y de vehículos.
- Penetra por gravedad, fisuras desde 0.1 m.m. pulgadas de ancho.

Modo de aplicación

Se puede aplicar sobre superficies horizontales utilizando un rodillo, una brocha o un rastrillo de hule. Se reparte el material sobre la superficie utilizando empozado sobre las grietas. Debe permitirse que el material penetre y sea absorbido; luego se retira el exceso para no dejar una película superficial visible. Para grietas mayores a 3 m.m. (1/8 pulgada), debe llenarse primero con arena cernida secada al horno y luego se vierte el Sikadur 55 SLV. Cuando tenga acceso a la cara inferior de la grieta, debe sellarse para evitar que se escape el epóxico.

PRODUCTOS MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES

3. CONCREATIVE 1490: ADHESIVO EN PASTA PARA USO GENERAL

El *CONCREATIVE* 1490 es un adhesivo epóxico de dos componentes, 100% sólidos, utilizado para uniones verticales y sobre cabeza y para aplicaciones de parcheo y anclaje horizontal.

Usos

- Pegar material de masonería suelto y roto.

- Unir concreto y otros materiales rígidos.
- Anclar barras de acero.
- Nivelar superficies, llenar espacios y juntas.
- Uso como sellador rígido.

Características técnicas: 16, 25 Y 41°C

Curado inicial (AASHTO T 237) 36 horas, 24 horas, 12 horas

Curado completo (ASTM D 695) 10 días, 7 días, 3 días

Resistencia a tensión: 34.5 Mpa ~ 5003.8 Psi

Resistencia a compresión: 82.1 Mpa ~ 11,907.6 Psi

Resistencia al corte: 41.4 Mpa ~ 6004.56 Psi

Resistencia de adherencia a flexión: 4 Mpa ~ 580.15 Psi (ASTM C-293)

Resistencia de adherencia a 2 días: 20.7 Mpa ~ 3002.28 Psi (ASTM C-882)

8.2.2 Resinas epóxicas para inyección

PRODUCTOS SIKA

1. **SIKADUR HI MOD LV:** ADHESIVO EPÓXICO DE BAJA VISCOSIDAD E INDIFERENTE A LA HUMEDAD.

“El SIKADUR HI MOD LV es un sistema de resina epóxica de dos componentes, 100% sólidos, libres de solventes. Adhesivo rígido de alto módulo con cura asegurada en presencia de humedad.”

Características técnicas

Viscosidad: similar a la del aceite ligero.

Curado final: 2 días a 23°C (75% de resistencia última) ASTM D-695.

Resistencia a la tensión ASTM D-638 a 14 días: 210 Kg/cm² min. 8,400 Psi.

Resistencia a la compresión ASTM D-695 a 28 días: 700 Kg/cm² min. 11,700 psi.

Usos

- Anclaje de pernos: fijación de pernos en superficies horizontales.
- Mortero epóxico: mezclado con agregado seco, sirve para cubrir superficies hasta un espesor de 3.8 cms.

Métodos de aplicación

Inyección por gravedad: sistema aplicable en grietas sobre superficies horizontales y de 1.5 mm. como mínimo.

Inyección por presión: cuando el tamaño de la grieta es pequeño o las reparaciones se hacen en superficies de contra presión, es necesaria la inyección con presión de aire.

Para este caso se inicia con el sellado superficial de la grieta con SIKADUR HI MOD GEL un adhesivo epóxico, dejando válvulas a lo largo de la grieta cada 20 a 15 cms., dependiendo de la presión necesaria. Las válvulas se fijan con SIKADUR HI MOD GEL en huecos perforados con anterioridad. La inyección siempre debe iniciarse en la válvula inferior hasta que el producto empiece a salir por la inmediatamente superior, luego se pasa a ésta repitiendo hasta llenar completamente la grieta.

Equipo de aplicación

Para la inyección de grietas puede utilizarse pistolas de presión manual con cuerpo hermético donde se introduce un cartucho con el producto de mezclado.

También son utilizables equipos especiales conformados por compresor, tanque de presión, mangueras y boquillas de salida de control automático.

2. SIKAFIX HH: SELLO INYECTABLE PARA DETENER FILTRACIONES

Es una resina líquida de poliuretano, de dos componentes, que inyectada a presión en fisuras o grietas en concreto o mampostería, se expande formando una espuma que sella definitivamente las filtraciones.

Características técnica

Viscosidad: 0.032 Kg/l ASTM D-1622.

Resistencia al corte ASTM C-273: 17.10 psi

Resistencia a la tensión ASTM D-1623 29.30 psi.

Usos

Detiene permanente el paso de agua, que se filtra a través del concreto agrietado o con hormigueros, juntas de construcción o de dilatación, en muros de contención, fosos de ascensores, piscinas, tanques, represas, roca en túneles, tanques de aguas residuales, etc.

Modo de aplicación

Mediante el equipo SIKAFIX BOMBA, se inyecta el SIKAFIX HH mezclado, con una presión de 250 psi, durante aproximadamente 45 segundos y pausando para permitir que el material fluya entre la fisura. Debe verificarse que en el agua filtrante o contenida en la fisura o espacios vacíos, empieza a fluir el producto en forma de espuma, se suspende la inyección y se pasa al siguiente puerto de inyección.

