

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



**“ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN DEL  
CONCRETO HIDRÁULICO, Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO  
DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO UTILIZADAS EN PAVIMENTOS Y PISOS  
INDUSTRIALES.”**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO POR:**

**ALEGRÍA RODRÍGUEZ, RUDY ERNESTO  
ÁLVAREZ HERRERA, JUAN CARLOS  
PEÑATE CASTRO, MARÍA ELENA**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**DOCENTE DIRECTOR:  
ING. JOEL PANIAGUA TORRES.**

**NOVIEMBRE, 2011**

**SANTA ANA**

**EL SALVADOR**

**CENTROAMERICA**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**AUTORIDADES**



**RECTOR**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**VICE-RECTOR ACADÉMICO**

**MASTER ANA MARIA GLOWER DE ALVARADO**

**SECRETARIA GENERAL**

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FISCAL GENERAL INTERINO**

**LIC. NELSON BOANERGES LOPEZ CARRILLO**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**

**AUTORIDADES**



**DECANO**

**DR. RAUL ERNESTO AZCUNAGA LOPEZ**

**VICE-DECANO**

**ING. WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRON**

**SECRETARIO**

**LICENCIADO VÍCTOR HUGO MERINO QUEZADA**

**JEFE DE DEPARTAMENTO**

**ING. SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCIA**

**DOCENTE DIRECTOR**

**ING. JOEL PANIAGUA TORRES**

## **Agradecimientos Generales.**

Primeramente a DIOS, TODOPODEROSO: quien con su inmensa sabiduría y bondad, nos ha dado las fuerzas para seguir adelante a pesar de las dificultades y poder de esta manera, culminar nuestra carrera con el trabajo de grado que se presenta.

A NUESTRA FAMILIA: Quienes en todo momento nos han brindado su apoyo total y desinteresado para poder lograr terminar nuestra carrera.

A LOS DOCENTES: Por ser las personas encargadas de proveernos el conocimiento y forjar el carácter necesario incentivando en nosotros el hábito de estudio, para posteriormente desempeñarnos en el ámbito profesional.

AL INSTITUTO SALVADOREÑO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO (ISCYC); Institución dedicada a la investigación que amablemente aceptó y ha realizado las gestiones necesarias para que la presente investigación se llevase a cabo, facilitándonos la asesoría técnica, biblioteca y laboratorio de Suelos y de materiales.

A LA EMPRESA HOLCIM EL SALVADOR: La cual por medio del Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC), nos ha brindado su apoyo en la realización de nuestro trabajo de grado, poniendo a nuestra disposición los materiales a utilizar.

AL CUERPO ASESOR: Por ser parte activa en la elaboración de este trabajo de grado. Especialmente a los ingenieros Joel Paniagua Torres y Carlos Antonio Quintanilla Rodríguez, por haber aceptado ser Docente director e Ingeniero Asesor respectivamente.

A NUESTROS AMIGOS Y COMPAÑEROS: Por brindarnos su apoyo y amistad en todo el recorrido de nuestra formación académica.

Y en general a todas las personas que de alguna manera u otra formaron parte, importante en el que hacer de nuestra actividad académica. ¡¡¡ INFINITAMENTE GRACIAS!!!

GRUPO DE TESIS

## **AGRADECIMIENTOS.**

### **A Dios todopoderoso.**

Por regalarme el don de la vida y permitirme cumplir uno de mis sueños más anhelados estando a mi lado en todo momento sobre todo en aquellos momentos difíciles en los cuales con su inmensa bondad me dio fuerzas para seguir adelante poniendo a mi lado personas de buen corazón que me tendieron la mano, ayudándome a seguir adelante en busca de mi sueño.

### **A mis padres.**

Manuel de Jesús Alegría y Rosa Elvira Rodríguez López, por brindarme su apoyo y amor en todo instante motivándome siempre a seguir adelante. Agradezco a mis padres por cumplir perfectamente la función delegada por Dios, la función de ser mis ángeles protectores aquí en la tierra, por eso y por todo lo que son les agradezco a ellos y a Dios por bendecirme grandemente al brindarme dos padres con los cuales puedo contar en todo momento.

### **A mis hermanos.**

Nery de Jesús, José Iván, Osmar Enrique y Guadalupe del Carmen; gracias por representar perfectamente el significado de un hermano estando presentes apoyándome en todo momento, especialmente en los momentos más difíciles.

### **A mis compañeros y amigos.**

A mis compañeros y amigos de estudio, gracias por la ayuda brindada a mi persona siempre y en todo momento, pero principalmente gracias por haberme brindado su amistad sincera y por haber estado cuando necesite de su ayuda, de sus consejos y de su apoyo. Agradezco a Dios por haber puesto en mi camino verdaderos amigos con los cuales he contado y estoy seguro que siempre contare.

### **A mis compañeros de tesis.**

A mis compañeros de tesis María Elena Peñate Castro por ser una excelente compañera, pero sobre todo por ser una linda amiga que siempre estuvo acompañándome en mis momentos más difíciles y por ser una bendición de amiga en mi vida; y a Juan Carlos Álvarez Herrera por ser un excelente amigo y compañero de trabajo de grado. Gracias a los dos por haber compartido esta experiencia conmigo; pero principalmente gracias por ser unos excelentes amigos con los cuales ha sido un grato placer realizar mi trabajo de grado. Dios los bendiga siempre y los proteja con su manto poderoso.

### **A mi grupo de trabajo.**

A María Elena Peñate Castro, Olivia Jeannette Cordero Rodríguez, Irma Inés Marinero Cerritos, Felipe Alfredo Rosa Hernández; unos excelentes amigos con los cuales desarrolle muchos trabajos escolares; pero sobre todo gracias por ser unas lindas personas que han llenado de dicha mi vida al brindarme su amistad. Agradezco especialmente a Raúl Alberto Peñate Magaña, por su valiosa ayuda a lo largo de toda mi carrera.

### **A mis catedráticos.**

A mis catedráticos de la universidad, gracias por haber compartido sus conocimientos con mi persona.

### **DEDICATORIA.**

Dedico este triunfo a Dios todopoderoso por otorgarme la bendición de culminar mi carrera; a mis padres que son una bendición en mi vida; a mis hermanos por ser unos excelentes personas, a mi familia por sus oraciones y a mis amigos y a todas aquellas personas que han estado apoyándome durante toda mi carrera, gracias.

**Rudy Ernesto Alegría Rodríguez.**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios Todopoderoso.**

Por ser la fuente inagotable de poder en mi vida y por estar siempre a mi lado mostrándome el camino que debo seguir. Gracias bendito Dios por cumplir la promesa que un día me diste y porque a pesar de las dificultades que tuve en el camino, tu siempre fuiste fiel y proveíste de manera sobrenatural todas las cosas necesarias para poder lograr mis metas trazadas.

### **A mis padres.**

JUAN BAUTISTA ÁLVAREZ TOBAR Y ZOILA ESPERANZA HERRERA, quienes me engendraron, cuidaron y me enseñaron el camino del bien mostrando a lo largo de mi vida su apoyo, comprensión, su fe en mi, su ejemplo de superación y en especial sus oraciones. Infinitamente gracias a las dos personas que más admiro y amo a quienes dedico este triunfo.

### **A mis hermanas.**

Porque siempre estuvieron pendientes de lo que necesitaba y por no escatimar de ninguna manera su apoyo moral y económico incondicional a mi persona, a Dios gracias por tener unas hermanas tan maravillosas. Agradezco de una manera especial a mi hermana SILVIA ÁLVAREZ, por su comprensión y ayuda ¡¡¡ MUCHAS, MUCHAS GRACIAS!!! Y Dios bendiga de una manera especial tu vida. A sí mismo a mis hermanas SONIA FLORES, JUDITH ÁLVAREZ, SANDRA ÁLVAREZ Y MARÍA ESTHER ÁLVAREZ, que Dios les bendiga y guarde siempre.

### **A mi demás familia.**

Le agradezco a toda mi familia que estuvo pendiente de mi persona en todo momento apoyándome anímicamente y materialmente, en los momentos más difíciles de mi carrera. Especialmente a mi primo JUAN ANTONIO HERRERA quien a pesar de la distancia que nos separaba fue como un ángel que Dios puso en mi camino para contribuir a lograr esta meta, ya que sin su ayuda hubiese sido muy difícil continuar," Gracias TONY". A todos mis tíos y primos por su apoyo, a mi abuela Ángela Tobar que en paz descansa por sus sabios consejos y a todos mis

sobrinos. También a mi cuñado JORGE CLAVEL. Deseando que Dios siempre los proteja y guarde donde quiera que se encuentren.

**A mis amigos.**

Por ser esas personas que siempre están cuando uno más los necesita en las buenas y las malas en especial Al Ingeniero WILBERT LÓPEZ, RUBÉN URIBE, DANIEL ROMERO, ROXANA AGUIRRE, CESAR HERNÁNDEZ Y CARLOS CÁCERES. A sí mismo al Pastor PABLO MARTÍNEZ y toda su congregación. Gracias por compartir su amistad y que Dios los guarde.

**A mis compañeros de trabajo de grado.**

Gracias por haber compartido juntos varios meses de trabajo en equipo, ya que sin la colaboración de cada uno de nosotros no hubiese sido posible coronar el triunfo logrado, y que no importando nuestras limitantes supimos llevar adelante lo que nos habíamos propuesto hasta alcanzarlo, gracias por su comprensión y esmero; espero asimismo que cosas buenas lleguen a sus vidas y puedan seguir cosechando nuevos triunfos. RUDY ERNESTO ALEGRÍA RODRÍGUEZ Y MARÍA ELENA PEÑATE CASTRO, muchas gracias por haber sido unos excelentes compañeros de mi trabajo de grado.

**Dedicatoria.**

Este logro se lo dedico especialmente a Dios Todopoderoso, a mis padres, a mis hermanas, amigos y a todas aquellas personas que directa o indirectamente formaron parte de este triunfo gracias por haber confiado en mí y que Dios los Proteja, guarde y bendiga siempre.

**Juan Carlos Álvarez Herrera.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios Todopoderoso;** papito Dios tu sabes que no tengo palabras para expresarte el agradecimiento que hay en mí, yo sé que no he sido muy buena contigo pero tu si lo has sido conmigo pues tu eres bueno y muy bondadoso, gracias porque con tu inmenso amor y sabiduría me has dado las fuerzas para seguir y llegar hasta aquí, tú has sido mi compañía en todo momento, gracias por escuchar mis oraciones y nunca soltar mi mano, yo sabía que con tu bendición mi sueño se haría realidad...Por favor nunca me sueltes porque yo sin ti no se vivir...TE AMO.

**A la virgen María;** mamita María a ti agradezco porque has sido mi intercesora en tantos milagros por los que he pedido durante toda mi vida, tú con tu inmenso amor de madre me has cubierto con tu manto y me has protegido.

**A mis padres; Isabel Castro y José Alvaro Peñate.** Tengo tanto que agradecerle mamá y es que usted me ha dado tanta fuerza, tantos ánimos y ha creído siempre en mí. Yo sé muy bien que este sueño alcanzado nos pertenece a ambas pues siempre me ha mostrado su alegría cuando me ha ido bien, su inmenso apoyo y ricos abrazos que me han confortado cuando algo me ha salido mal. Gracias por confiar siempre en mi y aunque nos ha sido difícil usted ha tenido la fuerza para trabajar y darme lo que he necesitado...mami usted es mi sol. Gracias papi por su disposición cuando lo he necesitado, yo se que al igual que mi mami usted está orgulloso porque su pequeña hija ha cumplido su sueño.

**A mis hermanos y hermanas;** a mis cuatro hermanos Alvarito, Luis, Orlando y Miguel...recuerdo que cuando les platiqué lo que quería estudiar en la U, no mucho compartieron mi idea...yo sé que ahora piensan diferente y que comparten mi felicidad y por eso y todo su apoyo les agradezco de todo corazón. A mis dos hermanas Candy y Marina se que desde que nací no hemos podido compartir mucho pero gracias a ambas por todo su amor, apoyo, y sus oraciones que siempre les pedido por que ahora estamos viendo los frutos.

**A mis sobrinos, mis cuñadas y mi cuñado;** a mis sobrinos por iluminar mis días cuando mis preocupaciones me los nublaban, a mis cuatro cuñadas y mi cuñado por el apoyo incondicional que de una u otra forma me han brindado.

**A mi demás familia;** agradezco a mis tíos, primos y demás familia que de una u otra forma me han apoyado no solo en mi carrera sino en toda mi vida.

**A mis amigos;** infinito agradecimiento a Irma Marinero, Olivia Cordero y Felipe Rosa por haber compartido juntos tres años muy importantes en nuestra carrera, riendo y llorando pero hoy felices al fin. A Edwin Sarmiento, Armando Avilés y Milton Morales por ser grandes amigos y compañeros, y muy especialmente a los Ingenieros Edwin Avelar, Carlos Martínez, Mercedes Rivas y Lesser Linares por su inmensa ayuda a lo largo de mi carrera. También te agradezco a ti que estás leyendo esto y esperabas encontrar tu nombre aquí porque lo mereces, pues has estado conmigo ya sea en la carrera o en algún momento de mi vida llenándola de alegría, escuchando mis quejas y sufrimientos, apoyándome y dándome ánimos para salir adelante ...a ti te digo de todo corazón GRACIAS.

**A mi mejor amiga;** Daysi Esmeralda Morán, gracias amiga porque tú has estado conmigo en toda mi carrera, me has escuchado, me has apoyado, me has dado ánimos para salir adelante, y sé que estas tan feliz como yo...los amigos verdaderos son ángeles que Dios pone en nuestro camino para iluminarnos y corregirnos con amor en todo momento, eso significas tu en mi vida.

**A mis compañeros de trabajo de grado;** a ustedes mis queridos amigos les agradezco de todo corazón, por que juntos es como hemos logrado salir adelante, sé que no ha sido fácil, pero estoy contenta de que haya sido así pues a lo fácil no se le haya sabor...Gracias Rudy tú has sido mi compañero de batalla y mi super amigo.

**Dedicatoria;** este es mi sueño y se lo dedico con todo mi amor a mi Diosito lindo, mi virgencita y a mi dulce Mamá.

**María Elena Peñate Castro.**

## INDICE GENERAL.

RESUMEN EJECUTIVO.	xxv
CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION.	
1.1 Antecedentes.	28
1.2 Planteamiento de la investigación a realizar.	29
1.3 Objetivos.	30
1.3.1 Objetivo general.	30
1.3.2 Objetivos específicos.	30
1.4 Alcances.	30
1.5 Limitantes.	32
1.6 Justificaciones.	33
CAPITULO II. TEORIA ELEMENTAL PARA LA INVESTIGACION.	
2.1 Introducción.	35
2.2 Definición y componentes del concreto.	35
2.2.1 Definición de concreto hidráulico.	35
2.2.2 Componentes del concreto hidráulico.	36
2.3 Agregados del concreto.	37
2.3.1 Concepto de agregado.	38
2.3.2 Clasificación de agregados para concreto hidráulico.	38
2.3.3 Tipos de agregado para concreto hidráulico.	39
2.3.4 Propiedades de los agregados del concreto.	41
2.4 Cementos para concreto hidráulico.	42
2.4.1 Tipos de cemento ASTM C-1157.	43
2.5 Agua para concreto hidráulico.	44
2.6 Aditivos para concreto hidráulico.	45
2.7 La adherencia agregado – pasta.	47
2.7.1 Adherencia agregado – pasta en estado fresco.	47
2.7.2 Adherencia agregado – pasta en estado endurecido.	48
2.8 Características del concreto en estado fresco.	50
2.8.1 Uniformidad.	50

2.8.2 Homogeneidad.	50
2.8.3 Trabajabilidad.	51
2.8.4 Revenimiento.	53
2.8.5 Consistencia (cohesión y viscosidad).	53
2.8.6 Tiempo de fraguado.	55
2.8.7 Segregación y exudación.	56
2.9 Características del concreto en estado endurecido.	56
2.9.1 Propiedades.	56
2.9.2 Resistencia mecánica.	57
2.9.3 Resistencia a la fatiga.	58
2.9.4 Resistencia a la abrasión y la erosión.	59
2.9.5 Modulo de elasticidad.	60
2.10 Expansión y contracción en el concreto hidráulico.	63
2.10.1 Definición de contracción.	64
2.10.2 Tipos de contracciones.	65
2.10.3 Definición de expansión.	74
2.10.4 Causas de la expansión.	74
2.10.5 Tipos de agrietamiento.	75
2.10.6 Coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.	76
2.11 Pavimentos rígidos y pisos industriales.	78
2.11.1 Estructuración y tipos de pavimentos rígidos.	79
2.11.2 Estructuración y tipos de pisos industriales.	80
2.11.3 Tipos de juntas.	87
2.11.4 Efectividad de las juntas.	90
2.11.5 Diseño de juntas en pavimentos rígidos y pisos industriales.	91
2.11.6 Selladores de juntas.	95
2.11.7 Tipos de sellantes.	96
2.12 Diseños de mezcla de concreto.	100
2.12.1 Factores a tomar en cuenta en el diseño de la mezcla para determinar la durabilidad del concreto.	101
2.11.2 Graduación de los agregados en el diseño de la mezcla.	102

### CAPITULO III. CARACTERIZACION DE MATERIALES Y DISEÑOS DE MEZCLA.

3.1	Introducción.	105
3.2	Método de la American Concrete Institute ACI (211.1) (97)	105
3.2.1	Descripción del método ACI 211.1	106
3.2.2	Procedimiento.	106
3.3	Normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM).	119
3.4	Cemento.	120
3.5	Agregado fino.	121
3.5.1	Granulometría y modulo de finura del agregado fino (ASTM C-136).	122
3.5.2	Gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTM C-128).	126
3.5.3	Resumen y análisis de resultados.	131
3.6	Agregado grueso.	133
3.6.1	Granulometría de agregado grueso (ASTM C-136).	134
3.6.2	Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C -127).	139
3.6.3	Densidad bruta (peso unitario) (ASTM C -29).	143
3.6.4	Resistencia al desgaste de agregado grueso (ASTM C-131).	146
3.6.5	Resumen y análisis de resultados.	149
3.7	Desarrollo de diseño de mezcla.	150
3.7.1	Cuadro resumen de datos a utilizar en el diseño de mezcla, obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados (ASTM C-136).	151
3.7.2	Aplicación del método ACI 211.1	151
3.7.3	Resultados obtenidos de especímenes de concreto elaborados con diseños de mezcla.	159
3.7.4	Diseños de mezcla óptimos.	160
CAPITULO IV. MEDICION DE CAMBIOS LONGITUDINALES EN EL CONCRETO HIDRAULICO.		
4.1	Introducción.	163
4.2	Procedimiento de ensayo para la medición de los cambios longitudinales del concreto.	164
4.2.1	Norma ASTM C 157/C 157M.	164
4.3	Elaboración de probetas de ensayo.	170

4.3.1	Fabricación del concreto hidráulico.	170
4.3.2	Ensayos de control de calidad al concreto en estado fresco.	170
4.3.3	Colado y curado de las probetas de ensayo.	179
4.4	Monitoreo de cambios longitudinales en el concreto.	183
4.4.1	Equipo necesario para la medición de cambios longitudinales.	183
4.4.2	Calibración y montaje de equipo para realizar la medición de cambios longitudinales.	184
4.4.3	Descripción de procedimiento de monitoreo de expansión y contracción en las probetas de ensayo.	185
4.5	Ensayos de resistencia a la compresión y flexión del concreto.	188
4.5.1	Ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C-39).	188
4.5.2	Ensayo de resistencia a la flexión (ASTM C-78).	189
4.5.3	Ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto (Modulo de elasticidad dinámica del concreto).	189
<b>CAPITULO V. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.</b>		
5.1	Introducción.	195
5.2	Tabulación y grafico de resultados obtenidos de medición de cambios longitudinales.	196
5.2.1	Tabulación de resultados.	196
5.2.2	Gráficos de resultados obtenidos de coeficientes de cambio longitudinal del concreto.	200
5.3	Análisis correlativos entre variables.	202
5.3.1	Análisis correlativo entre coeficientes y resistencia a la compresión del concreto.	202
5.3.2	Análisis correlativo entre coeficientes y modulo de elasticidad dinámico del concreto.	202
5.3.3	Análisis correlativo entre coeficientes y modulo de elasticidad estático del concreto.	204
5.4	Tabulación de coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.	207
5.5	Análisis e interpretación de resultados obtenidos de medición de cambios longitudinales.	208

## CAPITULO VI. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LOS COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO.