Reinyecta en todas las boquillas para comprobar que todas las grietas están debidamente selladas.

Modo de empleo

A lo largo de la fisura y en un ángulo de 45° grados con respecto a la superficie, cada 25 a 60 cm. (dependiendo del espesor de la fisura), se perfora el concreto con una broca de 5/8". La perforación debe intersectar la fisura aproximadamente en la mitad del ancho del elemento (placa, muro, etc.) a inyectar.

Se Introduzca el inyector en la perforación de tal manera que el mango negro quede ajustado dentro del concreto. Se hace presión con la mano o se golpea suavemente con un martillo y luego se aprieta el inyector con una llave fija de 3/4", hasta que ajuste perfectamente.

PRODUCTOS MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES

3. CONCRETSIVE 1380: EPÓXICO DE BAJA VISCOSIDAD

Es un sistema epóxico de dos componentes sin solventes, de baja viscosidad, especial para inyección a presión.

CONCRETSIVE 1380 fue desarrollado específicamente para usarse con el proceso SCB (*Structural Concrete Bonding Process*) y solamente está disponible para y/o a través de aplicadores aprobados.

Características técnicas

Viscosidad: 150 cps. a 38 °C

Tiempo de curado: MBT-L 3 días a 38 °C

Resistencia a la flexión ASTM D790: 84 Mpa. 12,183.17 Psi

Resistencia a la compresión ASTM D-695: 112 Mpa. 16,244.27 Psi

Usos

- Excelente penetración de fisuras finas.
- Alta temperatura de deflexión (HDT por sus siglas en inglés) que provee resistencia aumentada a la fluencia.
- Curado rápido.
- Excelente adhesión aun en condiciones adversas, tales como temperatura y humedad.

Recomendado para

- Unir estructuralmente secciones de concreto agrietadas.
- Reparación de rellenos (*grouts*) bajo equipos o estructuras.
- Formar cámaras de soporte, mediante la inyección del agregado previamente colocado.
- Anclaje de pernos o barras.

Modo de uso

CONCRESSIVE 1380 forma parte integral del proceso SCB (reparación mediante inyección a presión) y solo está disponible para aplicadores aprobados.

8.2.3 Selección de productos para la protección y reparación del concreto

Debido a que la inyección epóxica representa una alternativa confiable para reparaciones de grietas en lugar de usar otros materiales o reemplazar estructuras, se realizó una breve descripción de los diferentes productos para inyección más utilizados en la actualidad.

Es importante seleccionar un sistema de productos de un solo proveedor para poder realizar una reparación exitosa y para esto se deben evaluar los requisitos y estrategias de la reparación, se debe tomar en cuenta si la aplicación del producto la realizarán técnicos que hayan recibido instrucciones formales acerca de la instalación del producto, que garantice la reparación de la grieta, o si lo tienen que realizar personas no calificadas, de ser así esto traería como consecuencias pérdidas de tiempo y dinero así como daño a la estructura, por tener que realizar el trabajo varias veces, desperdicio del producto entre otras.

Para la selección del producto de reparación para la estructura agrietada, se deben estudiar las características del mismo como el procedimiento de aplicación.

Para la reparación del Canal de Aducción del Proyecto Hidroeléctrico Palín II, se compararon las ventajas y desventajas de cada producto tomando en cuenta el costo, propiedades, mano de obra y modo de aplicación.

Como podemos observar en el mercado se encuentran variedad de productos selladores y resinas de inyección de grietas, pero no todos prestan sus servicios para la aplicación de los mismos; el técnico se basa en entender las necesidades de los diferentes mercados. Al utilizar un solo método de reparación se ignoran ciertos requisitos ya que cada estructura está sujeta a condiciones ambientales, cargas y limitaciones constructivas únicas, cada proyecto de reparación se puede hacer a la medida de los requisitos específicos y las condiciones establecidas durante el proceso de evaluación.

Por la importancia que tiene el canal de aducción en el proyecto se debe garantizar la efectividad de la reparación de las grietas, por lo cual se decidió utilizar el sistema SCB (*Structural Concrete Bonding*), presentado por MBT, el cual consiste en inyecciones con resina epóxica, capaces de penetrar en microfisuras de 0.001 mm de espesor y lo realizan personas calificadas para garantizar la reparación.

Componentes del sistema

Bomba CONCRECIVE SCB 20:1 la bomba de inyección es un equipo eléctrico diseñado para inyectar 2 componentes a presión constante (0 a 240 psi) y con control exacto de las proporciones de la mezcla de la resina.

Resina Concrecive 1380: resina Epoxi Bicomponente, de baja viscosidad exenta de disolventes, para inyecciones a presión y relleno de fisuras de un mínimo de 0.001 mm de espesor y con un tiempo de uso de 8 min; esta resina tiene una resistencia a la compresión de 112 Mpa (1,142.08 Kg/cm²) y a la flexión de 84 Mpa (856.56 Kg/cm²).