6.1	Introducción.	212
6.2	Aplicaciones prácticas del uso de los coeficientes de expansión y contracción del concreto.	213
6.3	Ejemplos prácticos del uso de los coeficientes de expansión y contracción del concreto.	214
6.3.1	1 <sup>er</sup> Escenario: Ejemplos de cálculo para MR=36 kg/cm <sup>2</sup> , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficiente de expansión térmica del concreto propuestos por AASHTO.	218
6.3.2	2 <sup>do</sup> Escenario: Ejemplos de cálculo para MR=45 kg/cm <sup>2</sup> , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficiente de expansión térmica del concreto propuestos por AASHTO.	220
6.3.3	3 <sup>er</sup> Escenario: Ejemplos de cálculo para MR=36 kg/cm <sup>2</sup> , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficiente de expansión térmica del concreto determinados en el salvador.	222
6.3.4	4 <sup>to</sup> Escenario: Ejemplos de cálculo para MR=45 kg/cm <sup>2</sup> , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficiente de expansión térmica del concreto determinados en el salvador.	225
6.4	Comparaciones entre ejemplos prácticos.	227
6.4.1	Análisis para el 1 <sup>er</sup> escenario.	227
6.4.2	Análisis para el 2 <sup>do</sup> escenario.	229
6.4.3	Análisis entre 1 <sup>er</sup> y 2 <sup>do</sup> escenario.	230
6.4.4	Análisis para el 3 <sup>er</sup> escenario.	231
6.4.5	Análisis para el 4 <sup>to</sup> escenario.	232
6.4.6	Análisis entre 3 <sup>er</sup> y 4 <sup>to</sup> escenario.	234
6.4.7	Análisis entre escenarios.	234

## CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1	Conclusiones.	237
7.2	Recomendaciones.	243
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	245
	ANEXOS.	248

## INDICE DE TABLAS.

NUMERO	NOMBRE	PAGINA
CAPITULO I		
1.1	Coefficientes de contracción por secado a los 28 días.	29
CAPITULO II		
2.1	Clasificación, propiedades y aplicaciones de aditivos.	46
2.2	Revenimientos recomendados.	53
2.3	Calidad del concreto en función de la velocidad de la onda en el medidor de pulso ultrasónico.	62
2.4	Cambios longitudinales del concreto.	73
2.5	Coefficientes de contracción por secado del concreto.	77
2.6	Coefficiente de expansión térmica del concreto basado en el tipo de agregado (basado en el agregado fino y grueso).	78
2.7	Soluciones a requerimientos superficiales de losas de concreto.	82
2.8	Espaciamiento de juntas recomendado para pavimentos de concreto.	92
2.9	Tamaños recomendados para sellos de compresión preformados.	98
2.10	Tamaños recomendados para cordones de respaldo.	99
CAPITULO III		
3.1	Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción.	107
3.2	Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaño nominal máximo de agregados.	110
3.3	Relación Agua/Cemento (A/C) y la resistencia a la compresión del concreto.	113
3.4	Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.	116
3.5	Primera estimación del peso del concreto fresco.	118
3.6	Masas parciales retenidas de análisis granulométrico de	124

	agregado fino. Masa inicial: 367gramos.	
3.7	Resultados de análisis granulométrico de agregado fino.	125
3.8	Datos obtenidos de ensayo de Gravedad específica y Absorción.	130
3.9	Resultados de ensayo de Gravedad específica y absorción.	131
3.10	Características del agregado fino.	131
3.11	Datos obtenidos de Análisis granulométrico de agregado grueso. Masa inicial: 6971 gramos.	136
3.12	Resultado obtenido de Análisis granulométrico de agregado grueso.	137
3.13	Datos obtenidos de Ensayo de gravedad específica y absorción de agregado grueso.	141
3.14	Resultados obtenidos de Ensayo de gravedad específica y absorción de agregado grueso.	142
3.15	Datos obtenidos de Ensayo de densidad bruta (Peso Unitario) y vacíos en los agregados.	145
3.16	Graduación de la muestra de ensayo.	147
3.17	Características de agregado grueso (grava).	149
3.18	Datos de materiales para diseño de mezcla.	151
3.19	Estimación de contenido de agregado fino.	154
3.20	Corrección de agua de mezclado.	155
3.21	Cantidades de materiales para 1 m <sup>3</sup> , MR= 36 kg/cm <sup>2</sup> .	155
3.22	Estimación de contenido de agregado fino.	158
3.23	Corrección de agua de mezclado.	158
3.24	Cantidades de materiales para 1 m <sup>3</sup> , diseño MR= 45 kg/cm <sup>2</sup> .	159
3.25	Resultados de ensayos realizados a especímenes de concreto.	159
3.26	Diseño de mezcla óptimo para MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	160
3.27	Diseño de mezcla óptimo para MR=45 kg/cm <sup>2</sup> .	161
CAPITULO IV		
4.1	Revenimientos en pulgadas de bachadas de concreto.	171

4.2	Resultados de ensayo de peso unitario y contenido de aire del concreto.	171
4.3	Temperaturas de bachadas de concreto para elaborar las vigas del ensayo de cambio longitudinal.	172
4.4	Tiempo de fraguado para diseño de mezcla MR= 36 kg/cm <sup>2</sup> .	175
4.5	Valores logarítmicos MR= 36 kg/cm <sup>2</sup> .	176
4.6	Tiempos de fraguado para diseños de mezcla.	178
4.7	Lecturas iniciales de cambio de longitud.	182
4.8	Lecturas de cambio longitudinal en especímenes de ensayo.	186
4.9	Resultados de ensayos de resistencia a la compresión.	188
4.10	Resultados de ensayos de resistencia a la flexión.	189
4.11	Módulo de elasticidad dinámico del concreto.	192

#### CAPITULO V

5.1	Lecturas de cambio longitudinal iniciales en los especímenes de concreto.	197
5.2	Datos de mediciones de cambio longitudinal.	197
5.3	Análisis estadístico de coeficientes de expansión y contracción del concreto.	199
5.4	Coefficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.	200
5.5	Relación empírica entre módulo estático, dinámico y velocidad de pulso ultrasónico en el concreto.	205
5.6	Módulos de elasticidad estáticos del concreto, determinados por interpolación.	205
5.7	Coefficientes de expansión y contracción definitivos del concreto hidráulico.	207

## INDICE DE GRAFICOS.

NUMERO	NOMBRE	PAGINA
CAPITULO II		
2.1	Posibles evoluciones de los cambios longitudinales del concreto.	64
CAPITULO III		
3.1	Curva granulométrica de agregado fino.	126
3.2	Curva granulométrica de agregado grueso.	138
CAPITULO IV		
4.1	Tiempo de fraguado con datos experimentales MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	176
4.2	Tiempo de fraguado MR= 36 kg/cm <sup>2</sup> .	178
CAPITULO V		
5.1	Coefficientes de expansión y contracción del concreto.	201
5.2	Comparación de coeficientes de expansión y contracción determinados.	201
5.3	Correlación entre coeficientes y resistencia a la compresión del concreto.	203
5.4	Correlación entre coeficientes y módulos de elasticidad dinámicos del concreto.	203
5.5	Correlación entre coeficientes y módulo de elasticidad estático del concreto.	206
5.6	Módulos de elasticidad estáticos obtenidos y calculados utilizando formulas propuestas por ACI y AASHTO, para MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	206
5.7	Módulos de elasticidad estáticos obtenidos en la investigación y calculados utilizando formulas propuestas por ACI y AASHTO, para MR=45 kg/cm <sup>2</sup> .	207
CAPITULO VI		
6.1	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y diferentes gradientes de temperatura, para concreto con MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	228

6.2	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y 3.25*4.50 metros y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	228
6.3	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y diferentes gradientes térmicos, para concreto con MR=45 kg/cm <sup>2</sup> .	229
6.4	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y 3.25*4.50 metros y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=45 kg/cm <sup>2</sup> .	230
6.5	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	231
6.6	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y 3.25*4.50 metros y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=36 kg/cm <sup>2</sup> .	232
6.7	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y diferentes gradientes térmicos, para concreto con MR=45 kg/cm <sup>2</sup> .	233
6.8	Resultados para losas de concreto de 3.25*3.25 metros y 3.25*4.50 metros y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=45kg/cm <sup>2</sup> .	233

### INDICE DE FIGURAS.

NUMERO	NOMBRE	PAGINA
CAPITULO II		
2.1	Agrietamiento inicial en un pavimento de concreto sin juntas.	65
2.2	Grietas por contracción plástica.	67
2.3	Grietas por asentamiento plástico.	67
2.4	Mecanismo de la contracción por secado.	69
2.5	Estructuración de pavimentos rígidos.	80
2.6	Estructuración pisos industriales, fuente ACI 360R-06	83
2.7	Tipos de juntas en pavimentos de concreto.	87

2.8	Esquema de grieta inducida, Fuente: Instituto Mexicano del Concreto.	88
2.9	Efectividad de la transferencia de carga.	91
<b>CAPITULO VI</b>		
6.1	Elementos de junta de contracción	217

### **INDICE DE FOTOGRAFIAS.**

<b>NUMERO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>PAGINA</b>
<b>CAPITULO III</b>		
3.1	Método de cuarteo para agregado fino por apilado en miniatura.	123
3.2	Tamizado mecánico de muestra.	123
3.3	Procedimiento de pesado de porciones retenidas en mallas.	123
3.4	Muestra de ensayo, para pruebas de gravedad específica y absorción de agregados finos.	128
3.5	Saturación con agua de espécimen de ensayo.	128
3.6	Eliminación de excedente de agua.	128
3.7	Prueba manual para alcanzar la condición superficie superficialmente seca (SSS) de la muestra.	129
3.8	Procedimiento de pesado de picnómetro más contenido de agua.	129
3.9	Peso de masa de picnómetro más contenido de agua y agregado.	130
3.10	Homogenización de agregado grueso.	133
3.11	Cuarteo manual de agregado grueso.	134
3.12	Cuarteo mecánico de agregado grueso.	135
3.13	Determinación de masa del tamaño de la muestra.	135
3.14	Juego de mallas, para tamizar el agregado grueso.	136
3.15	Tamizado manual de agregado grueso.	136

3.16	Lavado de muestra para ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso.	140
3.17	Saturación de muestra de agregado grueso.	140
3.18	Peso de muestra de agregado grueso en condición SSS.	140
3.19	Muestra de agregado grueso en contenedor.	141
3.20	Determinación de masa aparente en agua.	141
3.21	Cantidad de agregado grueso para ensayo de Densidad Bruta.	144
3.22	Varillado en ensayo de Densidad Bruta.	144
3.23	Determinación de masa en ensayo de densidad bruta.	145
3.24	Muestra de ensayo mas carga abrasiva en maquina de los ángeles.	148
3.25	Muestra ensayada en maquina de los ángeles.	148
3.26	Tamizado de muestra ensayada en maquina de los ángeles.	148

#### CAPITULO IV

4.1	Tamizado de concreto para ensayo de tiempo de fraguado.	173
4.2	Colocación de mortero en moldes de ensayo para tiempos de fraguado.	173
4.3	Ensayo de tiempos de fraguado.	174
4.4	Coloración de pernos de calibración en moldes.	180
4.5	Acomodamiento manual de concreto en moldes.	180
4.6	Consolidación de vigas para medir cambio longitudinal.	180
4.7	Acabado final de vigas para medir cambio longitudinal.	181
4.8	Remoción de dispositivos sujetadores de tornillos de calibración.	181
4.9	Desenmoldaje de vigas de concreto para medir cambio longitudinal.	181
4.10	Desenmoldaje de vigas de concreto para medir cambio longitudinal.	181
4.11	Curado de vigas de concreto para medir cambio longitudinal.	182
4.12	Toma de lectura inicia*I de cambio longitudinal.	182

4.13	Montaje de dispositivo de medición de cambio longitudinal.	184
4.14	Calibración de dispositivo de medición de cambio longitudinal.	184
4.15	Especímenes sumergidos en agua antes de medición.	185
4.16	Preparación del espécimen antes de toma de lectura de cambio longitudinal.	185
4.17	Toma de lectura de cambio longitudinal.	186
4.18	Preparación de equipo generador de pulso ultrasónico.	191
4.19	Engrasado de caras de transductores.	191
4.20	Ajuste de tiempo cero utilizando los transductores.	191
4.21	Aplicación de agente de acoplamiento en espécimen.	192
4.22	Ensayo de pulso ultrasónico.	192

## INDICE DE ANEXOS.

NUMERO	NOMBRE	PAGINA
1	Norma ASTM Designation: C 157/C 157/M -06 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-CEMENT mortar and Concrete.	249
2	Procedimientos de ensayos realizados en la sección 4.3 Elaboración de probetas de ensayo.	257
3	Formularios con los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas en laboratorio, en la etapa de caracterización de materiales.	278
4	Formularios con los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas en laboratorio, en la etapa de monitoreo, ensayos no destructivos y ensayos destructivos a especímenes de concreto.	286
5	Tabla de relación empírica entre el modulo de elasticidad estático, módulo de elasticidad dinámico y velocidad de pulso del concreto hidráulico.	293
6	Curva de relación entre velocidad de pulso con el módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto hidráulico.	295

7	Tabla de coeficientes de expansión térmica obtenidos de tesis Determinación del Coeficiente de Expansión Térmica del Concreto Hidráulico para Espaciamento entre Juntas en Pavimentos de Concreto en El Salvador.	297
8	Hojas de resultados de ejemplos de cálculos de diseño de juntas, utilizando el programa para diseño de pavimentos DARWin Pavement Design and Analysis System Versión 3.01.	299

## RESUMEN EJECUTIVO.

Atendiendo a la necesidad que se tiene de profundizar en el conocimiento de la tecnología del concreto en El Salvador, se presenta la siguiente investigación encaminada a analizar los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico obtenidos de dos tipos de mezclas realizadas bajo condiciones y constitutivos locales, a través del procedimiento de ensayo que establece la norma ASTM Designation: C 157/C 157/M -06 para el monitoreo de cambios longitudinales en el concreto.

Esta investigación consta de siete Capítulos; en los cuales en el primer capítulo se presenta de una manera sintética el anteproyecto, al cual se le denomina Aspectos generales de la investigación. En el capítulo II se desarrolla el marco teórico necesario que enriquece el conocimiento previo de temas indispensables para el desarrollo de la investigación. Continuando en el capítulo III con el desarrollo de manera sistemática y ordenada de una serie de pruebas de laboratorio basadas en las normas ASTM para la Caracterización de agregados; cuyo objetivo final es obtener dos diseños de mezcla, uno para un módulo de ruptura de  $36 \text{ kg/cm}^2$  y el otro para un módulo de ruptura de  $45 \text{ kg/cm}^2$ , para así realizar la elaboración de especímenes para realizar ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, modulo de elasticidad dinámico y monitoreo de cambios longitudinales, desarrollado de forma detallada en el capítulo IV de este documento titulado Medición de cambios longitudinales en el concreto hidráulico, en el cual se describe el procedimiento de ensayo para la elaboración y curado de los especímenes para la medición de los cambios longitudinales dando como resultado la toma de lecturas en éstos a diferentes edades para la determinación de los coeficientes, cuyo procesamiento de resultados se presenta en el Capítulo V para su respectiva conclusión y análisis. En el capítulo 6 se presenta una serie de ejemplos prácticos de diseño de juntas, a través de la formula empírica para determinar el ancho de grieta inducida y utilizando el software de diseño AASHTOWare Darwin 3.01 (Pavement Design and Analysis

System), utilizando datos obtenidos en el desarrollo de la investigación como son: Módulos de elasticidad estáticos, Módulos de ruptura, coeficientes de contracción y coeficientes de expansión térmica, estos últimos obtenidos de una tesis elaborada paralela a la presente por la Facultad Multidisciplinaria de Oriente de la Universidad de El Salvador, comparando estos resultados con los obtenidos utilizando datos de diseño proporcionados por AASHTO.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos de la investigación.

# **CAPITULO I**

## **ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION.**

## **1.1 ANTECEDENTES.**

El concreto cambia ligeramente de volumen por varias razones, la comprensión de la naturaleza de estos cambios es útil para el planeamiento y el análisis de las obras en concreto; el control de las variables que afectan éstos cambios puede minimizar las tensiones y el agrietamiento. Para tomar en consideración lo antes mencionado se hace uso de los coeficientes de expansión y contracción del concreto, coeficientes que en la actualidad son provenientes de investigaciones realizadas en otros países, como por ejemplo: Japón y Estados Unidos, los cuales han tomado a bien realizar investigaciones sobre la expansión y contracción, por lo tanto cuentan con coeficientes que representan y han sido determinados bajo las características de los constitutivos (cemento, gravas, arenas), el clima y todas las condiciones con las que cuentan como país; ya que es muy claro que el comportamiento de la mezcla de concreto se desarrollará de acuerdo a estos factores antes mencionados y que son propios en cada país.

En El Salvador no se ha realizado un estudio sobre los cambios longitudinales que experimenta el concreto, que esté al alcance de la población, para que pueda servir como referente a ser utilizado en investigaciones recientes, motivo por el cual se propone esta investigación en colaboración con el Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC) cuyo objeto principal es determinar los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, enfocado en el área de pavimentos y pisos industriales, ya que en los últimos años con el objetivo de maximizar la eficiencia de las inversiones en construcciones y mantenimiento de pavimentos, se ha aumentado considerablemente la inversión en pavimentos de concreto hidráulico, los cuales requieren de un diseño y modulación adecuada de juntas para controlar, orientar y ordenar la fisuración natural del concreto.

Un estimado del valor de contracción, basado en la resistencia indirecta a la tracción de 28 días, puede ser obtenido de la Tabla 1.1

**Tabla 1.1 Coeficientes de contracción por secado a los 28 días.**

<b>Resistencia Indirecta a la tracción, kpa (psi) a los 28 días.</b>	<b>Contracción, mm/mm o pulg/pulg</b>
≤ 2,100 (300)	0.0008
2,800 (400)	0.0006
3,400 (500)	0.00045
4.100 (600)	0.0003
≥ 4800 (700)	0.0002

Ref: AASHTO Design Guide, Section 2.5.2 and Table 2.9.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN A REALIZAR.**

El concreto es, y continúa siendo, el material de construcción más ampliamente usado en el mundo, gracias a su durabilidad potencial y a la facilidad con que puede ser moldeado en una gran variedad de formas y tamaños, también contribuyen a su popularidad como material de construcción la facilidad con que pueden obtenerse sus componentes más básicos: cemento, agregados, y agua.

La investigación se realiza con el fin de profundizar en el campo del conocimiento de la tecnología del concreto, realizando para ello un estudio de los cambios longitudinales que experimenta el concreto en estado endurecido, específicamente en el estudio de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico; los cuales representan una gran utilidad para optimizar los procedimientos de diseño de juntas, logrando mejores modulaciones de las mismas y así contribuir a evitar que se formen grietas transversales intermedias o aleatorias.

### **1.3 OBJETIVOS.**

#### **1.3.1 Objetivo General:**

Realizar una evaluación de diversas mezclas de concreto elaboradas en condiciones y con constitutivos locales, cuya finalidad sea analizar los coeficientes de expansión y contracción del mismo; contribuyendo de tal forma con el desarrollo de la tecnología del concreto en El Salvador.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Realizar dos diseños de mezcla con módulos de ruptura de  $36 \text{ kg/cm}^2$  y  $45 \text{ kg/cm}^2$ , a utilizarse en la elaboración de especímenes de concreto para ser sometidos a ensayos de compresión, flexión y cambio longitudinal, en edades de 7, 14, 28, y 56 días.
- Establecer un análisis comparativo de rangos de coeficientes de expansión y contracción obtenidos en mezclas de concreto hidráulico diseñados con módulos de ruptura de  $36 \text{ kg/cm}^2$  y  $45 \text{ kg/cm}^2$ , a edades de 7, 14, 28 y 56 días.
- Proponer aplicaciones prácticas de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, utilizados en el diseño y construcción de pavimentos rígidos y pisos industriales.
- Optimizar los procedimientos de diseño de juntas en pavimentos rígidos y pisos industriales a través de la aplicación de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.