Resina Concrecive 1490: resina Epoxi de dos componentes en pasta, para la preparación, adecuación y sello de las fisuras y control de puertos, con una resistencia a la tensión de 5,003 Psi (351.75 Kg/cm²) y a la compresión de 11,907.6 Psi (837.19 Kg/cm²), el cual es superior a la resistencia de diseño de los muros del canal.

Entre las VENTAJAS de la utilización de este método tenemos:

- Inyección a presión constante entre 0 a 240 Psi., dependiendo del grado de profundidad de fisura.
- Cero desperdicio de resina de inyección, ya que los dos componentes se unen directamente en la boquilla de la salida.
- Posibilidad de inyectar en interior o exterior, aun con clima desfavorable.
- Garantía de inyección por presión ejercida.
- La resina Concrevis 1490 se puede aplicar sobre superficie húmeda y el tiempo de uso es de 15 a 30 minutos.

8.3 Procedimiento de control en el proceso de aplicación y control futuro

Se define el ancho mínimo de las grietas y hasta qué profundidad deben ser llenadas. La resina debe estar adecuadamente preparada (especificando la correcta relación de la mezcla) y totalmente mezclada.

Control de calidad

La pega de un concreto fracturado usando adhesivos, puede controlarse de varias maneras; incluídas las dos siguientes:

1. Medidas de la velocidad de pulso: proporciona un método de rápida y efectiva garantía de calidad, para determinar la penetración del adhesivo dentro de la fractura. El medidor de velocidad se calibra en una sección de concreto no fracturada. La transmisión y recepción de fijos para una separación con distancia constante. Fracturas inyectadas apropiadamente y concreto no fracturado, tienen similares tiempos de transmisión. Ubicaciones a lo largo de la fractura donde el epóxico no ha penetrado, presentan mayores tiempos de transmisión.

2. Extracción de núcleos (corazones): permiten una inspección visual del espécimen inyectado, lo cual proporciona un examen de penetración satisfactorio del epóxico. Adicionalmente permite hacer ensayos de compresión, flexión o tracción sobre el elemento reparado y verificar sus resultados. Debe preverse un excelente material de relleno sin contracciones y con excelente adherencia.

Los procesos requieren de un monitoreo frecuente, cuando no constante, para asegurar el cumplimiento de las presiones de inyección, chequeos de la relación de la mezcla, secuencia de la inyección, etc.

Es importante revisar núcleos desde el momento en que se inicia el proyecto, para ponerse al tanto de las habilidades del equipo de inyección y de los resultados que pueden esperarse.

Debe inspeccionarse visualmente los núcleos en el mismo sitio, por penetración, y luego quebrarlos para revisar el correcto curado de la resina. Si no hay roturas en la unión. De la misma manera, un extractor de núcleos resulta indispensable en un proyecto de inyección.

El monitoreo de la inyección, debe incluir la perforación de agujeros superficiales de 0.5" ó 12.5 mm entre los puertos para confirmar la presencia de material curado. Se deben tomar muestras al azar de la resina de inyección durante el proceso de inyección –no al principio ni al final del día-. La muestra de resina debe ser dispensada a la presión y velocidad de flujo prevalecientes en el lugar de trabajo. Los procedimientos y problemas que pueden ocurrir al momento de la inyección en donde el personal que realiza este trabajo no es calificado se pueden mencionar el apareamiento de numerosas fugas en los puertos de inyección, endurecimiento del sellador de las grietas, obstrucción frecuente en las líneas de inyección (a menudo es un indicador de la imprecisión en la relación de la mezcla), una dispar relación en el consumo de los componentes de la resina, uso de conexiones manuales en los puertos de inyección (el factor fatiga afecta la duración y la presión en la inyección) y ausencia de fugas de resina ocasional a partir de microfisuras en los alrededores de la grieta.

Existe una infinita variedad de condiciones de trabajo y proyectos, que pueden justificar excepciones a cualquiera de las guías anteriores en alguna que otra ocasión. Sin embargo, en casi todos los casos, la especificación de resultados es largamente preferible al lenguaje de procedimientos.

8.4 Guía para reparar el concreto agrietado

Resinas de uretano para inyección

El proceso de Adherencia Estructural del Concreto (SCB) y la línea *CONGRESIVE* de resinas poliméricas de reparación, incluyen resinas epóxicas de inyección para reparación de grietas estructurales y resinas de inyección de uretanos para el control de la infiltración activa de agua.

Requisitos de los aplicadores

La inyección de uretanos por inyección a presión deberá realizarse por un aplicador de *grouts* químicos certificado por el fabricante (tal como los Licenciarios SCB de MBT), cuyos técnicos han recibido instrucción formal acerca de la instalación de dichos materiales.

Control de calidad del producto

Producto

Todos los materiales deberán entregarse en la obra sin daños, los recipientes que contengan el material deberán permanecer cerrados con las etiquetas originales del fabricante.

Equipo

La bomba de inyección es un equipo eléctrico diseñado para inyectar 2 componentes a presión constante (0 a 240 psi) y con control exacto de las proporciones de la mezcla de la resina.