### **1.4 ALCANCES.**

- A través de la investigación planteada, se determinarán los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, aplicables en el diseño de juntas en pavimentos rígidos y pisos industriales.

- Para realizar el estudio de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, se tomará en consideración el procedimiento de ensayo que establece la norma ASTM Designación: C 157/C 157M; evaluando dos diseños de mezcla realizados según el método que establece el código ACI<sup>1</sup> 211.1, manteniendo constante la naturaleza de los agregados y con módulos de ruptura de 36 kg/cm<sup>2</sup> y 45 kg/cm<sup>2</sup>; se utilizará cemento bajo la norma ASTM C1157 tipo HE (conocido comercialmente en El Salvador como Holcim CessaPav, generando seis probetas a ensayar en total, tres por cada diseño de mezcla, con dimensiones de 100 mm (4 pulgadas) por lado y de una longitud aproximada de 500 mm (19.7 pulgadas). El periodo de monitoreo de las probetas será de 56 días, realizando ensayos de expansión y contracción a las probetas a los 7,14, 28 y 56 días de edad del concreto. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados serán procesados estadísticamente para determinar los coeficientes de expansión y contracción del concreto.
- Como resultado de la investigación realizada al tema planteado se compararán los coeficientes de expansión y contracción obtenidos con los que se están utilizando actualmente para obtener las conclusiones pertinentes, y se propondrán aplicaciones prácticas sobre el uso de dichos coeficientes en el diseño de juntas en pavimentos de concreto rígidos y pisos industriales.
- A través de la realización del estudio los especialistas en el diseño de pavimentos rígidos y pisos industriales en El Salvador podrán contar con coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, determinados bajo condiciones Normadas según la ASTM C 157; quedando a su criterio su utilización en posteriores investigaciones que evalúen condiciones que no se encuentran normadas pero que son representativas de las condiciones en que un pavimento trabaja, como por ejemplo almacenamiento al aire sin curado.

---

<sup>1</sup>American Concrete Institute

## 1.5 LIMITANTES.

- Los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico obtenidos a través de la investigación, tendrán aplicabilidad solamente para concretos hidráulicos utilizados en pavimentos rígidos y por la similitud de las obras se utilizarán en pisos industriales.
- No se analizará el fenómeno del cambio longitudinal del concreto en estado plástico o antes de las 24 horas, debido a que no se cuenta con transductores de desplazamiento electrónicos de alta precisión.
- Para realizar la investigación, las dimensiones de los moldes con que se cuenta para fabricar los especímenes de concreto empleados en la medición de los cambios longitudinales son de una sección transversal cuadrada de 100 mm (4 pulgadas) de lado, correspondientes al agregado que pasa totalmente el tamiz de 50 mm (2 pulgadas); sin embargo los agregados utilizados en la investigación son los producidos comercialmente en el país (agregado que pasa en un 100% el tamiz de 25 mm), para los cuales la Norma ASTM C157 sugiere la utilización de un molde de una sección transversal cuadrada de 75 mm (3 pulgadas) de lado.
- Según la Norma ASTM C 157, luego de realizar la medición al final del periodo de curado (lectura a 28 días), los especímenes deben ser almacenados de acuerdo con alguna de las siguientes dos opciones; la primera en tanques de agua saturada con cal, y la segunda en almacenamiento al aire en un cuarto de secado que se mantenga a una humedad relativa de  $50 \pm 4 \%$ , mientras que los especímenes están a una temperatura de  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $73 \text{ }^\circ\text{F} \pm 3 \text{ }^\circ\text{F}$ ). Por no contar con el cuarto de secado que mantenga las condiciones especificadas para realizar el almacenamiento al aire, solo se realizará el primer método de almacenaje.

## 1.6 JUSTIFICACIONES.

- Los cambios volumétricos del concreto hidráulico, ya sean de expansión o contracción tienen su mayor incidencia en las obras civiles viales, lo que justifica que al estudiar el fenómeno de la expansión y contracción del concreto el principal enfoque sea hacia el área de pavimentos; pues al estar constituidos por un sistema de losas continuas requieren de juntas para controlar la tensión y el agrietamiento que se genera en las mismas, para lo cual se requiere del conocimiento de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico ya que haciendo uso de estos, es como se establecen dimensiones de cajas de reservorios en juntas de expansión y contracción del concreto hidráulico; éstos coeficientes dependen directamente de los módulos de ruptura y de los materiales, e indirectamente de las condiciones climáticas que se poseen en cada país; por lo que es de relevante importancia que se determinen con las características de los materiales que se poseen en El Salvador.
- Los cambios volumétricos del concreto, aparte de producir una superficie deficiente, facilita el agrietamiento en la estructura del pavimento rígido; lo que reduce la comodidad y el confort de los usuarios de la carretera, promueve la degradación estructural y disminuye la vida útil de la obra de infraestructura vial. La aplicación de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, adecuados; garantizarán en gran medida la eficiencia de las juntas y por ende el buen desempeño de la carretera.
- Con el desarrollo de la investigación se contribuirá en diversas áreas de la industria de la construcción, ya que los coeficientes a determinar no solo podrán ser utilizados en el diseño de obras de infraestructura viales, sino también en obras afines como lo es la construcción de pisos industriales.

## **CAPITULO II**

# **TEORÍA ELEMENTAL PARA LA INVESTIGACIÓN.**

## **2.1. INTRODUCCIÓN.**

Después de definir las generalidades del proyecto en el Capítulo I, las cuales dan a conocer la problemática que será abordada en este estudio, es necesario darle relevancia a los temas que constituyen la base de la investigación y sobre los cuales girará el desarrollo del estudio en mención. Uno de los temas de gran relevancia es el concreto hidráulico y sus componentes, definiéndose este como todo producto o masa fabricado con un medio cementante, constituido generalmente por tres componentes esenciales los cuales son: cemento, agua y agregados, y uno ocasional que genéricamente se designa como aditivo.

Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como bachada de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire. También se describirán de manera breve los agregados, sus tipos y propiedades; así mismo, las características del concreto hidráulico en su estado fresco como endurecido.

Además, se describirán los fenómenos de expansión y contracción en el concreto, el análisis de los mismos es indispensable para la realización de este estudio. Los pavimentos rígidos, pisos industriales, diseño de juntas, métodos de diseño de mezclas, reglamentos, normas, pruebas y ensayos aplicables, son otros de los temas que se tratan en el capítulo II.

## **2.2. DEFINICIÓN Y COMPONENTES DEL CONCRETO.**

### **2.2.1. Definición de concreto hidráulico.**

El concreto es el producto obtenido mediante la mezcla de tres componentes esenciales: cemento, agua y agregados; a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una bachada de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire. Esta mezcla al endurecerse forma un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.

### 2.2.2. Componentes del concreto hidráulico.

Los principales componentes del concreto hidráulico son:

- **AGLUTINANTE** (cemento hidráulico) 10%-15%. Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, por que reaccionan químicamente con ella.

El cemento cumple con las siguientes funciones principales:

- a) Al combinarse con el agua llena huecos del agregado, aglomerándolo.
  - b) Proporciona resistencia al concreto endurecido.
- **AGREGADOS** (arena y grava) 60-75%. Los agregados para concreto pueden ser definidos como aquellos materiales inertes que poseen una resistencia propia suficiente, que no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico y que garantizan una adherencia con la pasta de cemento endurecida.

Las funciones principales que cumplen los agregados son:

- a) Forma esqueleto inerte que da rigidez para resistir acción de cargas, resistir abrasión, clima; brindando durabilidad al concreto.
  - b) Mejora estabilidad dimensional al reducir cambios de volumen de la pasta.
  - c) Actúan como material de relleno, haciendo más económica la mezcla.
- **AGUA** 10-25%. El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto debido a que provee una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia del concreto.

El agua cumple las siguientes funciones principales:

- a) Confiere plasticidad en estado fresco.
  - b) Hidrata al cemento hidráulico.
- **AIRE ATRAPADO** 0-2%. Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, es normal que atrape aire dentro de la masa, el cual es liberado posteriormente por los procesos de compactación a que es sometido una vez

ha sido colocado. Si la mezcla no contiene un aditivo que lo fomente, el aire se presenta en forma de burbujas microscópicas dispersas erráticamente en la masa, que corresponden al aire atrapado cuya proporción no excede normalmente a 2% del volumen del concreto.

El aire en el concreto cumple las siguientes funciones principales:

- a) Aumenta la plasticidad de la mezcla.
- b) Reduce la exudación y la segregación.

➤ **ADITIVOS (eventuales).** Los aditivos son materiales activos que modifican las propiedades del concreto hidráulico por acción física o química; se pueden agregar con el fin de inducir algunas características adicionales, tales como: trabajabilidad, reducción de agua de mezclado, incorporación de aire, modificación de los tiempos de fraguado, o proporcionar diferentes grados de impermeabilidad.

Existen tres criterios básicos que deberán tomarse en cuenta a la hora de utilizar aditivos:

- a) La adición de aditivo a la mezcla deberá lograr el objetivo buscado sin alterar su proporcionamiento básico.
- b) Su empleo estará justificado desde el punto de vista económico.
- c) Se investigará que el producto no tenga efectos nocivos en la mezcla, tanto de forma inmediata como a largo plazo.

### **2.3. AGREGADOS DEL CONCRETO.**

En las mezclas de concreto hidráulico convencional, los agregados suelen representar entre el 60% y el 75% del volumen absoluto de todos los componentes; de ahí la notable influencia que las características y propiedades de los agregados ejercen en la composición de las mezclas de concreto hidráulico, en:

- Demanda de agua.
- Trabajabilidad.

- Módulo de elasticidad.
- Estabilidad dimensional.
- Durabilidad.
- Coeficiente de expansión térmica.

### **2.3.1. Concepto de agregado.**

Agregado es un aglomerante granular que al mezclarse con cemento y agua forman el concreto. Los agregados de calidad deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos adsorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta del cemento.

De forma general los agregados se clasifican en agregados gruesos o gravas y agregados finos o arenas.

### **2.3.2. Clasificación de agregados para concreto hidráulico.**

Las clasificaciones presentadas a continuación no contemplan la composición química de los agregados y obedece a los diferentes términos que genera la procedencia de los mismos.

#### **➤ Clasificación por su origen.**

Esta clasificación toma como base la procedencia natural de las rocas y los procesos físicos-químicos involucrados en su formación:

- Ígneos.
- Sedimentarios.
- Metamórficos.

#### **➤ Clasificación por tamaño de partícula.**

De acuerdo a esta clasificación, los agregados se dividen en dos grupos, cuya frontera nominal es la malla de 4.75 mm (malla N° 4), obteniendo por resultado lo siguiente:

- **Agregado fino.**  
Arena ( $0.08\text{mm} < D < 4.75\text{mm}$ )
- **Agregado grueso.**  
Gravilla ( $5\text{mm} < D < 20\text{mm}$ )  
Grava ( $20\text{mm} < D < 40\text{mm}$ )

#### ➤ **Clasificación por modo de fragmentación.**

Por la forma en que ocurre el modo de fragmentación, los agregados se clasifican en:

- Natural: fragmentación ocurre en procesos naturales como la erosión.
- Manufacturado: fragmentación del material a través del proceso de trituración.
- Mixto: cuando intervienen ambos procesos.

#### ➤ **Clasificación por gravedad específica.**

La gravedad específica o peso específico de un agregado es la relación de su peso al peso de un volumen igual de agua. La clasificación se muestra a continuación:

- Ligero.
- Normal.
- Pesado.

De esta clasificación de los agregados se genera una característica básica del concreto que es su peso unitario, clasificándolo en tres grandes grupos; el concreto de peso normal ( $2400 \text{ kg/m}^3$ ), el concreto ligero (pesa menos de  $1800 \text{ kg/m}^3$ ) y el concreto pesado (pesa más de  $3200 \text{ kg/m}^3$ ).

### **2.3.3. Tipos de agregados para concreto hidráulico.**

Generalmente para identificar los agregados que se utilizan en la elaboración del concreto hidráulico, suele definirse a estos como agregados finos y gruesos:

- **Agregado fino.**

Muchas especificaciones en pavimentos requieren que la arena para la pavimentación reúna los requerimientos de la Norma ASTM C 33. Esta Norma proporciona límites superiores e inferiores para los porcentajes de material que pasan/retienen en las mallas desde la de 3/8 de pulgada hasta la #100 (9.5 a 150  $\mu\text{m}$ ). Cuando son aplicados indiscriminadamente los requerimientos de la Norma ASTM C 33, se podría incrementar el potencial del agrietamiento no controlado en pavimentos de concreto. Generalmente el concreto con un alto factor de cemento debería incluir arena gruesa.

El agregado fino o arena se usa como llenante, además actúa como lubricante sobre los agregados gruesos, dándole manejabilidad al concreto. Una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso de arena demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado, ya que entre más arena tenga la mezcla se vuelve más cohesiva y al requerir mayor cantidad de agua se necesita mayor cantidad de cemento para conservar una determinada relación agua cemento.

- **Agregado grueso**

El tipo de agregado grueso puede influir en la cantidad de temperatura de expansión o contracción del concreto.

El concreto que es más sensible a la temperatura hace aumentar el potencial para el agrietamiento no controlado. Las calizas, granitos y basaltos tienen un coeficiente de expansión térmica más bajo que el cuarzo, arenisca o grava silicios. Estas diferencias deben ser consideradas en el diseño, dejando un espaciamiento corto entre las juntas de contracción, aplicadas al concreto que sea más sensible a la temperatura. Pruebas de campo muestran que grietas que se forman antes del aserrado son más comunes en concretos hechos con gravas de ríos que con concretos hechos de grava de roca triturada.

Otra causa de anormalidad en las mezclas, incluyendo la superficie agrietada es el exceso de finos no deseables adheridos al agregado grueso. Los agregados gruesos con un 8% o más de material fino que pasa la malla #200 (0.075 mm) son considerados no adecuados.

#### **2.3.4. Propiedades de los agregados del concreto.**

Para la realización de un concreto de buena calidad es necesario que los agregados utilizados posean algunas características que los hagan aptos para poder utilizarlos.

##### **➤ Características de un buen agregado grueso para concreto.**

- Una buena graduación con tamaños intermedios, la falta de dos o más tamaños sucesivos puede producir problemas de segregación.
- Un tamaño máximo adecuado a las condiciones de la estructura.
- Debe evitarse el uso de agregados planos o alargados, ya que producen bajas masas unitarias y baja resistencia mecánica; debido a que tienen tendencia a colocarse horizontalmente formándose bajo su superficie, bolsas de agua; cuando esta sube a la superficie debido a la sedimentación de las partículas sólidas trae como consecuencia una notable reducción de la resistencia del concreto. Una adecuada densidad aparente está entre 2.3 y 2.9 gr/cm<sup>3</sup>. Las partículas con formas angulosas producen mezclas ásperas y difíciles de manejar; agregados con partículas esféricas y cúbicas son más convenientes porque tienen mayor resistencia y es menor el consumo de cemento debido al mayor acomodo de las partículas. . El agregado grueso debe tener una resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles que garantice su dureza. Los límites recomendados son: si el agregado va a ser usado en lozas de concreto o en pavimentos rígidos el desgaste debe ser menor del 35%, si va a ser usado en otras estructuras el desgaste debe ser menor del 40%.

➤ **Características de un buen agregado fino para concreto.**

- Debe ser bien graduado para que puedan llenar todos los espacios y producir mezclas más compactas.
- La cantidad de agregado fino que pasa los tamices N° 50 y N° 100 afecta la manejabilidad, la facilidad para lograr buenos acabados, la textura superficial y la exudación del concreto. Las especificaciones permiten que el porcentaje que pasa por el tamiz N° 50 este entre 10% y 30%; se recomienda el límite inferior cuando la colocación es fácil o cuando los acabados se hacen mecánicamente, como en los pavimentos, sin embargo en los pisos de concreto acabado a mano, o cuando se desea una textura superficial tersa, deberá usarse un agregado fino que pase cuando menos el 15% el tamiz 50 y 3% el tamiz 100.
- El módulo de finura del agregado fino utilizado en la elaboración de mezclas de concreto, deberá estar entre 2.3 y 3.1 para evitar segregación del agregado grueso cuando la arena es muy fina; cuando la arena es muy gruesa se obtienen mezclas ásperas.
- La presencia de materia orgánica en la arena que va a utilizarse en la mezcla de concreto llega a interrumpir parcial o totalmente el proceso de fraguado del cemento.

Contenido de materia orgánica (%).

0 - 1 Arena excelente.

1 - 2 Arena que se puede utilizar en concretos de alta resistencia.

2 - 3 Arena que se utiliza en concretos de mediana resistencia.

3 - 4 Arena que no se puede utilizar en concreto.

4 - 5 Arena demasiado mala.

## **2.4. CEMENTOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO.**

Para clasificar los cementos portland se utiliza en nuestro país como referencia la clasificación de los Estados Unidos.

- Según la norma ASTM C 150 existen ocho diferentes tipos de cemento, la clasificación está de acuerdo al uso y necesidad en el mercado de la construcción.
- Según la norma ASTM C 595, existen cinco tipos de cementos mezclados para aplicaciones generales o especiales.
- Los cementos hidráulicos bajo la Norma ASTM C 1157<sup>2</sup>, se desarrollan en el numeral 2.4.1

#### **2.4.1. Tipos de cementos ASTM C 1157.**

La norma ASTM C 1157 especifica los requisitos a cumplir para cementos en lo que respecta a sus principales propiedades como el tiempo de fraguado, finura, expansión en autoclave y adquisición de resistencia.

Para el caso de los cementos hidráulicos de la Norma ASTM C 1157, éstos se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

- Tipo GU: De uso general en construcción. Se emplean cuando no se requieren condiciones especiales.
- Tipo HE: De alta resistencia inicial o temprana.
- Tipo MS: De moderada resistencia a los sulfatos.
- Tipo HS: De alta resistencia a los sulfatos.
- Tipo MH: De moderado calor de hidratación.
- Tipo LH: De bajo calor de hidratación.

#### **Cemento ASTM C1157 Tipo HE**

El cemento fabricado bajo la norma ASTM C1157 tipo HE (Holcim CESSA PAV) es un cemento hidráulico, el cual posee la misma composición química del cemento Tipo I, pero con la adición de puzolana y filler en proporciones específicas en la molienda final.

---

<sup>2</sup> El cemento a utilizar en este estudio es bajo la Norma ASTM 1157 tipo HE.

Este cemento alcanza resistencias mayores a los 4200 psi a los 28 días, por lo que es recomendado para la fabricación de concretos estructurales para pavimentos.

Debido a sus características de alta resistencia inicial, este cemento es principalmente adecuado para la construcción de pavimentos de concreto, estabilización de suelos y bases granulares. El cemento tipo HE proporciona alta resistencia a edades tempranas, usualmente menos de una semana.

## **2.5. AGUA PARA CONCRETO HIDRÁULICO.**

### **➤ Usos del agua.**

En las especificaciones para concreto se hace referencia en primer término a los requisitos que debe cumplir el agua para elaborar el concreto, porque sus efectos son más importantes, y después se indica que el agua que se utilice para curarlo debe ser del mismo origen, o similar, para evitar que se subestime esta segunda aplicación y se emplee agua de curado con características inadecuadas. Una práctica bastante común consiste en utilizar agua potable para fabricar concreto sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar concreto; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque hay aguas potables aderezadas con citratos o con pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad pero pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de concreto.

### **➤ Requisitos de calidad.**

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico- químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto.

Refiriéndose a las características físico-químicas del agua para concreto, no

parece haber consenso general en cuanto a las limitaciones que deben imponerse a las sustancias e impurezas cuya presencia es relativamente frecuente, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (cloruros sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etc. Sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo es que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son francamente dañinas, como grasas, aceites, azúcares y ácidos, por ejemplo.

➤ **Efectos en el concreto.**

En diversas especificaciones y prácticas recomendadas, al establecer la calidad necesaria en el agua de mezclado, se pone más énfasis en la evaluación de los efectos que produce en el concreto, que en la cuantificación de las sustancias indeseables e impurezas que contiene. Esto aparentemente se justifica porque tales reglamentaciones están dirigidas principalmente a construcciones urbanas, industriales o similares, cuyo concreto se produce en localidades donde normalmente se dispone de suministro de agua para uso industrial o doméstico. En construcciones donde es necesario acudir a fuentes de suministro de agua cuya calidad es desconocida y con frecuencia muestra señales de contaminación, es prudente determinar las características físico-químicas del agua y, si estas son adecuadas, proceder a verificar sus efectos en el concreto.

## **2.6. ADITIVOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO.**

Las nuevas tecnologías están basadas en aditivos compuestos de carboxilato que aportan grandes parámetros de rendimiento en lo que respecta a:

- Ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento
- Reducir la demanda de agua.
- Aumentar la trabajabilidad.
- Incluir aire intencionalmente.
- Ajustar otras propiedades del concreto.

### Clasificación de aditivos y sus campos de aplicación.

En la tabla 2.1 se clasifica la tipología de los aditivos, las propiedades que confieren al concreto, y sus aplicaciones recomendadas. Se recomienda seguir las indicaciones del fabricante a fin de aprovechar las ventajas de cada aditivo.

Entre los aditivos más comunes existen algunos que combinan dos efectos a la vez, plastificante-retardante o plastificante-inclisor de aire.

**Tabla 2.1 Clasificación, propiedades y aplicaciones de aditivos.**

Tipo de Aditivo	Efecto deseado
Aditivos convencionales <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Plastificantes</li> <li>➤ Retardantes</li> <li>➤ Acelerantes</li> <li>➤ Plastificantes retardantes</li> <li>➤ Plastificantes acelerantes</li> <li>➤ Superplastificantes</li> </ul>	Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12%. Retardar el tiempo de fraguado. Acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia a edades tempranas. Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12% y retardar el fraguado. Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12% y acelerar el fraguado. Superplastificar o reducir agua entre el 12% y el 30% y retardar el tiempo de fraguado.
Inclsores de aire	Aumentar la impermeabilidad y mejorar la trabajabilidad.
Aditivos minerales <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cementantes</li> <li>➤ Puzolanas</li> </ul>	Aumentar propiedades cementantes. Sustituir parcialmente el cemento. Mejorar la trabajabilidad, la plasticidad, la resistencia a los sulfatos. Reducir la reacción álcali-agregado, la permeabilidad y el calor de hidratación. Sustituir parcialmente el cemento y rellenar.

<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Inertes</li> </ul>	Mejorar la trabajabilidad y rellenar.
Aditivos misceláneos <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Formadores de gas</li> <li>➤ Impermeabilizantes</li> <li>➤ Ayudas de bombeo</li> <li>➤ Inhibidores de corrosión</li> <li>➤ Colorantes</li> </ul>	Provocar expansión antes del fraguado. Disminuir la permeabilidad. Mejorar la capacidad de bombeo. Reducir el avance de la corrosión en ambientes con cloruros. Colorear concreto.

## 2.7. LA ADHERENCIA AGREGADO-PASTA.

### 2.7.1. Adherencia agregado-pasta en estado fresco.

El esqueleto granular del concreto está formado por los agregados, por lo tanto conviene colocar la mayor cantidad posible de agregados para lograr un concreto resistente, que no presente grandes variaciones dimensionales y sea económico; pero hay un límite en el contenido de agregados gruesos dado por la trabajabilidad del concreto, si la cantidad de agregados gruesos es excesiva la mezcla se volverá difícil de trabajar y habrá una tendencia de los agregados gruesos a separarse del mortero (segregación). Llegado este caso se suele decir que el concreto es "áspero", "pedregoso" y "poco dócil". La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta, en un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aun entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento.

La relación mínima Agua-Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

Mientras mayor sea la rugosidad superficial de los agregados mayor es la superficie de contacto con la pasta de cemento; haciendo necesaria la utilización de mayor contenido de pasta para lograr la trabajabilidad deseada, pero favorece la adherencia pasta-agregado y así mejora las resistencias. Esto es característico de los agregados de trituración.

En el caso de los cantos rodados, donde su superficie es lisa, dan mejor trabajabilidad al concreto pero menor adherencia pasta-agregado.

La adherencia entre los agregados y la pasta de cemento es determinante en las resistencias del concreto especialmente las de flexo tracción. La adherencia depende de la traba mecánica aportada por la superficie de los agregados, además de propiedades químicas y físicas de ellos.

### **2.7.2. Adherencia agregado-pasta en estado endurecido.**

Considerando el trabajo conjunto de los agregados y la pasta de cemento en el concreto endurecido puede suponerse que, si las resistencias individuales de los agregados y la pasta no son restrictivas, la resistencia última del concreto debe depender sensiblemente de la adherencia entre ambos componentes. Respecto a esta tendencia podría inferirse que, con agregados ordinarios de menor calidad, la resistencia mecánica del concreto a la edad de servicio suele depender principalmente de la resistencia de la pasta. Aun cuando en la práctica esta es una situación frecuente, su vigencia no puede ser general porque hay aspectos específicos que la modifican, tales como la forma, textura superficial y tamaño de las partículas de los agregados, y en general de la resistencia de diseño del concreto, por ejemplo. En todo esto, lo que si debe considerarse como una condición deseable en lo general, es que exista compatibilidad entre la resistencia de la pasta y la que se genere por adherencia entre ésta y los agregados, lo cual significa que no tiene sentido práctico tratar de incrementar la resistencia del

concreto, utilizando una pasta de muy alta resistencia cuando es la falta de adherencia la que la limita. En esta situación, lo conveniente es ejercer acciones tendientes a mejorar la adherencia entre la pasta y los agregados, a fin de elevar el umbral de falla del concreto por este concepto, y después adecuar la resistencia de la pasta al nivel requerido.

Para mejorar la adhesión de la pasta con los agregados, cuando su deficiencia es imputable a éstos, existe la posibilidad de modificar la forma, textura superficial y tamaño de las partículas, en la medida que lo inconveniente de estas características sea causante de las deficiencias observadas en la adherencia.

En lo relativo a la modificación del tamaño de las partículas, es necesario tener presente que al aumentar el tamaño máximo del agregado se manifiestan dos tendencias con efectos opuestos en la resistencia mecánica del concreto por un lado, el aumento del tamaño máximo reduce el requerimiento de agua de mezcla y en consecuencia disminuye la relación agua/cemento, con lo cual se tiende a incrementar la resistencia del concreto, y en contraposición, al aumentar el tamaño de las partículas disminuye la superficie de contacto de los agregados con la pasta, y con ello tiende a reducirse la resistencia del concreto porque para una misma condición de carga se incrementan los efectos de adherencia en el contacto pasta-agregado. Al hacer el balance de estas tendencias, resulta que en los concretos de baja resistencia (menos de 200 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente) domina el efecto de la reducción del agua de mezclado, y por consiguiente al aumentar el tamaño máximo del agregado tiende a incrementarse la resistencia del concreto; en tanto que para los concretos de mayor resistencia se manifiesta lo contrario pues domina el efecto de la superficie de adherencia disminuida, de manera que un aumento en el tamaño máximo tiende a reducir la resistencia del concreto en sus niveles altos.

De lo anterior parece evidente que la disminución del tamaño máximo del agregado, es una medida cuyo efecto para elevar el umbral de falla del concreto por adherencia en el contacto pasta-agregado, resulta de principal utilidad en los concretos con mayor nivel de resistencia, por ser en éstos donde dicha adherencia

es el factor limitante de la resistencia mecánica del concreto. De ahí que cuando se requiere alcanzar resistencias a compresión mayores de  $500 \text{ kg/cm}^2$ , que corresponden a los concretos especiales de muy alta resistencia es una práctica acostumbrada emplear gravas con un tamaño máximo reducido, que con frecuencia es del orden de 10 mm, aproximadamente.

En los concretos de baja resistencia (menos de  $200 \text{ kg/cm}^2$ , aproximadamente) a la edad de servicio (más de 28 días) es frecuente que la resistencia propia de la pasta sea el factor predominante.

## **2.8. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.**

### **2.8.1. Uniformidad.**

La verificación de la uniformidad del concreto, de revoltura a revoltura, es un instrumento fundamental para el control de la calidad durante la producción y uso del concreto. Para evaluar dicha uniformidad, se acostumbra establecer un plan de verificación mediante la obtención de muestras del concreto que se utiliza, con determinada frecuencia. Estas muestras normalmente se obtienen a la descarga de la mezcladora, si el concreto se fabrica en obra, o bien a la descarga del camión de entrega, si el concreto se adquiere premezclado. Como medios de evaluación suele llevarse a cabo las siguientes pruebas:

- Peso volumétrico (ASTM C-138).
- Contenido de aire, para los concretos con aire incluido (ASTM C-173 y 231).
- Consistencia, generalmente con la prueba de revenimiento, para los concretos de consistencia plástica (ASTM C-143).

Para evaluar la uniformidad mediante estos resultados, existen límites permisibles de variación, que se establecen en cada obra de acuerdo con las características específicas del concreto que se emplea.

### **2.8.2. Homogeneidad.**

Una condición necesaria para que una mezcla de concreto pueda considerarse

trabajable, es que se conserve homogénea en el curso de todas las operaciones a que se le someta, desde que abandone la mezcladora hasta que se le coloque y compacte dentro del espacio cimbrado.

La homogeneidad del concreto al mezclarlo se refiere al hecho de que se produzca una distribución uniforme de sus componentes en toda la revoltura; es decir, que diferentes porciones de la mezcla posean la misma composición.

Por otra parte, es también un hecho conocido la necesidad de que el suministro del concreto para la construcción de una estructura se realice por entregas parciales, en volúmenes reducidos, hasta completar el volumen total requerido. En estas condiciones existe también el requerimiento de que los volúmenes parciales posean igual composición, a fin de que el volumen global pueda ser considerado como un conjunto homogéneo. Bajo tales circunstancias, es posible considerar la homogeneidad original del concreto fresco desde dos puntos de vista: la del mezclado, que corresponde a la homogeneidad "en el seno de la revoltura", y la de la producción, que se refiere a la uniformidad del concreto "de revoltura a revoltura". Para evaluar la homogeneidad del concreto al término del mezclado, se acostumbra obtener dos o más muestras representativas de la misma revoltura, en el curso de su descarga de la mezcladora, para efectuarles diversas determinaciones cuyos resultados se comparan. Las determinaciones que con mayor frecuencia se efectúan a estas muestras comparativas de concreto recién mezclado, son: peso volumétrico, contenido de aire, revenimiento, contenido de agregado grueso, peso unitario del mortero libre de aire y resistencia a compresión.

### **2.8.3 Trabajabilidad.**

La manejabilidad o trabajabilidad es una propiedad del concreto fresco que se define como su capacidad para ser colocado, compactado adecuadamente y para ser terminado sin segregación ni exudación. Un método indirecto para determinar la manejabilidad de una mezcla de concreto, consiste en medir su consistencia o

fluidez. Dentro de ciertos límites las mezclas fluidas o húmedas son más manejables que las secas, pero dos mezclas que tengan la misma consistencia no son igualmente manejables, para ello deben tener el mismo grado de plasticidad.

**Los factores que influyen en la trabajabilidad son:**

- El contenido del agua de secado, es el principal factor que influye en la manejabilidad del concreto.
- La fluidez de la pasta, debido a que para una cantidad determinada de pasta y de agregado, la plasticidad de la mezcla dependerá de las proporciones de cemento y agua en la pasta.
- El contenido de aire (atrapado o adicionado), aumenta la manejabilidad de la mezcla porque sus burbujas actúan como balineras de los agregados permitiendo su movilidad.
- La buena graduación de los agregados.
- Los agregados gruesos con partículas planas y alargadas o de forma cubica con superficie rugosa, disminuyen la manejabilidad de la mezcla.
- Bajo contenido de arena en proporción con el contenido de agregado grueso determina una mezcla poco manejable.
- Algunas condiciones de clima y temperatura.
- Algunas condiciones de producción y colocación del concreto.

La trabajabilidad está representada por los siguientes aspectos:

- **1<sup>er</sup> Aspecto: Compacidad o Compactabilidad.**

Es la facilidad con que el concreto fresco es compactado.

- **2<sup>do</sup> Aspecto: Cohesividad.**

Es la aptitud que posee el concreto fresco para mantenerse como una masa estable y sin segregación.

- **3<sup>er</sup> Aspecto: Movilidad.**

Es la habilidad del concreto fresco para fluir.

- **4<sup>to</sup> Aspecto: Plasticidad.**

Es la condición del concreto fresco que le permite deformarse continuamente sin romperse.

#### **2.8.4 Revenimiento.**

El revenimiento es una medida de la de la consistencia del concreto fresco, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla, esto indica que tan seca o fluida esta la mezcla cuando se encuentra en estado plástico.

Los revenimientos recomendados para cada tipo de colocación se muestran en la tabla 2.2

**Tabla 2.2 Revenimientos recomendados.**

<b>Tipo de construcción</b>	<b>Revenimiento recomendado (cm)</b>
Con cimbra deslizante	1.0 - 6.0
Con cimbra fija	4.0 -7.0
Colocación manual	10.0 máximo

Ref. Código ACI 211.1

Los factores que afectan el revenimiento son: contenido de agua, granulometría, relación de agregado grueso a fino, forma y textura del agregado, uso de aditivos y temperatura.

#### **2.8.5 Consistencia (cohesión y viscosidad).**

En su definición de términos, el Comité ACI 116 identifica la consistencia del concreto recién mezclado con su relativa movilidad para fluir, y admite que la manera más usual para evaluarla es por medio de la prueba de revenimiento. Por su parte, el Comité ACI 309 opina que la consistencia de las mezclas de concreto, es una característica que se relaciona principalmente con el tercer aspecto de la trabajabilidad, definido como "movilidad", pero también considera que esta característica determina la facilidad con que una mezcla puede ser compactada,

es decir, que también tiene relación con el primer aspecto de la trabajabilidad, designado como "compactabilidad".

Al descargar de la mezcladora una revoltura de concreto que cumple requisitos de homogeneidad, se plantea el compromiso de transportarla, colocarla y dejarla compactada en la estructura, sin que sufra alteraciones sustanciales en su homogeneidad original. Cuando los equipos, el personal y los procedimientos que se utilizan en estas operaciones son los adecuados, el logro de ese objetivo pasa a depender primordialmente de la disposición que la mezcla de concreto manifieste para deformarse y fluir sin perder homogeneidad, en el curso y al término de dichas operaciones.

La disposición que una mezcla de concreto ofrece para deformarse y fluir, corresponde al aspecto de movilidad, el cual depende significativamente de la cohesión y la viscosidad plástica de la mezcla como fluido. La cohesión, que se identifica con el esfuerzo de cedencia, representa en cierto modo la resistencia que la mezcla opone para deformarse e iniciar el flujo, en tanto que la viscosidad plástica da noción de la facilidad y rapidez con que la mezcla puede fluir, una vez rebasada la cohesión e iniciado el movimiento. Entonces, desde un punto de vista práctico, lo deseable es que las mezclas de concreto fluyan con facilidad, pero permaneciendo homogéneas. Al aumentar la movilidad de las mezclas de concreto disminuye su posibilidad de permanecer homogéneas, de manera que lo conveniente es optimizar ambos requerimientos.

En la práctica se recurre normalmente a dos modos para expresar los grados de consistencia de las mezclas de concreto:

- En términos descriptivos, basados en la apariencia de la mezcla de concreto y el comportamiento que exhibe al ser manipulada. En tal caso se dice que una mezcla es de consistencia fluida, plástica o dura.
- En términos cuantitativos, expresados con base en los resultados de alguna prueba específica, por ejemplo, en muchas especificaciones de construcción, la consistencia de las mezclas de concreto suele definirse en

centímetros de revenimiento (mezclas fluidas, revenimientos mayores de  $\frac{1}{2}$ ”), en segundos de compactación en el aparato Vebe (mezclas secas, revenimientos menores de  $\frac{1}{2}$ ”), etc.

### **2.8.6 Tiempo de fraguado.**

Al mezclar el cemento con el agua, se forma una pasta en estado plástico, en el cual la pasta es trabajable y moldeable, después de un tiempo que depende de la composición química del cemento, la pasta adquiere rigidez. El tiempo que transcurre desde el momento que se agrega el agua, hasta que la pasta pierde viscosidad y eleva su temperatura se denomina “tiempo de fraguado inicial”, e indica que la pasta está semidura y parcialmente hidratada. Posteriormente la pasta sigue endureciendo hasta que deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega al mínimo de temperatura; el tiempo transcurrido desde que se agrega el agua hasta que llega al estado descrito anteriormente se denomina “tiempo de fraguado final”, e indica que el cemento se encuentra aún más hidratado (no totalmente) y la pasta ya está dura. A partir de este momento empieza el proceso de endurecimiento y la pasta ya fraguada va adquiriendo resistencia. La determinación de los tiempos de fraguado es arbitraria y da una idea del tiempo disponible para mezclar, transportar, colocar, vibrar y apisonar los concretos y morteros de una obra así como el tiempo necesario para transitar sobre ellos y el tiempo para empezar el curado.

#### **Factores que más inciden en los Tiempos de Fraguado.**

- Composición química del cemento.
- Finura del cemento; entre más fino sea, es mayor la velocidad de hidratación.
- Mientras mayor sea la cantidad de agua de amasado, dentro de ciertos límites, más rápido es el fraguado.
- A menor temperatura ambiente, las reacciones de hidratación son más lentas.

### **2.8.7 Segregación y Exudación.**

Entre los principales factores que producen segregación (separación de los materiales que constituyen una mezcla de cemento) están la diferencia en tamaños de las partículas y la mala distribución granulométrica de los agregados. Otras causas se refieren a los inadecuados procesos de mezclado, transporte, colocación y compactación; del concreto.

La segregación se produce en dos formas: las partículas gruesas tienden a separarse de las otras por acción de la gravedad, esto ocurre generalmente con mezclas secas y poco plásticas. La otra forma es la separación de la pasta (cemento y agua) lo que ocurre con mezclas muy fluidas.

La exudación o sangrado consiste en que parte del agua de mezclado tiende a subirse a la superficie del concreto recién colocado o durante el proceso de fraguado. Cuando la velocidad de la evaporación es menor que la velocidad de la exudación, se forma una película de agua que aumenta la relación agua cemento en la superficie y posteriormente esta zona queda porosa y de baja resistencia al desgaste; pero si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de la exudación se pueden producir grietas de contracción.

## **2.9 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.**

### **2.9.1 Propiedades.**

En lo que corresponde a la resistencia mecánica, lo usual es que la calidad del concreto endurecido se acredite por su capacidad para resistir esfuerzos de compresión, y eventualmente de tensión. En cuanto a la durabilidad del concreto, es más compleja e imprecisa pues debe hacer frente a la posibilidad de numerosas condiciones de exposición y servicio, que suelen ameritar la adopción de diferentes medidas de prevención y/o protección, de cuya eficacia no siempre existe plena seguridad por tal motivo, es preciso hacer un reconocimiento de las condiciones experimentales que con más frecuencia ocurren en la práctica, la capacidad natural que el concreto convencional posee para resistir sus efectos y

las medidas que pueden adoptarse para prolongar la vida útil del concreto en dichas condiciones.

### **2.9.2 Resistencia mecánica.**

La capacidad intrínseca del concreto, como material de construcción, para producir un buen servicio permanente, depende substancialmente de que posea las características y propiedades adecuadas para resistir satisfactoriamente por largo tiempo, los efectos de las sollicitaciones mecánicas y las propiedades detrimentales inherentes a las condiciones en que opera la estructura, en función de tales condiciones, es posible considerar dos casos:

- 1) Cuando el funcionamiento de la estructura sólo demanda del concreto como condición prioritaria, un determinado comportamiento estructural.
- 2) Cuando la estructura opera en condiciones de exposición y servicio tales que sus efectos crean el riesgo de que se agriete prematuramente.