Procedimiento de preparación superficial

Superficies de concreto:

El sustrato puede estar seco o húmedo, sin embargo, se obtienen los mejores resultados en superficies secas. El concreto nuevo debe estar totalmente curado (por lo general 28 días) Se remueve la grasa, cera, contaminantes de aceite y compuestos de curado restregando con un detergente industrial, un compuesto desengrasante o un solvente fuerte para la remoción completa, se continúa con limpieza mecánica (ASTM D 4258), si no contiene grasa solo polvo y tierra es suficiente con la limpieza mecánica. Se remueve todo el concreto débil, contaminado o deteriorado, por medio de chorro de arena, escarificado, con cepillo metálico u otro método mecánico. Después de limpiar mecánicamente se limpia con aspiradora. (Ref ASTM D 4259).

Se puede preparar la superficie con ácido clorhídrico del 15%, pero únicamente cuando no haya otra alternativa práctica. Se debe proseguir con lavado a presión, restregado y enjuagado con abundante cantidad de agua limpia. Se chequea la remoción del ácido con papel pH húmedo. La lectura debe ser mayor de 10. (Ref. ASTM D 4260) La superficie preparada debe estar limpia, libre de polvo y perfilada para proporcionar adherencia mecánica. Remover la lechada superficial de todo el concreto terminado o encofrado.

Superficies de acero

Remover toda la suciedad, grasa y aceite con un compuesto de limpieza y desengrasante industrial. (SSPC-SP-1) Remover el óxido por medio de chorro de arena. Preparar la superficie hasta lograr un acabado de metal blanco. Continúa con aspirado o chorreado de aire seco libre de aceites (SSPC-SP-10) (NACE-2).

Aplicación del sellador

Mezclado

Mezclar únicamente la cantidad que pueda utilizarse antes de que expire el tiempo de vida útil del producto. Incorporar perfectamente cada componente antes de mezclar. Calcular con cuidado la proporción de cada componente y añadir la Parte B (endurecedor a la parte A (resina)). Mezclar las partes A y B utilizando un taladro de baja velocidad (600 rpm) y eje mezclador. Raspar con cuidado los lados y el fondo del recipiente mientras se mezcla. Mantener la pala bajo de la superficie del material para evitar atrapar aire. El mezclado será de 3 a 5 minutos. El material bien mezclado estará libre de grumos.

Puertos de inyección

Establecer los puertos de inyección cada 20 o 30 cms. Alternar los puertos de lado a lado, si es posible.

Sellado superficial:

Aplicar el *CONCRETSIVE* 1490 con una llana en suficiente cantidad para llenar todos los espacios entre las superficies a unir. El espesor de la línea de adherencia debe ser de entre 1.5 a 3 mm.

Inyección a presión de resinas

Este sistema consiste en la inyección epoxi a presión máxima de 240 PSI de resina epoxi tipo *Concresive* 1380 bicomponente de rápido fraguado.

Seguridad

Los adhesivos *CONCRETSIVE* son epóxicos de dos componentes formulados para uso industrial y profesional, y deben mantenerse fuera del alcance de los niños. Estos productos contienen resinas epóxicas y agentes de curado de aminas que pueden ser **CORROSIVOS** y potencialmente **DAÑINOS** para la salud, si no se almacenan y usan de manera adecuada.

Los peligros pueden reducirse significativamente al observar las precauciones de las hojas de seguridad, las etiquetas de los productos y la literatura técnica. Leer esta literatura con cuidado antes de usar éstos productos.

Los técnicos y los trabajadores involucrados en la inyección de las resinas (así como los observadores o el personal de inspección en el área de trabajo) deberán portar cascos de construcción con protección completa para la cara, camisas de manga larga, guantes de goma y máscaras para respirar mientras se realice la inyección.

Procedimiento

- a. Los recipientes que contengan el material deberán abrirse cuando el equipo de inyección se haya colocado en su lugar y esté listo para inyectar.
- b. La inyección debe ser continua desde el principio, y debe comenzar en el punto más bajo verticalmente o en uno de los bordes horizontales. Cuando la resina aparezca en el siguiente puerto en línea, o el trayecto de la resina indique que ha pasado al siguiente puerto en línea, el aparato de bombeo se moverá al siguiente puerto y se continuará con la inyección, hacer cambio de la boquilla de goma del equipo de inyección cada 5 ó 10 minutos porque estas se obstruyen y no permiten el paso de resina a la grieta.
- c. El equipo de inyectar SCB inyecta los componentes a presión constante (0 a 240 psi) y con control exacto de las proporciones de la mezcla de la resina, de no ser así los técnicos deben asegurarse de que la proporción de los componentes recomendada por el fabricante se mantenga dentro de la tolerancia especificada. Periódicamente, se deben extraer muestras durante la inyección para preparar un espécimen control.
- d. Posteriormente a la inyección (cuando el producto sale por el puerto superior), se debe evitar que la resina se escape por el puerto recién inyectado, esto se logra colocándole parafina en el puerto.

- e. Al completar la inyección inicial, se permitirá suficiente reacción y tiempo de curado para la resina inyectada monitoreando las muestras control. Si, o cuando, se identifiquen fugas dentro de la inyección previa, se debe reinyectar siguiendo el procedimiento, previamente mencionado, de instalación de puertos por inyección.

Limpieza

El epoxy mezclado es más fácil de limpiar antes que endurezca, se pueden usar solventes como acetona o tolueno. Se recomienda el uso de solventes comerciales para la remoción de epóxicos y pinturas para el epoxy endurecido.

Este sistema de inyección está catalogado y patentado para fines estructurales de reparación y por consiguiente garantiza la reestructuración del concreto.

8.4.1 Procedimiento en el campo

Para la reparación de las grietas del Canal de Aducción del Proyecto se decidió utilizar el sistema SCB (*Structural Concrete Bonding*); el procedimiento utilizado en el campo se define a continuación:

- Se realizó una inspección del área, se localizaron las grietas aparecidas en el Canal de Aducción, se identificaron espesores y longitudes.
- Se inició la preparación del área, debido a que en los muros del canal no se encontró grasa, cera, contaminantes de aceite ni compuestos de curado, únicamente polvo y tierra fue suficiente con la limpieza manual de las fisuras lado x lado removiendo con cepillo metálico todo el concreto débil, contaminado o deteriorado que se encontró en la superficie del muro.

- Se preparó la mezcla de la pasta C-1490 para sellar superficialmente la fisura de la siguiente manera: Se calculó con cuidado la proporción de cada componente y se añadió la parte B (Endurecedor) a la parte A (resina). Se mezcló únicamente la cantidad que podía utilizarse antes de que expirara el tiempo de vida útil del producto, el cual es de 15 a 30 minutos. Se mezclaron las partes A y B hasta que se incorporaron perfectamente.
- Se prepararon los puertos cada 20 cm a lo largo de la fisura.
- Se aplicó la pasta de sello en ambos lados del muro con un espesor promedio de 1.2 mm y 1" de ancho dejando puertos de inyección cada 20 cm. La resina *Concresive* 1490 se aplicó sobre superficie seca; esta actividad se realizó entre las 9:00 y 11:00 horas.
- En datos técnicos, el proveedor especifica que antes de la inyección se espere aproximadamente 30 min. a que reduzca la pasta de resina epoxi del sello, en el Proyecto Palín II, la inyección de la Resina C-1380 con la bomba SCB-20 se inició a partir de las 14:00 horas, 3 horas posteriores a la colocación de la pasta selladora.
- Como se describió anteriormente el SCB es un sistema que consta de un equipo eléctrico diseñado para inyectar 2 componentes a presión constante con control exacto de las proporciones de la mezcla de la resina, por lo que no fue necesario mezclar los componentes de la resina antes de colocarlo en el equipo. Al momento de la inyección sólo se trasladó el equipo al lugar y se colocaron los recipientes que contenían los componentes de la resina y al iniciar la inyección los componentes se mezclan en la pistola de inyección y así se asegura la buena proporción de la mezcla.

- Inyección: se colocó la punta de la boquilla en el punto más bajo verticalmente o en uno de los bordes horizontales. Cuando la resina aparecía en el siguiente puerto en línea, o esta salía por el mismo puerto (si la grieta no era continua), esto indicaba que la grieta se había sellado por lo que el aparato de bombeo se movía al siguiente puerto y se continuaba con la inyección, se hizo cambio de la boquilla de goma del equipo de inyección cada 5 ó 10 minutos porque estas se obstruyen y no permiten el paso de resina a la grieta.
- Al terminar la operación de inyección, cada puerto se selló con parafina para evitar que se derramara la resina y al momento de inyectar en el puerto superior se aseguró el llenado de la grieta.
- En las grietas donde se identificaron fugas dentro de la inyección previa, se reinyectó, siguiendo el procedimiento previamente mencionado.
- Se limpió con acetona los restos de resina en la superficie del concreto visto, dejándolo en su estado inicial, previo a los trabajos realizados.
- En algunas grietas se pulió con lijadora la capa del sello con la finalidad de eliminar en lo posible los restos de suciedad lógica y aceptable en este tipo de trabajo.

RESULTADOS

Se realizó una inspección visual posterior a la inyección, para revisar que no hubieran fugas de resina en los puertos inyectados, con lo que se constató que las grietas estaban selladas.

Un mes después de la inyección se observó el apareamiento de nuevas grietas, estas se encontraron en algunos casos a la par de las grietas ya inyectadas.

Al momento de realizar las pruebas de carga en la estructura, se apreciaron fugas de agua en algunas grietas inyectadas, en donde se había eliminado el sello superficial, debido a lo anterior, se decidió inyectar las nuevas grietas utilizando el procedimiento, sello superficial y resina de inyección que se uso anteriormente.

En las figuras 9 y 10 se presentan fotografías del procedimiento de inyección utilizado en las grietas de los muros del canal de aducción.

Figura 9. Procedimiento de inyección de grietas



(a)



(b)



(c)



(d)

Fotos: **(a)** Equipo de inyección SCB. **(b)** Pistola. **(c)** Inyección de grietas. **(d)** Colocación de parafina en el puerto de inyección, recién inyectado.