En el primer caso la propiedad básica que se procura obtener en el concreto endurecido es una determinada resistencia mecánica; en el segundo, además de una resistencia, también se requiere propiciar otras características y propiedades en el concreto que lo hagan resistente y durable al verse sometido a las condiciones dañinas específicamente previstas.

La resistencia mecánica del concreto endurecido ha sido tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material de construcción, lo cual se ha considerado atribuible a tres principales razones:

- 1) En la mayoría de los casos, la resistencia mecánica (a compresión o tensión) tiene influencia directa en la capacidad de carga de las estructuras,
- 2) Es la propiedad más fácilmente determinable en el concreto endurecido.
- 3) Los resultados de su determinación pueden ser utilizados como datos índices de otras propiedades del concreto.

La resistencia mecánica que potencialmente puede desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales.

### **2.9.3 Resistencia a la fatiga.**

En la vida de servicio de las estructuras hay dos condiciones de carga que son frecuentes:

- La primera es la que se conoce como condición de carga sostenida; en la falla del concreto bajo esta condición de carga actúan como variables el nivel del esfuerzo sostenido con relación al de ruptura, y el tiempo que se mantiene aplicado dicho esfuerzo. A niveles de esfuerzo sostenido inferiores a 75% del esfuerzo de ruptura, aproximadamente, el concreto continúa deformándose con el tiempo pero no alcanza a fallar, por lo menos dentro del tiempo que se considera como vida útil de la estructura; en tanto que a niveles de esfuerzo sostenido superiores al 75% del de ruptura, el concreto termina por fallar en tiempos y con deformaciones que disminuyen a medida que dicho nivel de esfuerzo se incrementa. A la falla del concreto en estas últimas condiciones, se le suele considerar como falla por “fatiga estática”, y se le relaciona con un estado de deformación crítico producido por el crecimiento y propagación de las microfisuras preexistentes.
- La segunda condición se refiere al caso de elementos estructurales, como por ejemplo losas de puentes, pavimentos de concreto hidráulico y durmientes de ferrocarril de concreto preesforzado, que constantemente trabajan sometidos a la acción de cargas repetidas que les producen variaciones cíclicas en los niveles de esfuerzo. En esta condición se provoca paulatinamente un estado en el concreto según el cual después de cada ciclo de carga y descarga se acumula una deformación adicional permanente, de modo que al cabo de un cierto número de ciclos, se llega al estado de deformación crítico en que sobreviene la falla del concreto. A este tipo de falla, que depende del tiempo

requerido para acumular el número necesario de ciclos (de acuerdo con la frecuencia de estos) se le denomina falla por “fatiga dinámica”, o simplemente por fatiga.

#### **2.9.4 Resistencia a la abrasión y la erosión.**

En determinadas condiciones de servicio, el concreto resulta expuesto a la acción de fuerzas que ponen a prueba su resistencia superficial, y cuyos efectos pueden manifestarse como abrasión y/o erosión de la superficie expuesta. En su definición de términos, el comité ACI considera que la abrasión es el desgaste producido por acciones de frotamiento y fricción en tanto que la erosión corresponde a un estado de desintegración superficial ocasionado por los efectos abrasivos o de cavitación debida a la acción de gases, líquidos o sólidos en movimiento.

La abrasión mecánica es una forma de deterioro que suele producirse en la superficie de pisos y pavimentos de concreto hidráulico, como consecuencia del tránsito de personas y vehículos, y/o de su funcionamiento como área de maniobras.

De una manera general y aproximada, las fuerzas abrasivas que actúan frecuentemente sobre pisos y pavimentos de concreto hidráulico, pueden clasificarse de acuerdo con su intensidad en tres diferentes niveles de deterioro potencial, que en orden ascendente son:

- 1) Ligero y mediano, pisos y pavimentos de concreto expuestos al tránsito de personas, vehículos de todo tipo provistos con ruedas de hule (neumáticos o solidas) y vehículos ligeros provistos con ruedas metálicas.
- 2) Enérgico, pisos y pavimentos expuestos al tránsito de vehículos pesados, frecuentemente equipados con cadenas antiderrapantes; plataformas destinadas al manejo de carga pesada.
- 3) Muy enérgico, pavimentos en áreas destinadas a maniobras muy pesadas, en donde se requiere el uso de vehículos y equipos provistos con bandas

metálicas articuladas tipo orugas , y/o en superficie acondicionadas para manejo por medio de arrastre de cuerpos pesados.

### **2.9.5 Módulo de elasticidad.**

Al aplicar una carga a un material este se deforma, muchos materiales regresan a sus dimensiones originales cuando les es removida la carga. Esto describe la elasticidad del material. Hooke propuso en 1678, que este comportamiento es similar al de un resorte que cuando se comprime o se estira cambia de longitud y cuando la carga se quita, vuelve a su posición original. Hooke señaló que la deformación de un cuerpo ( $\delta$ ) era linealmente proporcional a la fuerza aplicada (F), y la constante proporcional (K) fue denominada por mucho tiempo la constante del resorte. La expresión de esta relación fue:

$$F = K\delta$$

Dónde:

F= la carga o fuerza aplicada

K= constante del resorte

$\delta$ = deformación

Actualmente, la constante del resorte es la “rigidez” del material o estructura que depende de la geometría del cuerpo que es sometido a carga y de las propiedades del material. La fuerza se pone en términos de esfuerzo  $\sigma = F/A$ , donde A es el área del espécimen donde se aplica la carga y la deformación se pone en términos de  $\epsilon = \delta/L$  donde L es la longitud original del espécimen, lo que da lugar a la fórmula más conocida para carga uniaxial, donde el esfuerzo se relaciona con la deformación por la constante de proporcionalidad llamada módulo de elasticidad o módulo de Young, y expresada por:

$$\sigma = E\epsilon$$

Dónde:

$\sigma$ = esfuerzo aplicado

$\epsilon$ = deformación unitaria.

Ahora bien, cuando se aplican esfuerzos en una dirección, se producen cambios en dos dimensiones en direcciones perpendiculares a la anterior. Por lo tanto se requiere de dos parámetros para describir el comportamiento elástico del material: El módulo de elasticidad o módulo de Young, y la Relación de Poisson que es el valor absoluto de la relación de la deformación transversal a la correspondiente longitudinal, resultante del esfuerzo axial uniformemente distribuido, bajo el límite proporcional del material. Las deformaciones transversales son de dirección opuesta a la deformación axial y su relación se expresa:

$$\epsilon_{lat} = \frac{\sigma_{lat}}{E} - \mu \frac{\sigma_{axial}}{E}$$

Dónde:

$\epsilon_{lat}$  = deformación unitaria en dirección lateral.

$\sigma_{lat}$  = esfuerzo en dirección lateral.

$\sigma_{axial}$  = esfuerzo en dirección axial.

$\mu$  = Relación de Poisson.

$E$  = Módulo de elasticidad.

Otra forma para calcular el módulo de elasticidad del concreto es por mediciones ultrasónicas, son un tipo de ensayo no destructivo relativamente de bajo costo y que no causan ningún daño. Se basan en que la velocidad de una onda de compresión a través de un cuerpo elástico es proporcional a la raíz cuadrada del módulo de elasticidad. El ensayo ASTM C597, de medición de la velocidad de un pulso ultrasónico a través del concreto, puede usarse para medir las velocidades de ondas. La fórmula general que se utiliza es la siguiente:

$$E = v^2 * \frac{[\delta(1 - \mu)(1 - 2\mu)]}{(1 - 2\mu)}$$

Dónde:

$E$  = Módulo de elasticidad dinámico.

$v$  = velocidad de pulso.

$\delta$  = densidad del concreto.

$\mu$  = relación de Poisson dinámica.

De acuerdo a la velocidad de pulso, Feldman y Carino, han propuesto unas condiciones generales de calidad (Tabla 2.3).

**Tabla 2.3 Calidad del concreto en función de la velocidad de la onda en el medidor de pulso ultrasónico.**

<b>Condiciones generales.</b>	<b>Velocidad de pulso (m/s)</b>
Excelente	Mayor de 4500
Bueno	3600 hasta 4500
Cuestionable.	3050 hasta 3600
Pobre	2100 hasta 3050
Muy pobre	Menor de 2100

Los ingenieros deben ser capaces de calcular las deflexiones en las estructuras, calcular esfuerzos de las deformaciones observadas, proporcionar las secciones de concreto requeridas y determinar el refuerzo requerido en los elementos de concreto reforzado. En todos estos cálculos se necesita conocer las propiedades elásticas que relacionan el esfuerzo y su correspondiente deformación producida.

Aunque se reconoce que el módulo de elasticidad estático determinado de acuerdo con la norma ASTM C469 es el más representativo y eficaz para un concreto determinado, frecuentemente los diseñadores no especifican el Módulo de elasticidad, ya que descansan en aproximaciones suficientemente eficaces, derivadas de otras propiedades (típicamente la densidad y la resistencia a compresión) para estimar el valor de módulo de elasticidad (E) a utilizar.

Esto ocurre porque el ensayo estático es un poco complicado y delicado de realizar; requiere de mucho tiempo y atención, y de equipo no encontrado fácilmente en laboratorios de concreto. De allí que muchos ingenieros han tratado de encontrar enfoques empíricos o teóricos.

En ACI 318-08 las formulas recomendadas para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto son las siguientes:

$$E = W^{1.5} * 0.0043\sqrt{f'_c} \quad (\text{en MPa})$$

$$E = W^{1.5} * 0.14\sqrt{f'_c} \quad \left(\text{en } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$$

$$E = W^{1.5} * 33\sqrt{f'_c} \quad (\text{en psi})$$

Donde  $W$  es la densidad del concreto y  $f_c$  es la resistencia a la compresión del concreto. Para concretos de densidad normal (concreto con peso volumétrico de 2200 kg/cm<sup>3</sup>) las formulas recomendadas por ACI 318-08 son:

$$E = 4700\sqrt{f'_c} \quad (\text{en MPa})$$

$$E = 15100\sqrt{f'_c} \quad \left(\text{en } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$$

$$E = 57000\sqrt{f'_c} \quad (\text{en psi})$$

La fórmula propuesta por AASHTO para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto es la siguiente:

$$E = 6750 * MR \quad \left(\text{en } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$$

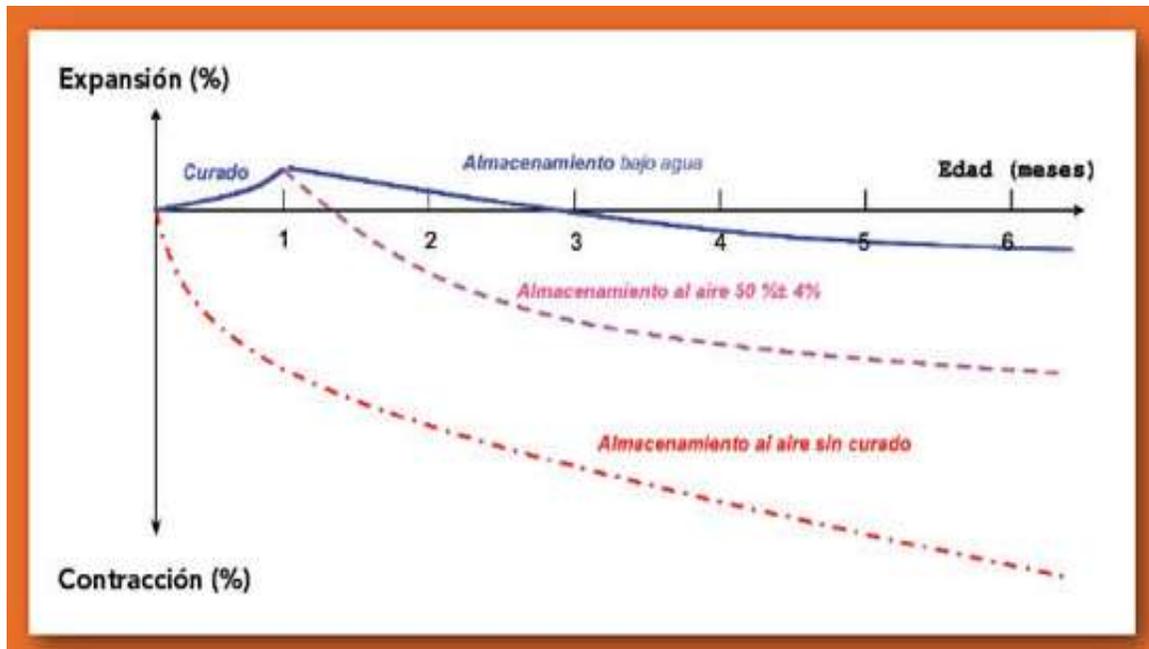
## 2.10 Expansión y contracción en el concreto hidráulico.

Los cambios volumétricos del concreto pueden ocurrir como expansiones o contracciones; si el elemento de concreto en cuestión tiene plena libertad para cambiar de volumen (como puede ser el caso de un espécimen de tamaño reducido) el cambio se produce sin generar esfuerzos. Sin embargo, en la práctica esto no sucede así en los elementos estructurales que casi siempre tienen restricciones para expandirse o contraerse libremente, de manera que en estas condiciones una expansión genera esfuerzos de compresión y una contracción los produce de tensión. Debido a la reducida capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tensión, las contracciones son los cambios de volumen más inconvenientes porque se traducen en agrietamientos, al generar esfuerzos que

sobrepasan la resistencia a tensión del concreto.

De acuerdo a la norma ASTM C157 las posibles evoluciones del cambio longitudinal del concreto se pueden presentar de acuerdo al siguiente grafico:

**Grafico 2.1 Posibles evoluciones de los cambios longitudinales en el concreto.**



Fuente: artículo presentado ante American Concrete Institute, sección centro y sur de México.

### 2.10.1 Definición de contracción.

La contracción es una deformación tridimensional, pero se expresa comúnmente como una deformación lineal porque en la mayoría de los elementos de concreto expuestos, uno o dos dimensiones son mucho más pequeños que la tercera dimensión y el efecto de la contracción es mayor en la dimensión más grande, como es el caso de los pavimentos.

La mayor parte de la contracción anticipada del concreto ocurre a muy temprana edad en la vida del pavimento provocado principalmente por cambios de temperatura. El calor de hidratación y temperatura del pavimento normalmente

alcanza su valor máximo muy poco tiempo después de su colocación y una vez alcanzado su valor máximo, la temperatura del concreto baja debido a la reducción de la actividad de hidratación y también debido al efecto de la baja temperatura ambiente durante la primera noche del pavimento.

Otro factor que contribuye a la contracción inicial es la reducción de volumen a causa de la pérdida de agua en la mezcla durante la consolidación y el fraguado, pues la mayor parte del agua en exceso sangra a la superficie y se evapora provocando que con la pérdida de agua el concreto ocupe menos volumen.

La fricción de la subrasante ó terreno de apoyo se resiste a la contracción del pavimento por lo que se presentan en el interior del pavimento algunos esfuerzos de tensión, los cuáles de no ser considerados pueden provocar grietas transversales como las mostradas en la figura 2.1

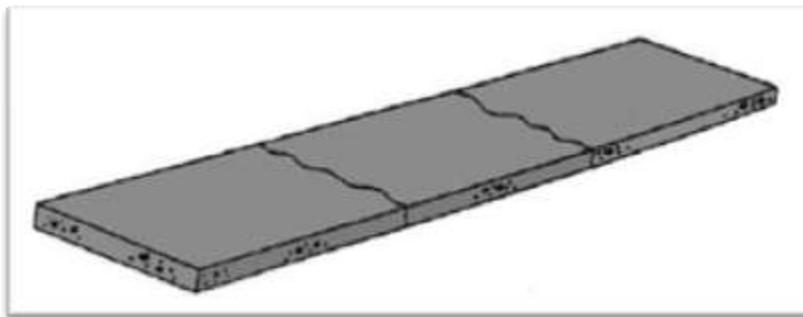


Figura 2.1 Agrietamiento inicial en un pavimento de concreto sin juntas.

### **2.10.2 Tipos de contracciones.**

Los tipos de contracción que existen son:

- Contracción química.
- Contracción plástica.
- Contracción por secado.
- Contracción autógena.
- Contracción térmica.
- Contracción por carbonatación.

➤ Contracción química.

La contracción química se refiere a la reducción en el volumen absoluto de los sólidos y líquidos de la pasta, resultante de la hidratación del cemento. El volumen absoluto de los productos hidratados del cemento es menor que el del cemento y del agua antes de la hidratación. La mayor parte de este cambio del volumen es interno y no cambia considerablemente las dimensiones externas visibles del elemento de concreto.

En el pasado, investigadores se referían a la contracción química como la absorción del agua durante la hidratación (Powers 1935). Le Chatelier (1900) fue el primero en estudiar la contracción química de las pastas de cemento.

➤ Contracción plástica.

La contracción plástica ocurre a medida que el concreto fresco pierde humedad después de la colocación y antes de que ocurra cualquier desarrollo de resistencia. La cantidad de este agrietamiento depende de la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura del concreto y la velocidad del viento, normalmente se presenta en la forma de fisuras que ocurren antes o durante el acabado. La contracción plástica (Ver figuras 2.2 y 2.3) resulta de la combinación de la contracción química y autógena y la rápida evaporación de la humedad de la superficie, superando la tasa de sangrado.

➤ Contracción por secado.

La contracción por secado es lo que la mayoría considera “la verdadera contracción”. Este tipo de contracción involucra el movimiento y pérdida de agua dentro de los poros extremadamente pequeños de la pasta hidratada de cemento y desde el interior de la estructura de los productos de hidratación o gel. En condiciones ambientales ordinarias, el concreto después de fraguado sigue expuesto a perder más agua por efecto de la evaporación y por el consumo debido a la hidratación del cemento, y esta reducción de agua, que progresa

paulatinamente con la edad del concreto, es motivo de que éste se contraiga gradualmente a medida que endurece, generando la contracción por secado.

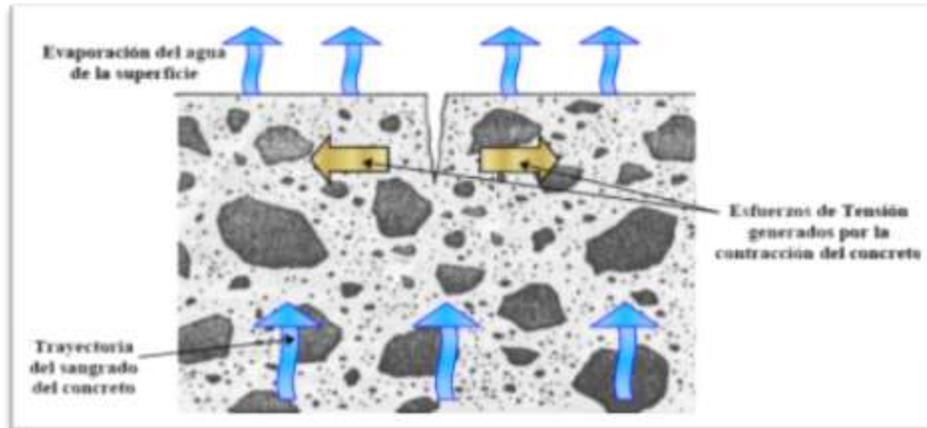


Figura 2.2 Grietas por contracción plástica.  
Fuente: <http://www.camineros.com/docs/cam062.pdf>

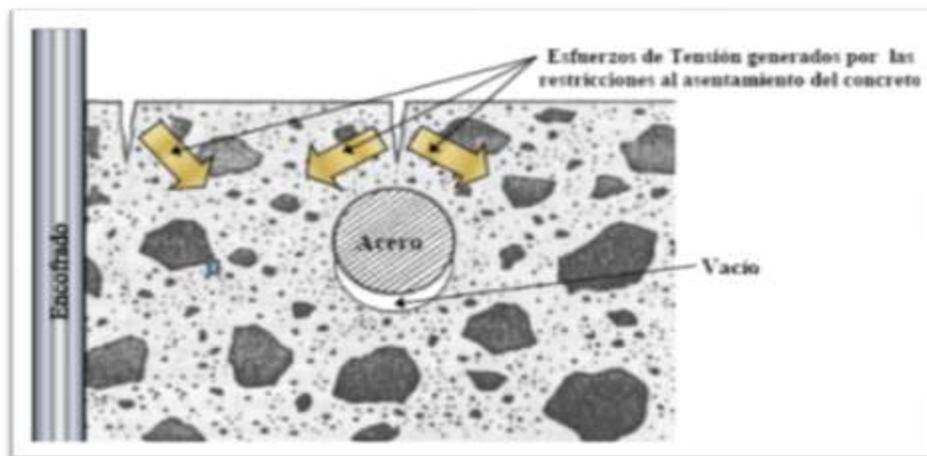


Figura 2.3 Grietas por asentamiento plástico.  
Fuente: <http://www.camineros.com/docs/cam062.pdf>

**Procedimiento para obtener el potencial de expansión y contracción del concreto.**

Gran parte de la información divulgada acerca de la magnitud de los cambios longitudinales del concreto, es resultado de observaciones efectuadas en

especímenes de prueba sujetos a determinados procedimientos y condiciones de elaboración, curado y exposición. Así, por ejemplo, en el método estándar de prueba ASTM C157 destinado a evaluar el cambio longitudinal del concreto endurecido, se definen tres tipos de especímenes: 1) prisma de 25 x 25 x 285 mm, aplicables a mezclas de mortero, 2) prisma de 75 x 75 x 285 mm para mezclas de concreto con grava hasta 25 mm (1") de tamaño máximo, y 3) prisma de 100 x 100 x 285 mm para concretos con grava hasta 50 mm (2"). Estos especímenes se elaboran bajo condiciones establecidas, se curan según el proceso de sumersión en agua saturada con cal a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 28 días y a continuación se someten como primera opción a secado en una atmósfera controlada a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura y  $50 \pm 4\%$  de humedad relativa, como segunda opción la Norma ASTM C 157 propone la sumersión de los especímenes en agua saturada con cal<sup>3</sup>. Cuando el concreto endurecido se halla completamente saturado, significa que todos sus espacios vacíos están ocupados por agua, en la medida que esto es prácticamente posible. Si el concreto húmedo se expone al aire, comienza por evaporarse el agua libre de absorción en la superficie expuesta para continuar con la evaporación del agua capilar, y así se origina un gradiente de humedad a través del concreto que provoca el movimiento de agua desde las zonas húmedas hacia las zonas secas conforme a un proceso de difusión. De este modo, si la acción de secado continúa, se establece así una pérdida continua y gradual del agua interna del concreto por efecto del secado.