Figura 10. Inyección de grietas



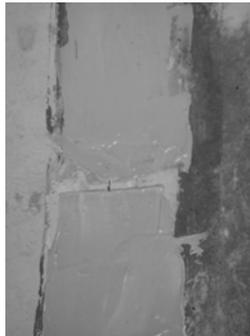
(e)



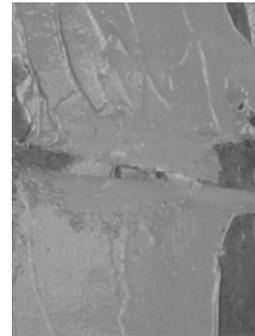
(f)



(g)



(h)



(i)

Fotos: (e) y (f) Inyección de grietas, se puede observar en estas fotos que se inyectó en el muro (puerto inferior) y la resina salió en la parte superior del mismo, esto indica que la resina relleno toda la grieta hasta salir por el puerto superior. (g) Muro del Canal de Aducción, donde se ven las grietas selladas con *Concresive 1490*. (h) Puerto de inyección listo para ser inyectado. (i) Grieta inyectada, se le colocó parafina para evitar que escape la resina.

CONCLUSIONES

1. La moderna tecnología del concreto exige que la estructura del concreto resulte tan resistente como se desee y que a la vez soporte las condiciones de exposición y servicios a la que estará sometido durante su vida útil; para lograr lo anterior, se requiere de los conocimientos del comportamiento de todos los ingredientes que interviene en el concreto y su correcta dosificación.
2. Debido a la importancia que tiene cada estructura para el funcionamiento de la Planta Hidroeléctrica Palín II, es de interés la durabilidad del concreto debido a las dificultades para darle mantenimiento si se deteriora prematuramente.
3. Existen dos aspectos generales del ambiente que pueden contribuir al agrietamiento de una estructura: el clima y la geología. La producción de concretos durables en las áreas cálidas es significativamente más difícil que en áreas templadas, por lo que se debe considerar el uso de agregados previamente enfriados o el agregarle a la mezcla de concreto hielo en vez de agua; también se debe utilizar la formaleta adecuada y realizar una remoción cuidadosa.
4. El uso de aditivos puede afectar la tendencia al agrietamiento mediante combinaciones de efectos sobre el endurecimiento, la contracción y la fluencia.
5. Los tipos de grietas que pueden aparecer en una estructura de concreto armado se enumeran a continuación:
 - o Grietas de contracción plástica
 - o Asentamiento plástico
 - o Grietas por contracción por secado
 - o Cuarteaduras
 - o Grietas térmicas

- o Grietas de tensión; contracción por carbonatación
 - o Grietas de corrosión del refuerzo
6. La resistencia mecánica, impermeabilidad, estabilidad dimensional y la resistencia al desgaste, al uso y al ataque químico, (entre otras propiedades) dependen del apropiado control de los materiales, de la dosificación y mezclado; de las temperaturas iniciales del hormigón y de las condiciones de temperatura y humedad durante el período de colocación y curado.
7. Entre las principales medidas para reducir la contracción plástica y el riesgo de que se produzca agrietamiento en el concreto, cabe mencionar:
- o Evitar que ocurran pérdidas de agua por absorción o fugas a través de la superficie base.
 - o Evitar el uso de agregados muy secos, sobre todo si tienen alta capacidad de absorción.
 - o Tratar de elaborar el concreto a la temperatura más baja posible, en tiempo cálido.
 - o Procurar la ejecución de los colados en las horas menos propicias para el secado del concreto, preferiblemente de noche si el clima diurno es adverso.
 - o Emplear medios que protejan al concreto recién colado del sol y del viento.
 - o Utilizar un eficaz sistema de pronto curado, que inhiba adecuadamente la evaporación o que reponga el agua evaporada del concreto, desde sus primeras horas de edad.
8. Las causas que provocaron las grietas en el muro del canal de aducción fueron:
La grieta longitudinal se considera que fue producida por alguna fuerza lateral al quitar la formaleta, o por algún palanqueo contra el refuerzo después del desencofrado.

Las grietas verticales fueron provocadas por:

- o Esfuerzos de contracción de fraguado y temperatura.

- o Respuestas diferenciales que excedieron la capacidad del concreto a resistirlas en ese momento. Con esto se enfatiza la importancia de proteger el concreto nuevo de la pérdida de humedad o del descenso de temperatura.
 - o Uso de formaletas recubiertas de lámina, que provocaron el efecto horno que acelera la deshidratación del concreto.
 - o Inadecuado retiro y manejo de la formaleta.
 - o Curado.
 - o Colocación del concreto en los encofrados a temperaturas superiores a los 32°C.
9. La solución más efectiva para la reparación de las grietas es la inyección; en el Canal de Aducción se utilizó el sistema SCB por sus siglas en inglés (*Structural Concrete Bonding*), el cual se considera un método fácil, económico y permanente.
10. Los resultados obtenidos de las inyección fueron satisfactorios en la mayoría de casos, pero en otros se presentaron fugas. La posible causa se atribuye a que la inyección de las grietas se realizó en el momento en el cual el concreto se dilata (2:00 p.m.), por lo que la grieta se cierra y al momento de la inyección la resina no penetra hasta sellar la grieta, por lo que se produce filtración.