La pérdida por secado del agua libre de absorción y del agua capilar produce contracciones que suelen ser reversibles, en tanto que la remoción del agua de adsorción del gel tiende a provocar contracciones permanentes en la pasta de cemento hidratada por efecto de su enjutamiento.

Procede insistir en que la contracción resulta más perjudicial que la expansión, no sólo porque origina esfuerzos de tensión en el concreto, sino también porque suele ser de mayor magnitud.

---

<sup>3</sup> Ver procedimientos de curado descritos en la Norma ASTM C 157 para los especímenes de concreto.

El conocimiento de las características de la contracción del concreto es un punto de partida necesario en el diseño de estructuras para el control de grietas. Tal conocimiento permitirá al diseñador estimar el probable movimiento por contracción en el concreto y podrá tomar los pasos apropiados en el diseño para acomodar este movimiento, ver figura 2.4.

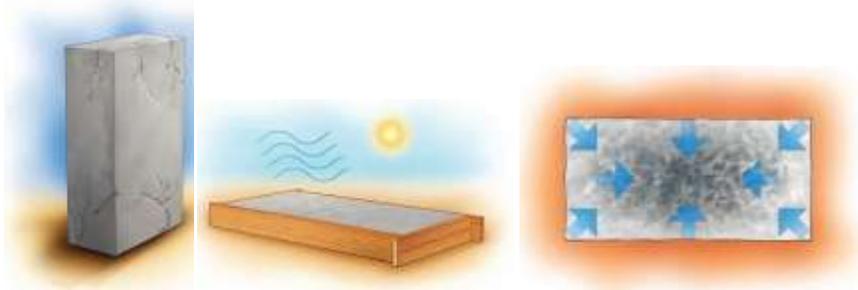


Figura 2.4 Mecanismo de la contracción por secado

### **Factores que afectan la contracción por secado**

Puesto que la contracción por secado está relacionada con la pérdida de humedad del concreto, es influido por factores externos que afectan el secado y también por factores internos relacionados con el concreto y sus constituyentes.

#### ➤ Factores externos.

Los factores externos que afectan la pérdida de humedad del concreto son las condiciones ambientales, así como el tamaño y la forma del elemento de concreto, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento, cualquier combinación de estos factores afecta la velocidad de evaporación. Las condiciones ambientales diferentes en los lados opuestos de un elemento dan como resultado un secado diferencial hacia afuera, y por tanto, una contracción diferencial con la posible consecuencia de alabeo.

Geometría del elemento: los elementos de concreto grandes y de mayor sección se secan más lentamente que los pequeños y delgados. Como resultado, para el mismo periodo de secado, la contracción de los elementos de gran tamaño es

menor que para los de menor tamaño, en los cuales su núcleo se puede secar más rápidamente.

➤ Factores internos.

Los factores internos que afectan la contracción por secado del concreto y aquéllos relacionados con sus constituyentes son cementos, agregados, aditivos, diseño de la mezcla del concreto, relación agua-cemento, contenido de agua, propiedades de los agregados, fracción de volumen; y aquéllos vinculados con la colocación, compactación y curado del concreto.

- Cementos: aunque generalmente se concluye que la composición del cemento puede afectar la contracción por secado, el efecto no se ha determinado por completo.
- Agregados: hay una relación razonablemente directa entre la contracción de un agregado y su capacidad de absorción; es decir, los agregados de buena calidad y baja contracción generalmente están caracterizados por una baja absorción. Si el agregado se contrae menos que la pasta, entonces el agregado restringe la contracción, y ésta disminuirá al incrementarse la fracción del volumen del agregado. El efecto del agregado en la restricción de la contracción por secado del concreto está regido por:
  - La fracción de volumen del agregado.
  - El módulo de elasticidad del agregado.
  - La contracción del agregado al secarse.
- Aditivos: generalmente, los aditivos afectan la contracción del concreto en un grado variable, dependiendo de su formulación, su interacción con el cemento y con otros aditivos en la mezcla, y en las variaciones o ajustes que provocan en las proporciones de la mezcla de concreto. Los aditivos que contienen cloruro de calcio pueden incrementar la contracción por secado del concreto.

- Contenido de agua: la contracción por secado del concreto se incrementa al aumentarse su contenido de agua. El concreto con alto contenido de agua (y alta relación agua-cemento) tiene una resistencia inferior y un menor módulo de elasticidad, y por tanto, tiene una mayor tendencia a la contracción.
- Prácticas de construcción: la colocación, la compactación y el curado del concreto, son factores importantes para minimizar la magnitud de la contracción por secado. Al agregar más agua en el sitio durante la colocación del concreto para restablecer el revenimiento o para ayudar al acabado final, se incrementará la contracción por secado del concreto.  
Al aplicar apropiadas medidas de curado inmediatamente después del acabado del concreto, se evitará el secado de la superficie del concreto, en especial en condiciones de clima caliente.

Algunas de las medidas que pueden tomarse para reducir la contracción por secado del concreto incluyen:

- Uso de un mínimo contenido de agua (consistente con los requisitos de colocación y acabado).
  - Empleo de la fracción de volumen más alta posible de agregado de buena calidad, y tamaño máximo posible del agregado.
  - Uso de cemento de contracción compensada cuando pueda disponerse de éste.
  - No utilizando aditivos que se sepa que incrementan la contracción por secado; por ejemplo, aquéllos que contienen cloruro de calcio.
  - Asegurándose de que el concreto sea apropiadamente colocado, compactado y curado.
- Contracción autógena.

La contracción autógena ocurre dentro de la masa de concreto, esto es, sin

contacto con el medio ambiente, también es conocida como contracción por auto desecación. La contracción autógena es la reducción macroscópica (cambio dimensional visible), cuando el agua externa no está disponible, la hidratación del cemento consume el agua de los poros, resultando en auto desecación de la pasta y en una reducción uniforme del volumen (Copeland y Braga 1955). La contracción autógena aumenta con la disminución de la relación agua-cemento y con el aumento de la cantidad de pasta de cemento. El concreto de alta resistencia y baja relación agua-cemento (0.30) puede experimentar una contracción autógena de 200 a 400 millonésimos. La contracción autógena puede ser la mitad de la contracción por secado en concretos con relación agua-cemento de 0.30.

➤ Contracción térmica.

La contracción térmica resulta de una disminución en la temperatura del concreto diferente al tiempo de colocado. Las deformaciones de origen térmico en el concreto, siguen el principio que un cambio de temperatura en un cuerpo genera un cambio directamente proporcional a la longitud del mismo, definido a través de una expresión lineal. Las deformaciones causadas por reacciones químicas propias del material, como la contracción del concreto, tienen más de tres variables involucradas que no son lineales y que sin duda son deformaciones más complejas de modelar. La contracción del concreto está relacionada, entre otras cosas, con la composición del material, con la humedad relativa del medio y con la geometría del elemento.

➤ Contracción por carbonatación.

La contracción por carbonatación es la que ocurre de la reacción del cemento hidratado con el dióxido de carbono en el aire en presencia de humedad. El concreto que permanece expuesto al aire pierde gradualmente su contenido de agua evaporable y con ello experimenta una disminución de volumen que se denomina contracción por secado; sin embargo, paralelamente con el proceso de secado ocurre otro por efecto del contacto con el aire, que también produce

contracción en el concreto y que se identifica con el llamado proceso de carbonatación. De este modo, en condiciones de exposición al ambiente, el concreto manifiesta una contracción que es la suma de los efectos de dos fenómenos distintos: de secado y de carbonatación.

Existen otros tipos de deformaciones por contracción, las cuales dependiendo de las circunstancias, pueden o no ocurrir simultáneamente, como se muestra en la tabla 2.4:

**Tabla 2.4 Cambios longitudinales del concreto.**

<b>CAMBIOS LONGITUDINALES DEL CONCRETO</b>			
<b>Etapa</b>	<b>Exposición</b>	<b>Causa</b>	<b>Manifestación</b>
Antes del fraguado (Concreto fresco) Y Durante el fraguado (Concreto en rigidización)	Al aire	Asentamiento, sangrado y pérdida inicial de agua	Contracción plástica.
	Sumergido	Efectos físicos y químicos de la hidratación inicial del cemento. Consumción de agua por la hidratación del cemento.	Expansión post-sangrado  Contracción autógena
Después del fraguado (Concreto en	Al aire	Continuación de la pérdida de agua.	Contracción por secado.
		Generación de calor interno por la hidratación del cemento.	Expansión térmica inicial al acumularse el calor, y contracción posterior al disiparse.
		Variaciones externas de	Expansión al

curso de endurecimiento y ya endurecido)		temperatura (medio ambiente y otras causas).	calentarse y al enfriarse.
		Acción del bióxido de carbono atmosférico.	Contracción por carbonatación.
	Sumergido	Consumición de agua por la hidratación del cemento. Absorción de agua por el gel de cemento.	Contracción autógena. Hinchamiento por saturación.

Fuente: Manual de Tecnología del Concreto, Comisión Federal de Electricidad.

### 2.10.3 Definición de expansión.

El concreto, el mortero y la pasta de cemento se expanden con la presencia de agua externa. Las contracciones autógenas y de secado revierten el cambio de volumen.

El volumen de la masa del concreto aumenta cuando el agua externa reemplaza el agua drenada de los capilares por la contracción química. Como no hay auto desecación, no hay contracción autógena. El agua externa puede venir del curado húmedo o sumersión.

### 2.10.4 Causas de la expansión.

La expansión (hinchazón) ocurre debido a la combinación del crecimiento de los cristales, absorción de agua y presión osmótica. La magnitud de la expansión no es muy grande, sólo cerca de los 50 millonésimos en las edades tempranas.

A medida que el cemento se hidrata, la reacción exotérmica proporciona una cantidad significativa de calor. En elementos de grandes volúmenes, el calor se retiene y no se disipa como en los elementos menores. Este aumento de temperatura, que ocurre durante las primeras horas y días, puede inducir a una

pequeña expansión que compensa las contracciones autógena y de secado (Holt 2001); este fenómeno se conoce como expansión térmica temprana.

### **2.10.5 Tipos de agrietamiento.**

Las losas de concreto se ondulan y se arquean debido a muchos factores, dentro de los cuales se puede mencionar los gradientes de temperatura y humedad existentes desde la parte superior hasta la losa. Estas respuestas naturales causan que los pavimentos y pisos industriales se agrieten en intervalos aproximadamente regulares. Las losas de concreto se agrietan cuando los esfuerzos de tensión internos superan la resistencia de tensión del concreto. A continuación se presentan tipos de grietas comunes en el concreto.

#### ➤ Grietas de contracción por secado.

Dicha contracción no es un problema si el concreto está libre para moverse. Si el concreto está restringido de alguna manera, la contracción por secado introducirá esfuerzos de tensión que, cuando exceden la resistencia a tensión del concreto, harán que el concreto se agriete. Al reducir la contracción por secado, no necesariamente se evita el agrietamiento, pues también es influenciado por la restricción, el diseño y el detallado del elemento de concreto.

Las grietas por contracción, en contraposición a las grietas por flexión, tienen lados paralelos, y en el caso de losas, usualmente se extienden justo a través del espesor de la losa. Tales grietas pueden hacer que el agua penetre o se filtre, y en última instancia dañe la durabilidad del elemento de concreto.

#### ➤ Grietas por asentamiento.

Las grietas por asentamiento tienden a seguir un patrón regular que coincide con una restricción, usualmente el refuerzo o un cambio en sección. No son profundas, por lo general pero, debido a que tienden a seguir y a penetrar hasta donde está el refuerzo, pueden reducir la durabilidad de una estructura.

Los factores que pueden contribuir al asentamiento plástico incluyen:

- La tasa de sangrado.
- La profundidad del refuerzo con relación al espesor total.
- El tiempo total de asentamiento.
- La relación entre la profundidad en el refuerzo y el tamaño de la varilla.
- Los constituyentes de la mezcla.
- El revenimiento.

➤ Grietas causadas por el movimiento de la cimbra.

Si hay un movimiento deliberado o no intencional de la cimbra después que el concreto ha comenzado a espesarse, pero antes de que haya ganado suficiente resistencia para soportar su propio peso, pueden formarse grietas sin patrón definido.

Para evitar el agrietamiento por esta causa, la cimbra debe ser:

- Suficientemente fuerte y rígida para soportar el peso del concreto sin deflexiones excesivas.
- No mover las cimbras hasta que el concreto haya ganado suficiente resistencia para soportarse a sí mismo.

#### **2.10.6 Coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.**

Los cambios volumétricos se manifiestan en tres dimensiones; no obstante, por facilidad se acostumbra representarlos como cambios lineales y expresarlos en unidades adimensionales o en porcentaje. En condiciones ordinarias, la magnitud de estos cambios en el concreto suele ser de un orden tal que conviene aproximar su medición a millonésimas ( $10^{-6}$ ), cuya equivalencia son las diez milésimas por ciento (0.0001%).

Los coeficientes de expansión y contracción del concreto pueden ser:

➤ Los coeficientes de contracción por secado.

La contracción por secado en el concreto es afectada por el contenido de cemento, los tipos de mezclas, el método curativo, los agregados, y condiciones de curado.

Un estimado del valor de contracción, basado en la resistencia indirecta a la tracción de 28 días, puede ser obtenido de la tabla 2.5.

**Tabla 2.5. Coeficientes de contracción por secado del concreto.**

<b>Resistencia Indirecta a la tracción edad: 28 días, kpa (psi).</b>	<b>Contracción, mm/mm o pulg/pulg</b>
≤ 2,100 (300)	0.0008
2,800 (400)	0.0006
3,400 (500)	0.00045
4,100 (600)	0.0003
≥ 4800 (700)	0.0002

Ref: AASHTO Design Guide, Section 2.5.2 and Table 2.9.

El interés por conocer la contracción del material radica en evitar o prevenir la fisuración de los elementos de concreto, modular correctamente las juntas de un piso o un pavimento y determinar el ancho necesario para dichas juntas.

Mucha de la literatura que al respecto existe, demuestra que los niveles de esfuerzos que se generan debido a las contracciones por secado, en varias ocasiones pueden superar a los que se generan debido a las deformaciones térmicas o mecánicas.

➤ Coeficientes de expansión térmica.

El coeficiente de expansión térmica del concreto depende grandemente del tipo de agregado empleado y de las proporciones de la mezcla. La pasta de cemento del concreto normal usualmente tiene un coeficiente de expansión térmica más alto

que el del agregado de la mezcla, pero como el agregado ocupa alrededor del 75 por ciento del volumen, son las características térmicas del agregado las que determinan el cambio de volumen del concreto durante un cambio de temperatura dado.

Los agregados a menudo son complejos en cuanto al contenido mineral que poseen, además los minerales varían ampliamente en sus características térmicas. Como ejemplo de estas variaciones, se tiene que los minerales silíceos tales como el cuarzo tienen un coeficiente térmico de aproximadamente  $0.000012/^{\circ}\text{C}$ , mientras que la calcita, la cual está presente en muchas rocas calizas, tiene un coeficiente de  $0.000001$  a  $0.000005/^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, el coeficiente de expansión térmica de las rocas que tienen un alto porcentaje de minerales silíceos es más alto que el de las que contienen un alto porcentaje de calcita.

En la tabla 2.6 se muestran algunos valores de coeficientes térmicos del concreto según el tipo de agregado utilizado.

**Tabla 2.6 Coeficiente de expansión térmica del concreto basado en el tipo de agregado (basado en el agregado fino y grueso).**

Tipo de agregado	Coeficiente de expansión térmica del concreto, $10^{-6}$ mm/mm/ $^{\circ}$ C ( $10^{-6}$ in/in/ $^{\circ}$ F)
Cuarzo	11.9 (6.6)
Piedra arenisca	11.7 (6.5)
Grava	10.8 (6.0)
Granito	9.5 (5.3)
Basalto	8.6 (4.8)
Caliza	6.8 (3.8)

Fuente: AASHTO Design Guide, Part II Section 2.5.2 and Table 2.10.

### 2.11 Pavimentos rígidos y pisos industriales.

Un pavimento es una estructura vial de una o más capas, comprendida entre la subrasante y la superficie de rodamiento, construida con materiales apropiados,

que tiene como función principal ofrecer una superficie de tránsito vehicular rápida, limpia, cómoda, segura y durable, además de ser resistente a los efectos del tránsito y del clima.

Un pavimento de concreto hidráulico, con o sin refuerzo, se diseña y construye para resistir las cargas e intensidad del tránsito; teniendo un costo inicial más elevado que el pavimento flexible, su período de vida varía entre 20 y 40 años, requiriendo un mantenimiento mínimo; realizado comúnmente en las juntas de. Los pavimentos de concreto simple pueden construirse con juntas, con o sin barras de transferencia; en ambos las losas deben ser de tres a seis metros.

Los pavimentos rígidos se caracterizan porque la superficie de rodadura es una losa de concreto hidráulico compuesto por agregado pétreo, cemento hidráulico y agua, la cual absorbe una mayor parte de los esfuerzos, deformándose muy poco bajo la acción de las cargas y distribuyéndose en un área muy grande. La losa viene colocada sobre una capa de material granular, casi siempre muy delgada y de una calidad no muy exigente llamada subbase, la cual no cumple una función estructural ya que es la losa la que disipa toda la carga.

### **2.11.1 Estructuración y tipos de pavimentos rígidos.**

#### **➤ Tipos de pavimentos rígidos**

1. Pavimentos de Concreto Hidráulico Simple (JPCP)
  - Sin elementos de transferencia de carga.
  - Con elementos de transferencia de carga.
2. Pavimentos de Concreto Hidráulico con Refuerzo de Acero (JRCP)
  - Con refuerzo de acero estructural.
  - Con refuerzo de acero no estructural.
3. Pavimentos de Concreto Hidráulico con Refuerzo Continuo (CRCP).
4. Pavimentos de Concreto Hidráulico Pre o Postensado (PCP)
5. Pavimentos de Concreto Hidráulico Reforzado con Fibras (SFRCP).

### ➤ Estructuración de pavimentos rígidos.

La estructuración del pavimento rígido se puede observar en la figura 2.5

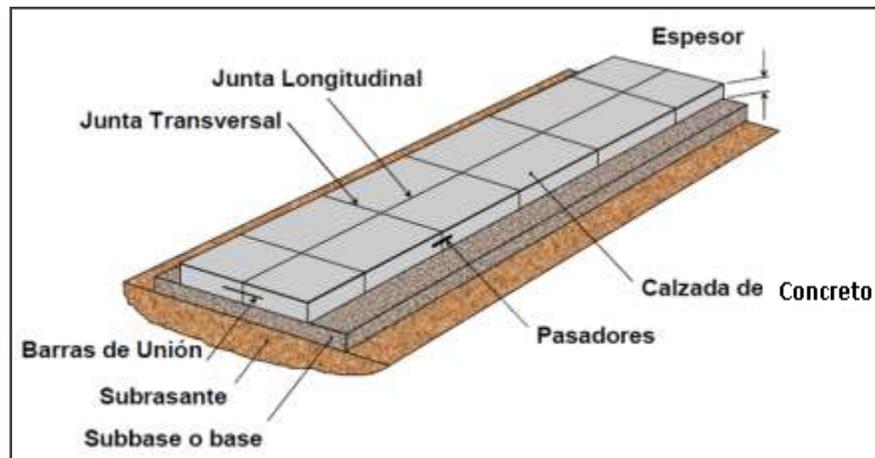


Figura 2.5 Estructuración de pavimentos rígidos.

### 2.11.2 Estructuración y tipos de pisos industriales.

Los pisos industriales son estructuras de concreto con características muy específicas para garantizar un comportamiento que permita desarrollar sobre ellas diferentes procesos en condiciones de servicio. La función primordial de la mayoría de los pisos de concreto es la de brindar un adecuado soporte a la aplicación de cargas, incluyendo personas, vehículos y diversos objetos.

Un piso industrial debe ser eficiente, durable, rentable y poseer las siguientes características: Resistencia mecánica (MR), Resistencia a la abrasión, Resistencia al impacto, resistencia a ataques químicos, impermeabilidad, superficie antipolvo, superficie antideslizante, facilidad de limpieza y mantenimiento, alta calidad estética y finalmente, un requerimiento cada vez más importante la baja contracción (menor a 450 mm).

### ➤ Estructuración de pisos industriales.

En los pisos industriales cada nivel estructural debe ser apto para resistir los esfuerzos a los que estará sometido; motivo por el cual es muy importante realizar

una buena selección de los materiales que conformaran las diferentes bases. A continuación se describe la estructuración de los pisos industriales; y en la figura 2.6 se presenta esquemáticamente la estructuración de los mismos.

#### ➤ **Subrasante.**

Generalmente se pueden utilizar suelos con módulos de reacción por encima de los 125 lbs/pulg<sup>3</sup> (gravas y arenas, arcillosas, limosas y con graduaciones desde pobremente graduadas hasta bien graduadas; clasificación en base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

Existen muchos métodos para mejorar el comportamiento del sistema del suelo, generalmente el suelo se densifica utilizando equipo de rodillado tal como aplanadora pata de cabra, rodillo neumático, o rodillos vibratorios; otro método de densificación es a través de métodos químicos (cemento portland, cal o bitumen), los cuales también requieren un proceso de compactación.

#### ➤ **Materiales de subbase.**

La subbase usualmente es un buen material de relleno económico. Normalmente estos materiales son de la clasificación G y S (gravas y arenas). Los materiales de subbase débiles, pueden ser estabilizados por la adición de químicos (cal, cemento portland) que son mezclados o combinados con el suelo, para posteriormente realizarle un proceso de compactación.

#### ➤ **Losa de concreto:**

La losa de un piso industrial generalmente posee espesores dentro de un rango de 12 a 20 cm; dependiendo de los requerimientos del piso y de la resistencia del concreto.

La losa de un piso industrial puede tener uno o más requisitos en cada zona de trabajo de la industria, entre los cuales se pueden citar:

- Tener resistencia al desgaste o abrasión mecánica.

- Tener resistencia a la erosión por agentes químicos externos.
- Poseer cualidades especiales, tales como características sanitarias, antideslizantes y otras.

Cada uno de los requisitos antes indicados demanda características especiales que debe poseer la superficie, razón por lo cual ésta debe protegerse superficialmente.

Existe en el mercado una gran variedad de protecciones superficiales. Sin embargo, para cada requisito es posible encontrar una solución técnica y económicamente óptima. La tabla 2.7 presenta soluciones a requerimientos superficiales de losas de concretos para pisos industriales; en la figura 2.10 se presenta la estructuración de los pisos industriales.

**Tabla 2.7 Soluciones a requerimientos superficiales de losas de concreto.**

<b>Requisito de la superficie.</b>	<b>Tipo de solución recomendada.</b>
Resistencia al desgaste o abrasión mecánica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Endurecedores superficiales, de origen silicio o metálico, para aplicación durante la construcción del piso.</li> <li>• Aplicación de morteros especiales de alta resistencia al desgaste.</li> </ul>
Resistencia a la erosión por agentes químicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación de morteros de productos basados en resinas poliméricas tal como las de origen epóxido.</li> </ul> <p>Observación: los recubrimientos epóxidos otorgan al piso además de impermeabilidad, elevadas resistencias mecánicas y al desgaste.</p>
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación de revestimientos basados en resinas</li> </ul>

sanitarias estériles.	o	poliméricas, como las de origen epóxido. Observación.: este tipo de revestimiento no acumula suciedad o bacterias.
--------------------------	---	---

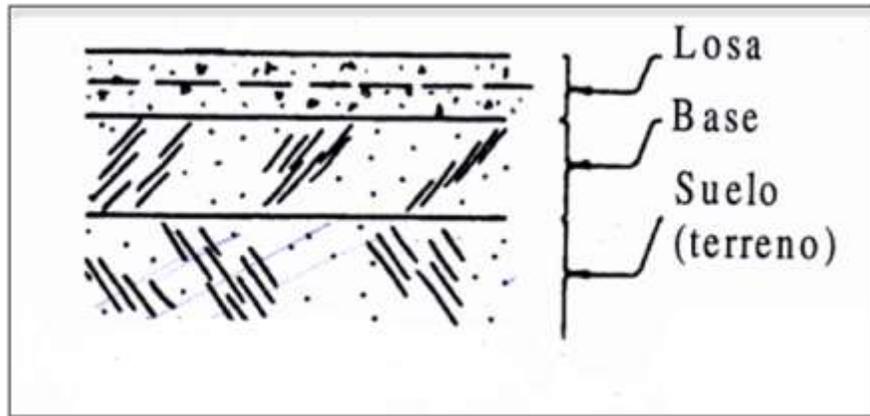


Figura 2.6 Estructuración pisos industriales, fuente ACI 360R-06

➤ **Clasificación de Pisos del Instituto Americano del Concreto (ACI).**

**Pisos clase 1: una sola capa, superficie expuesta.**

- Tipo de tránsito: tránsito peatonal.
- Uso: oficinas, iglesias, comercial, institucional, residencial de unidades, múltiples, decorativo.
- Consideraciones especiales: acabado uniforme, agregado antideslizante en áreas específicas, agregado mineral coloreado, pigmentos de color o agregado expuesto, disposición de juntas artísticas.
- Acabado final: acabado normal con llana de acero, acabado antideslizante donde se requiera.

**Pisos clase 2: una sola capa, superficie cubierta.**

- Tipo de tránsito: tránsito peatonal.

- Uso: oficinas, iglesias, comercial, gimnasios, institucional con recubrimientos, residencial de unidades.
- Consideraciones especiales: losas planas y niveladas apropiadas para recubrimientos aplicados, juntas de coordinación con recubrimientos aplicados.
- Acabado final: acabado ligero con llana de acero.

### **Pisos clase 3: dos capas superficie expuesta o cubierta.**

- Tipo de tránsito: tránsito peatonal.
- Uso: coronamiento adherido y no adherido sobre una losa base para edificios comerciales o no industriales.
- Consideraciones especiales:  
 Losa base: superficie buena, uniforme, a nivel.  
 Coronamiento no adherido: rompedor de adherencia en la losa base, espesor mínimo de 75 mm (3 in), reforzado.  
 Coronamiento adherido: agregado de tamaño apropiado, espesor mínimo de 19 mm (3/4 in).
- Acabado final:  
 Losa base: acabado allanado debajo de un coronamiento no adherido; superficie limpia texturizada debajo de un coronamiento adherido.  
 Coronamiento: para superficies expuestas, acabado normal con llana de acero; para superficie cubierta acabado ligero con una llana de acero.

### **Pisos clase 4: una sola capa, superficie expuesta o cubierta.**

- Tipo de tránsito: tránsito peatonal y vehicular ligero.
- Uso: institucional y comercial.
- Consideraciones especiales: Losa nivelada y plana apropiada para recubrimientos aplicados, agregados antideslizantes para áreas específicas
- Acabado final: acabado normal con llana de acero.

### **Pisos clase 5: una sola capa, superficie expuesta.**

- Tipo de tránsito: tránsito vehicular industrial (llantas neumáticas y llantas sólidas moderadamente blandas).
- Uso: pisos industriales para manufactura, procesamiento y almacenamiento.
- Consideraciones especiales: subrasante buena y uniforme, disposición de juntas, resistencia a la abrasión.
- Acabado final: Acabado duro con llana de acero.

### **Pisos clase 6: una sola capa, superficie expuesta.**

- Tipo de tránsito: tránsito vehicular industrial de trabajo pesado (ruedas duras y cargas pesadas sobre ruedas).
- Uso: pisos industriales sometidos a tránsito pesado; puede estar sometido a cargas de impacto.
- Consideraciones especiales: subrasante buena y uniforme, disposición de juntas, transferencia de cargas, resistencia a la abrasión.
- Acabado final: Endurecedor de superficie de agregado especial metálico o mineral, allanado repetido con acero duro.

### **Pisos clase 7: dos capas, superficie expuesta.**

- Tipo de tránsito: tránsito vehicular industrial de trabajo pesado (ruedas duras y cargas pesadas sobre ruedas).
- Uso: pisos de dos capas adheridas sometidas a tránsito pesado y a impacto.
- Consideraciones especiales:  
Losa base: subrasante buena y uniforme, refuerzo, disposición de juntas, superficie nivelada.  
Coronamiento: compuesto de agregado bien graduado, todo mineral o todo metálico. Espesor mínimo de sobrelosas ligadas de 19mm (3/4”).

Endurecedor de superficie de agregado metálico o mineral aplicado a coronamientos simples para darle firmeza.

- Acabado final: superficie de losa limpia y de base texturizada para un coronamiento adherido subsecuente. Las llanas metálicas especiales para coronamiento son opcionales, acabado duro bien allanado. Deberá coordinarse la separación de juntas en la sobrelosa, con el sistema de juntas en la losa base.

#### **Pisos clase 8: dos capas, superficie expuesta o cubierta.**

- Tipo de tránsito: tránsito vehicular ligero, industrial, de trabajo pesado.
- Uso: coronamiento no adherido sobre pisos nuevos o viejos o en donde lo dicta la secuencia de construcción o el programa.
- Consideraciones especiales: rompedor de adherencia en la losa base, espesor mínimo de 100mm (4 pulgadas), resistencia a la abrasión.
- Acabado final: acabado normal o duro con llana de acero, endurecedor de superficie de agregado especial metálico o mineral, allanado repetido con acero duro.

#### **Pisos clase 9: capa simple o coronamiento, superficie expuesta.**

##### **Pisos planos y súper planos.**

- Tipo de tránsito: vehículos de manejo o robóticos que requieren tolerancias específicas, materiales especiales.
- Uso: almacenes de bahías altas y pasillos angostos; estudios de televisión, pistas de hielo.
- Consideraciones especiales: requisitos variables de la calidad del concreto. No pueden usarse endurecedores aplicados por espolvoreado, a menos que se haga una aplicación especial y se tenga mucho cuidado.
- Acabado final: seguimiento estricto de técnicas de acabado de los pisos súper planos.

En algunos complejos, donde el manejo de los materiales requiere de características muy estrictas de nivelación y planicidad, es necesaria la construcción de pisos planos y/o súper planos.

Estos pisos podrán construirse en una capa; o en dos capas, ligadas (similar a los pisos clase 7) o no ligadas (similar a los pisos clase 8).

### 2.11.3 Tipos de juntas.

Las juntas se clasifican en juntas transversales y longitudinales, las cuales a su vez se dividen en contracción, construcción y de aislamiento. En la figura 2.7 se presenta un croquis de la vista en planta de la ubicación de las juntas en un pavimento de concreto.

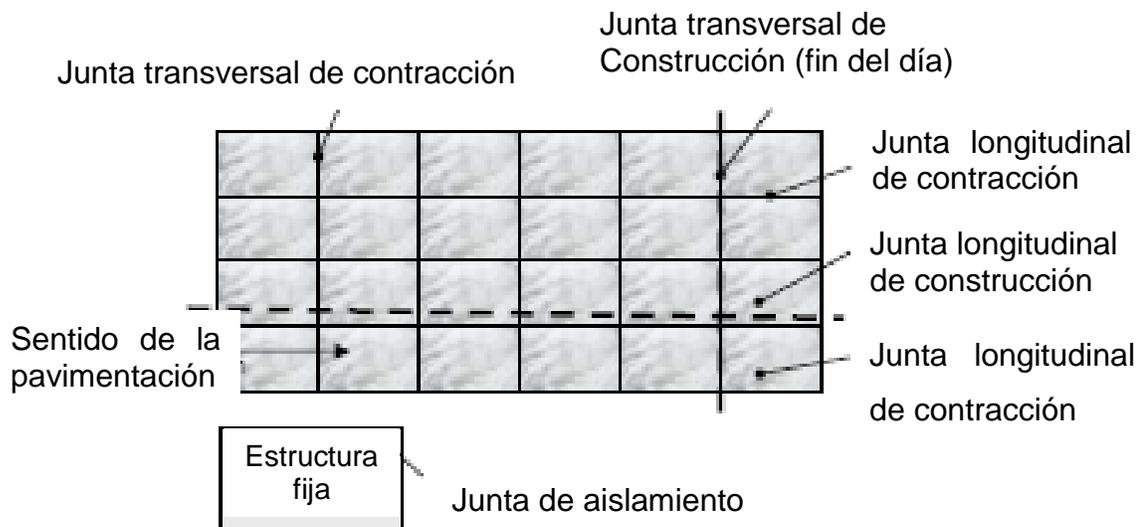


Figura 2.7 Tipos de juntas en pavimentos de concreto.

### TIPOS DE JUNTAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

#### ➔ Juntas transversales de contracción.

Estas juntas (figura 2.8) se construyen transversalmente al eje central del pavimento y están debidamente espaciadas para controlar las fisuras, que en la mayoría de los casos ocurre a edad temprana de la fundición de la losa por

cambio de temperatura y pérdida de agua en la mezcla, y por efectos de las contracciones posteriores.

Algunos recomiendan cortar las juntas con esviaje para ayudar a disminuir el impacto de las cargas dinámicas a través de las juntas, ya que eliminan el paso simultáneo de las ruedas del eje sobre la junta, reduciendo su deformación y esfuerzo, pero básicamente se utilizan en pavimentos sin dovelas y para tránsito reducido. Además, no sustituyen ningún mecanismo de transferencia de carga. Estas juntas están inclinada  $1/6$ ; generando un ángulo obtuso, entre el borde del pavimento y la junta. De esta manera cada rueda del eje pasa por la junta en un tiempo distinto y como consecuencia de esto, los esfuerzos y las deflexiones en la junta se reducen y con ellos la posibilidad del bombeo.

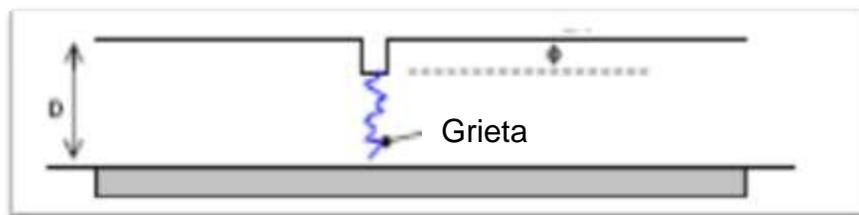


Figura 2.8 Esquema de grieta inducida, Fuente: Instituto Mexicano del Concreto.

#### ➤ **Juntas transversales de construcción.**

Son las juntas que se colocan al final de un día de pavimentación o por interrupción en los trabajos. Estas juntas se deben localizar y construir en el lugar planeado siempre que sea necesario; además, se deben construir perpendiculares al centro de la vía, aun cuando las juntas de contracción tengan esviaje.

#### ➤ **Juntas transversales de aislamiento.**

Aíslan el pavimento de una estructura o área pavimentada, disminuyendo esfuerzos a compresión que se presenten entre dos secciones; ocupando toda la profundidad y ancho de las estructuras fijas. Las juntas de aislamiento permiten que se presente diferenciales anticipados de movimientos verticales y horizontales entre un pavimento y otra estructura sin dañar al pavimento o la estructura.

➤ **Juntas transversales de expansión.**

Se realizan cuando el pavimento es construido a temperatura ambiente inferior a los 4°C, o cuando las juntas de contracción permiten la infiltración de materiales incompresibles, cuando los materiales usados en el pavimento han mostrado en experiencias pasadas, notorias características expansivas. Sin embargo, bajo condiciones normales de trabajo las anteriores condiciones no aplican, haciendo innecesaria la utilización de estas juntas.

➤ **Juntas longitudinales de construcción.**

Las juntas longitudinales evitan la formación del agrietamiento longitudinal; estas grietas normalmente se desarrollan por los efectos combinados de las cargas y las restricciones del alabeo de la losa una vez que el pavimento está sujeto al tránsito. Estas juntas se realizan cuando los carriles se construyen con edades diferentes, o por las diferentes pasadas del tren de pavimentación, incluyendo las generadas por las líneas de servicio o bermas.

Las juntas longitudinales de construcción se realizan cortando con disco en el concreto endurecido ó formando una ranura en el concreto fresco, de una manera muy similar al caso de las juntas transversales de contracción.

➤ **Juntas longitudinales de contracción.**

Estas juntas dividen los carriles y controlan el agrietamiento cuando se construyen dos o más carriles simultáneamente; o cuando los carriles tengan más de 4.5 m de ancho, a menos que la experiencia local indique que el pavimento ha tenido un comportamiento satisfactorio en su estructura.

### **TIPOS DE JUNTAS EN PISOS INDUSTRIALES.**

- Junta transversal de expansión/aislamiento: estas juntas son colocadas en donde se permita el movimiento de la losa sin dañar estructuras adyacentes (estructuras de drenaje, muros, etc.).

- Junta longitudinal de contracción: son las juntas longitudinales intermedias dentro del área o franja del piso que se esté colando y controlan el agrietamiento donde van a ser colados en una sola franja dos o más losas de concreto.
- Juntas transversales de contracción: son las juntas que son construidas transversalmente al sentido del colado y que son espaciadas para controlar el agrietamiento provocado por los efectos de las contracciones como por los cambios de temperatura y de humedad.
- Junta longitudinal de construcción: estas juntas unen losas adyacentes cuando van a ser coladas las franjas o áreas en tiempos diferentes.

#### **2.11.4 Efectividad de las juntas.**

La efectividad de la junta es un factor que mide la capacidad que tiene una junta de transferir algo de la carga de un lado de la junta a otro, en porcentaje. Esta puede ser calculada mediante la siguiente ecuación.

$$E = \frac{2\Delta_u}{\Delta_L + \Delta_u} \times 100$$

Dónde:

E = Porcentaje de eficiencia de la junta.

$\Delta_u$  = Deflexión del lado no cargado de la junta.

$\Delta_L$  = Deflexión del lado cargado de la junta.

Si la efectividad de la junta es del 100%, está en la capacidad de transmitir la mitad de la carga aplicada, pero si es 0% de efectividad indica que no existe transferencia de carga a través de la junta (Ver figura 2.9). Una adecuada transferencia de cargas disminuye las deflexiones, reduce el escalonamiento, el descascaramiento y las fisuras de esquina. Una efectividad del 75% o más, se considera adecuada para cargas de tránsito medias y pesadas.