RECOMENDACIONES

1. Para reducir la contracción se debe redistribuir el acero de refuerzo en los muros o losas, minimizar las cargas adicionales sobre la estructura a tempranas edades del concreto.
2. La transportación del concreto desde la mezcladora hasta el sitio donde se va a colocar debe realizarse en forma expedita y protegida contra la influencia perjudicial del medio ambiente.
3. La colocación del concreto en el espacio del encofrado debe coordinarse convenientemente con la transportación, de manera que las entregas de concreto no deban permanecer demasiado tiempo en espera a ser colocadas. Si lo anterior resulta inevitable, debe proveerse una protección adecuada al concreto contra los agentes atmosféricos en el sitio donde ocurre la transferencia del equipo de transporte al de colocación. Otra precaución para el mismo fin, consiste en disponer de suficiente equipo de repuesto para suplir fallas.
4. Siempre que sea posible el concreto debe colocarse en las horas en que las condiciones climáticas resulten menos severas.
5. El retiro y manejo de la formaleta debe hacerse cuidadosamente así como la aplicación de un agente curador inmediatamente después de retirar la formaleta.
6. Debido a que cada estructura está sujeta a condiciones ambientales, cargas y limitaciones únicas, cada proyecto de reparación se puede hacer a la medida de los requisitos específicos y las condiciones establecidas durante el proceso de evaluación.

7. La inyección de una grieta se debe hacer cuando el elemento se encuentre lo más frío posible, para que la grieta esté más expandida, entonces al subir la temperatura, el adhesivo sufrirá compresión al igual que todo el elemento sin fallas posteriores.
8. Otro requisito para la inyección de lechada o mortero, es la necesidad de mantener la homogeneidad de la mezcla, de no ser así, puede cambiar la consistencia del producto inyectado con sus posteriores consecuencias.
9. Se deben hacer ensayos de mezclas con aditivos antes de efectuar cualquier inyección con morteros o lechada, para garantizar el éxito de la reparación.

REFERENCIAS

1.
ACI Committee 116, "Cement and concrete terminology", Report ACI 116R, American Concrete Institute, Detroit, EUA, 1991.
2.
ACI Committee 212 (76), (77) y (78), "Admixtures for Concrete" in ACI Manual of concrete practice 1983, Detroit, 1983, ACI 212.1 R-81, 29 pp.
3.
American Association of State Highway Officials, "Plastic Fines on Graded Agregate and Soils by Use of the Sand Equivalent Test," AASHO Test Method T176-73. (Washington, D.C., 1978).
4.
American Concrete Institute, "Hot weather concreting (ACI 305)," Committee ACI 305, (Detroit, 1968) 19 págs.
5.
Committee ACI 207, "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures," ACI Journal, Proceeding, 67 (4): 273-309. 1970.
6.
American Concrete Institute, "Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-77)", Comité ACI 318, (Detroit, 1977) 102 págs.
7.
American Concrete Institute, "Hot weather concreting (ACI 305R-77)," Committee ACI 305, (Detroit, 1977) 16 págs.
8.
American Concrete Institute, "Recommended Practice for Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302-69)", Comité ACI 302, (Detroit, 1969) 34 págs.
9.
Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Norma 1666 del Manual de uso del Hormigón Elaborado, Buenos Aires, 1978.

10.

ACI 318-95 *"Building Code Requirements for structural concrete (ACI-318-95) and commentary"*, Farmington hills, Mi ; *American Concrete Institute*, 1995, 391 págs.

11.

ACI Committee 224 *"Control of cracking in concrete structures"*, *Journal of the American Concrete Institute* (ACI 224-R-72), vol 69, December 1972, pp. 717-753.

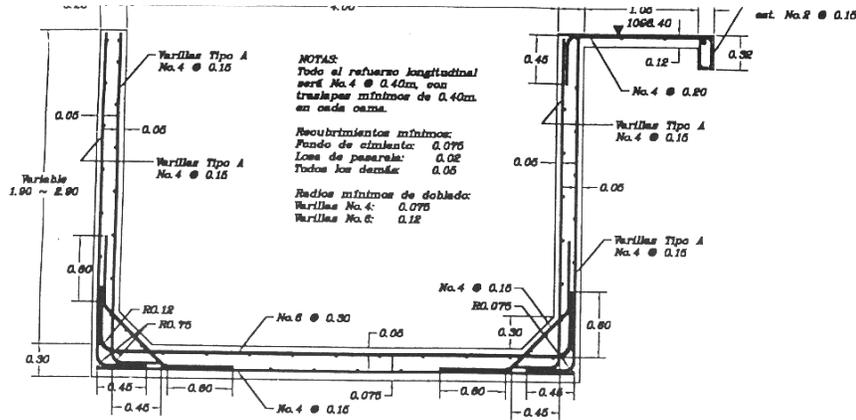
BIBLIOGRAFÍA

1. Arthur H. Nilson. **Diseño de Estructuras de concreto presforzado**, (México D.F.: Editorial Limusa, 1990). Págs 20-32.
2. Asociación Argentina del Hormigón Elaborado, Buenos Aires, 1978. www.hormigonelaborado.com/home.htm. Junio de 2003
3. Ben C. Genwick, Jr. **Construcción de estructuras de concreto presforzado**, (México: Editorial Limusa). Págs 12-15
4. Concrete construction magazine. "*Repair of concrete*", (Addison, Illinois). 39 p. 1982.
5. Concrete Construction Magazine. "*Cracks in concrete, causes and prevention*", (Addison, Illinois): 1982.
6. Control de agrietamiento de estructuras de concreto, Editorial Limusa, México. 1988. págs 125-139
7. Edward G. Nawy, P.E. **Concreto Reforzado, un enfoque básico**. Editorial Prentice-Hall Hispanpamericana, S.A. México 1988, págs 14-15, 43-56.
8. Guerra Cua, Gabriel. Tipos y causas del agrietamiento en el concreto. Tesis Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, 1975. 50 pp.
9. Gramajo Barrios, Edgar Enrique. Grietas en edificaciones de concreto; causas, prevención y control. Caso: Proyecto Nimajuyú, Tesis Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala., 1984. págs 17-22
10. Instituto mexicano del cemento y de concreto, Reglamento de las construcciones de concreto reforzado (ACI-77) y comentarios. Traducción: Ing. Raúl Huerta Martínez, México, IMCYC, 1979, 607 p.
11. Jassit Neftali Alvarado Rodríguez, Características del concreto. www.construaprende.com/trabajos/T2/Indexconcreto.html. Febrero de 2004.
12. Manual de Tecnología del Concreto, Tomos I, II y III, Instituto de Ingeniería UNAM (México: Editorial Limusa, 1994).
13. Manual of Concrete Inspection, por American Concrete Institute (Detroit, Michigan: 1967). 270 p.

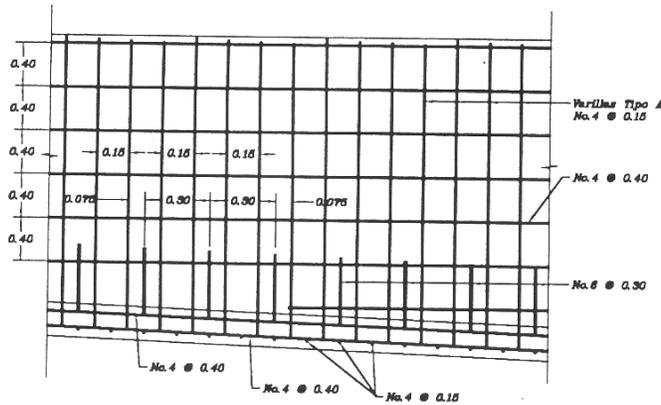
14. Master Builders Technologies, Productos de Reparación, Boletín de instalación 6i12, congresive 1210,1230 & 1250, Resinas de Uretano para Inyección.
15. Master Building Technologies, Sección 03700, CONGRESIVE, 1210, 1230, Y 1250, Boletín de Especificación 6S12. Reparaciones especiales de concreto, Impermeabilización de grietas y juntas.
16. Neville, A. M. **Tecnología del Concreto**. Tomos I y II. Traducción: Ing. Victor M. Pavón R. (México: Instituto mexicano del Cemento y del Concreto, 1980). 214 p.
17. Neville A. M. y J. J. Brooks. **Tecnología del Concreto**. (México: Editorial Trillas, 1,998). 232 p.
18. Park, T. pulay, T. **Estructuras de Concreto Reforzado**. Traducción: Ing. Sergio Fernández Everest. (México: Editorial Limusa, 1979). 223 p.
19. Winter, George y Nilson, Arthur H. **Proyecto de Estructuras de Hormigón**, Bogotá, Reverté, 1977. 721 p.

ANEXOS

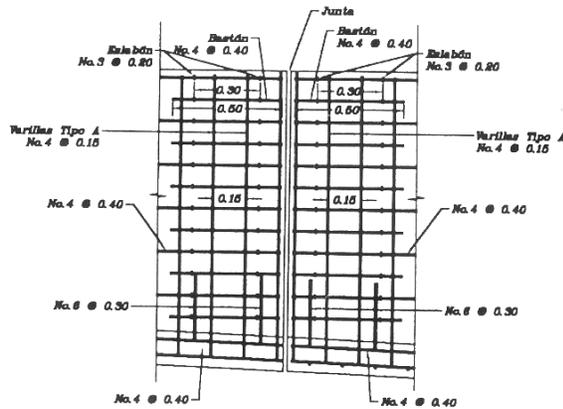
Continuación



SECCION TIPICA A-A DE
 ARMADURIA DEL SECTOR B
 ESCALA 1/25



ELEVACION TIPICA DE ARMADURIA
 DEL MURO - SECTOR B
 ESCALA HORIZONTAL 1/25 ESCALA VERTICAL 1/12.5



ELEVACION TIPICA

Fuente: Instituto Nacional de Electrificación