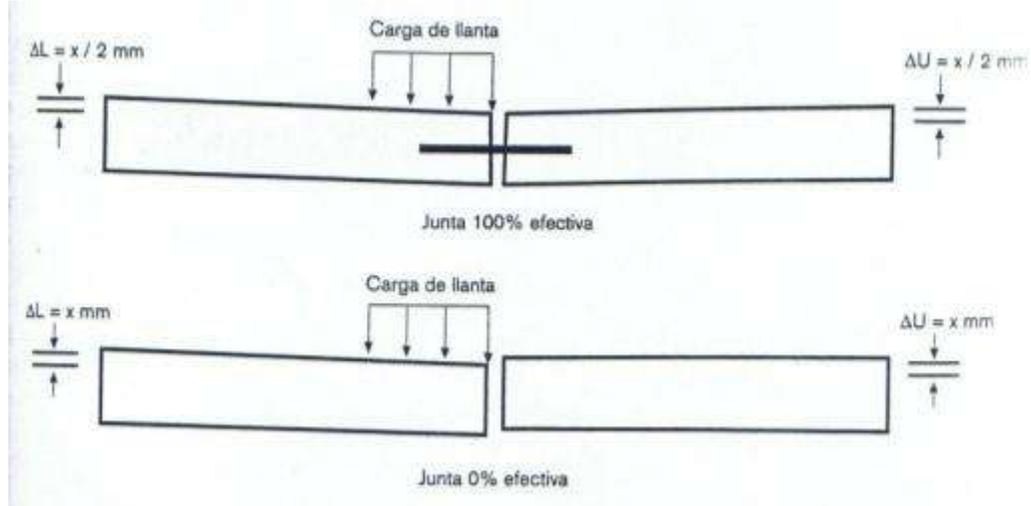


Figura 2.9 Efectividad de la transferencia de carga.

### 2.11.5 Diseño de juntas en pavimentos rígidos y pisos industriales.

Las juntas, le permiten al concreto un ligero movimiento, por lo cual, se reducen los esfuerzos por restricción, evitando de ésta manera el agrietamiento. Sin embargo, las juntas que cumplen una función más estética que las grietas, requieren de un sellado y de un posterior mantenimiento para controlar el despostillamiento en los bordes. La planeación para el diseño y colocación de juntas de concreto es muy importante, proponiendo el tipo, número, ubicación y espaciamiento de las juntas, ya que de esta manera se logra una mejor estimación en los costos y reducción de errores durante la construcción.

La práctica común en las juntas de contracción es regresar posteriormente y realizar un corte a una profundidad de  $\frac{1}{4}$  del espesor de la losa para crear el depósito para el material de sello, ya que selladas las juntas de contracción mejorarán el nivel de servicio al circular por ellas, así como su apariencia.

Para diseñar un adecuado sistema de juntas se recomienda evaluar las siguientes recomendaciones:

- Consideraciones ambientales.
- Espesor de losa.
- Transferencia de carga.

- Tráfico.
- Características del concreto.
- Tipo de subrasante ó terreno de apoyo.
- Características del sellador.
- Apoyo lateral.
- Experiencia pasada.

Según el espesor del pavimento se recomiendan espaciamientos para juntas, los cuales se muestran en la tabla 2.8

**Tabla 2.8 Espaciamiento de juntas recomendado para pavimentos de concreto.**

<b>Espesor de pavimento.</b>	<b>Espaciamiento de junta.</b>
5 in. (125 mm )	10- 12.5 ft (3.0 - 3.8 m )
6 in. (150 mm )	12-15 ft (7 - 4.6 m )
7 in (175 mm )	14 – 15 ft ( 4.3 - 4.6 m )
8 in. (200 mm ) o mas	15 ft ( 4.6 m )

➤ **Diseño de Junta Transversal de Contracción.**

El espaciamiento, profundidad del corte y el tiempo en que se realice son factores críticos para el comportamiento de las juntas.

En la práctica se dimensiona la separación entre juntas transversales, en base a la experiencia sobre el comportamiento del pavimento local en servicio; estudios teóricos y prácticos han determinado que el espaciamiento óptimo depende de la resistencia del concreto, la rigidez de la subbase o subrasante, espesor de la losa de concreto y propiedades del material sellador de juntas.

La ACPA<sup>4</sup> recomienda un espaciamiento máximo de 24 veces el espesor de la losa para sub-bases granulares, y un espaciamiento máximo de 21 para subbases estabilizadas. La PCA<sup>5</sup> recomienda para pavimentos de concreto simple con refuerzo en las juntas una distancia de 4.5 m hasta 7.5 m, siendo de uso común seis metros. Para losas reforzadas el espaciamiento máximo es de nueve metros. Existe una regla práctica que nos permite dimensionar los tableros de losas para inducir el agrietamiento controlado bajo los cortes de losas, sin necesidad de colocar acero de refuerzo continuo:

$$SJT = (21 \text{ a } 24)D$$

Dónde:

SJT = Separación de Juntas Transversales ( $\leq 4.5$  m)

D = Espesor del pavimento.

Normalmente se utiliza el 21 cuando tenemos mayor fricción entre la sub-base y el pavimento de concreto, como en los casos en donde tenemos bases estabilizadas, bases con textura muy cerrada o whitetopping. El valor de 24 se utiliza cuando la fricción entre la sub-base y el pavimento corresponde valores normales, como en el caso de sub-bases granulares.

La otra dimensión que tiene que ver con la modulación de losas es la separación de juntas longitudinales, sin embargo esta está referenciada a la forma de los tableros de losas.

La forma ideal de un tablero de losa es la cuadrada, sin embargo no siempre es posible y conveniente tener las losas perfectamente cuadradas, por lo que nos vemos obligados a considerar un cierto grado de rectangularidad. La relación entre largo y ancho de un tablero de losas no deberá estar fuera de este límite:  $0.71 < x / y < 1.4$ .

---

<sup>4</sup>American Concrete Pavement Association

<sup>5</sup>Portland Cement Association

#### ➤ **Diseño de juntas transversales de construcción.**

En el diseño, si es posible se hace coincidir las juntas de construcción con una de contracción, si no es posible, se recomiendan que la junta se empalme en el tercio medio de la placa con pasajuntas (acero liso). Ahora si se presenta en los dos primeros tercios de la separación normal de las juntas, la junta deberá ser endentada (machihembrada) con barras de amarre (acero corrugado), para prevenir que la junta no agriete la losa adyacente. Pero si coincide originalmente donde se planeó, se construye una junta de contracción o una junta de aislamiento, que se deberá sellar de acuerdo a las especificaciones de la junta originalmente planeada, con la excepción de que las juntas de construcción transversales no requieren de un corte inicial.

#### ➤ **Diseño de Juntas Longitudinales de contracción.**

La profundidad del corte ó de la ranura deberá ser de un tercio del espesor de la losa ( $D/3$ ) y el tiempo ó el momento para hacer el corte inicial no es tan crítico como en el caso de las juntas transversales de contracción ya que el movimiento de contracción longitudinal no es tan grande como la contracción transversal. La transferencia de carga en este tipo de juntas se puede dar a través de juntas endentadas, o por barras de transferencia de carga; las juntas endentadas pueden ser de forma trapezoidal o semicircular.

En las juntas endentadas se necesitan las barras de anclaje para mantener cerrada la junta longitudinal y garantizar que se dé la transferencia de carga, por lo que éstas deben cumplir con las mismas condiciones que las juntas longitudinales de contracción que se insertan en la concavidad de la junta.

Las barras de anclaje pueden aportar toda la transferencia de cargas, cuando no se utilizan juntas endentadas, ya que el tránsito vehicular casi nunca pasa por encima de estas juntas.

### ➤ **Diseño de Juntas de Aislamiento y de Expansión.**

El diseño varía para cada estructura de la forma siguiente:

- Intersecciones y rampas: la junta no debe tener dovelas para permitir el movimiento horizontal diferencial y evitar el daño del pavimento colindante; en este caso se construye la losa aumentándole su espesor para absorber los esfuerzos de borde no transferidos.
- Puente: podría tener dovelas para incrementar la transferencia de carga y eficiencia de la junta.
- Pozos de visita, alcantarillas, estructuras de alumbrado y edificios: no tienen bordes ensanchados ni dovelas, debido a que éstas son colocadas alrededor de otros objetos y no requieren de transferencia de cargas.

Las juntas de aislamiento tienen un ancho de 18 a 25 mm, tomando en cuenta que se generan movimientos excesivos, migración de losas, cuando el ancho de las juntas es grande; en estas juntas se coloca un sellador compresible que llene la caja de la junta, que no sea absorbente ni reactivo, normalmente es de cartón asfaltado tipo fexpanocelotex.

#### **2.11.6 Selladores de juntas.**

El objetivo del sellador es minimizar la infiltración del agua superficial y de materiales incompresibles al interior de la junta. Además de disminuir la corrosión de los dispositivos de transferencia de carga.

La infiltración de agua provoca un ablandamiento de la subrasante o de la subbase, perdiendo apoyo estructural el pavimento. En el caso de los materiales incompresibles, contribuiría al descascaramiento del pavimento y en caso extremo producir roturas en la losa.

En juntas longitudinales el sellante no necesita ser tan elástico como para la junta transversal, ya que las juntas longitudinales están amarradas y prácticamente no tienen movimiento. Mientras que en las juntas transversales, los movimientos

longitudinales inducen mayores estados de tensión y deformación en el sellador de los que se dan en las longitudinales, debiendo el sellante soportar estos esfuerzos.

#### ➤ Materiales sellantes.

El mercado ofrece una vasta gama de materiales sellantes, tanto moldeados en campo, sello líquido, como preformados por compresión. El éxito de los selladores líquidos, depende de que la adherencia a las paredes de las juntas se mantenga por largo plazo y el de los selladores preformados depende del rechazo lateral a largo plazo.

Las propiedades del sellante depende de su aplicación y de las condiciones climáticas durante su instalación. Entre las propiedades a considerar incluyen:

- Elasticidad: capacidad de un sellador para volver a su forma original después de que se estire o se comprima.
- Compatibilidad: entre el sellador y el cordón de respaldo (backer rods).
- Módulo: cambio de las tensiones internas en un sellador mientras se está estirando, o comprimiendo, considerando un rango de temperaturas (rigidez de material). Un módulo bajo es deseable e importante en clima frío.
- Adherencia: la capacidad de un sellador para adherirse al concreto. La adherencia inicial es de igual importancia que la de largo plazo. No es aplicable a los sellos preformados que se aplican comprimidos.
- Cohesión: capacidad del sellante para resistir el desgarro causado por la tracción. No es aplicable a los sellos preformados que se aplican comprimidos.
- Resistencia a los combustibles y al clima: sobre todo a los rayos solares ultravioleta y el ozono.

#### **2.11.7 Tipos de sellantes.**

Entre los tipos de sellantes mas conocidos y comercializados en el medio se pueden encontrar los siguientes:

➤ Sellante líquido.

El sellante líquido se clasifica en termoplástico y termoestable. Los termoplásticos como el asfalto, se endurecen al perder el calor inicial que los mantuvo en el inicio en estado líquido o semilíquido; teniendo la desventaja de que con el tiempo y los cambios de temperatura, se cristaliza, perdiendo las características elásticas necesarias. Los sellos de fraguado térmico y curado químico, como el alquitrán de hulla con polisulfuros o poliuretanos, el metano y bicomponentes del epóxido, son catalizadores, que con el calor inicial dentro del material lo endurecen, auxiliados posteriormente por la humedad ambiente. Estos son de costos más elevados, pero más durables y más resistentes a la penetración, que permite mayores movimientos entre las juntas.

Para aplicar estos sellante no se instala en concreto que haya curado menos de 28 días. Aunque es preferible demorar la instalación del sellante de 60 a 90 días para que el concreto se encoja. El sellante líquido se puede verter en frío o caliente.

➤ Sellante vertido en frío.

Entre los selladores vertidos en frío esta el silicón, de un componente simple que no requiere de mezcla ni calentamiento y que al ser aplicado cura en 30 min, complementándose con la humedad del aire, aunque también este proceso se ve afectado por las condiciones ambientales y especificaciones del fabricante, tales como, no ser aplicada cuando llueve o con temperaturas bajo el punto de rocío. Estos selladores son adecuados para climas con grandes diferencias de temperatura. La mayoría tiene un módulo elástico bajo, tabla II, que permite una buena recuperación de las deformaciones de tracción y compresión; pudiendo soportar, por lo menos, un 100% de extensión y un 50% de compresión sin sufrir daños.

➤ Sellante vertido en caliente.

Estos sellantes requieren una temperatura de calentamiento entre 175 a 200 °C para su aplicación. Los fabricantes recomiendan derretir el material en calderas de

tanque doble, equipado en su interior con un agitador, para la distribución uniforme de la temperatura, y el exterior lleno de aceite para evitar pérdidas de calor. Para el calentamiento se utiliza gas y no combustibles fósiles como madera, carbón, etc.; además, la caldera no debe tener contacto directo con el suelo. Para no perder la temperatura entre la caldera y la boquilla de eyección, se utilizan mangueras con aislamiento térmico.

➤ Sellos preformados.

Estos selladores vienen listos para su instalación; por lo que no necesitan calentarse, mezclarse, ni curarse en el terreno. Poseen la capacidad de sellar cuando hay presente mucha humedad. Proveen una efectiva reducción en astillamientos de las juntas de concreto y alta resistencia al combustible de los aviones de propulsión a chorro. Estos selladores están en compresión durante toda su vida útil. El neopreno es el componente principal, caucho sintético, que tiene la capacidad de presión, resiliente bajo compresión. El sello consiste en un perfil hueco de celdas múltiples que se puedan encoger en dirección perpendicular a su eje, a manera de fuelle, que genera la fuerza expansiva que mantiene al sellador contra las paredes de la caja de la junta.

Las dimensiones típicas del sello de neopreno, se muestran en la tabla 2.9 y se diseñan con respecto al ancho de la junta y el largo de la losa. Debiéndose considerar la temperatura de colocación.

**Tabla 2.9 Tamaños recomendados para sellos de compresión preformados**

<b>Longitud de losas (m)</b>	<b>Ancho mínimo de las cajas de juntas (mm)</b>	<b>Profundidad mínima de las cajas de juntas (mm)</b>	<b>Ancho del sello en reposo (mm)</b>
4.5	6	38	11
6.0	8	38	16
7.5	10	50	17

9.0	13	50	25
-----	----	----	----

Fuente: Instituto Colombiano de Pavimentos de Concreto (ICPC).

➤ Cordones de respaldo.

Estos cordones impiden que el sello líquido fluya hasta el fondo de la junta, evitando la adhesión del sello con el fondo de la caja. Incrementan las tensiones en el sellador y ayudan a definir el factor forma, optimizando la cantidad de sellador usado, por lo que se recomienda seguir las siguientes consideraciones:

- Espuma de polietileno: espuma de celdas cerradas; no absorbe el agua y es moderadamente compresible. Es más adecuada para los selladores de vertido en frío, ya que podría derretirse al contacto con los materiales de vertido en caliente.
  - Espuma eslabonada de polietileno: espuma de celdas selladas; no es compatible con los selladores de vertido en caliente. No absorbe el agua y es moderadamente compresible.
  - Espuma de poliuretano: espuma de celdas abiertas; absorbe el agua, pero no se derrite cuando se usa para sellante vertido caliente, y es muy compresible.
- El tamaño de los cordones depende del ancho de la caja de la junta., tabla 2.10. Los cordones se comprimen un 25% para asegurarse que permanezcan a la profundidad deseada dentro de la caja.

**Tabla 2.10 Tamaños recomendados para cordones de respaldo.**

Ancho de la caja (mm)	Diámetro del cordón de respaldo (mm)
3	6
5	6
6	8
8*	10

10	13
13	16
16	19
19	22
22	25
25	32
32	38
38	50

\* Para las juntas transversales normales no se deben tener cajas de más de 8 mm de ancho, Fuente: ICPC

## 2.12 Diseños de mezcla de concreto.

El proporcionamiento de mezclas de concreto, más comúnmente llamado diseño de mezclas es un proceso que consiste de pasos dependientes entre sí:

- a) Selección de los ingredientes convenientes (cemento, agregados, agua y aditivos).
- b) Determinación de sus cantidades relativas “proporcionamiento” para producir un concreto de trabajabilidad, resistencia a compresión, durabilidad apropiada, y tan económico como sea posible,

Estas proporciones dependerán de cada ingrediente en particular los cuales a su vez dependerán de la aplicación particular del concreto. También podrían ser considerados otros criterios, tales como minimizar la contracción y el asentamiento o ambientes químicos especiales. Aunque se han realizado gran cantidad de trabajos relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas, en buena parte permanece como un procedimiento empírico, y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño, están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad especificada así como una trabajabilidad apropiada. Además es asumido que si se logran estas dos propiedades las otras propiedades del

concreto también serán satisfactorias (excepto la resistencia al congelamiento y deshielo u otros problemas de durabilidad tales como resistencia al ataque químico).

El procedimiento realizado para el diseño de la mezcla se desarrolla en el Capítulo 3 “Caracterización de materiales y diseño de mezcla”.

### **2.12.1 Factores a tomar en cuenta en el diseño de la mezcla para determinar la durabilidad del concreto.**

#### **a) Permeabilidad.**

La permeabilidad es causada por la presencia de poros interconectados debidos a compactaciones pobres o por agrietamiento y es importante evitarlo porque puede propiciar un deterioro prematuro del concreto. El deterioro se puede reducir elaborando mezclas con buenas propiedades geológicas que permitan alcanzar una buena compactación en su colocación, además de contar con agregados bien graduados y un contenido de agua bajo.

Si se desea un concreto de baja permeabilidad, o el concreto ha de estar sometido a procesos de congelación y deshielo en condición húmeda, se deberá cumplir con lo que establece el ACI 211.1 en cuanto a condiciones de exposición y relación agua/cemento.

#### **b) Contracción.**

La contracción del concreto fresco afecta la durabilidad, ya que los agrietamientos resultantes abren conductos a través de los cuales puede penetrar agua y materiales deletéreos. Este fenómeno se puede reducir utilizando bajas cantidades de cemento, bajas relaciones A/C y no usar agregados con partículas planas (lajeados).

#### **c) Resistencia a la abrasión.**

La resistencia a la abrasión es muy importante para las áreas que van a estar expuestas al desgaste, como es el caso de la superficie de rodamiento del

pavimento, ya que el efecto del paso de las llantas de los vehículos es altamente abrasivo, especialmente cuando el pavimento esta húmedo y la superficie contiene partículas sueltas de arena y grava. La respuesta al efecto abrasivo se produce progresivamente, inicialmente la resistencia se basa en la relación A/C de la mezcla, el terminado superficial y el curado.

**d) Resistencia.**

En general las especificaciones del concreto requerirán una resistencia mínima a compresión. Estas especificaciones también podrían imponer limitaciones en la máxima relación agua/cemento (a/c) y el contenido mínimo de cemento. Es importante asegurar que estos requisitos no sean mutuamente incompatibles. No necesariamente la resistencia a compresión a 28 días será la más importante, debido a esto la resistencia a otras edades podría controlar el diseño.

**e) Trabajabilidad.**

Claramente un concreto apropiadamente diseñado debe permitir ser colocado y compactado apropiadamente con el equipamiento disponible. El acabado que permite el concreto debe ser el requerido y la segregación y sangrado deben ser minimizados. Como regla general el concreto debe ser suministrado con la trabajabilidad mínima que permita una adecuada colocación.

**2.12.2 Graduación de los agregados en el diseño de la mezcla.**

Siempre se pretende que en las mezclas de concreto convencional de consistencia plástica, la curva granulométrica de la grava sea razonablemente continua; es decir, que aunque dicha curva exhiba inflexiones no se manifieste ausencia total de partículas en ningún intervalo. Esto se justifica porque para obtener mezclas de concreto que sean manejables y al mismo tiempo no segreguen con facilidad, es necesario que exista continuidad en los diferentes tamaños de las partículas de grava en todo su intervalo dimensional. La composición granulométrica de la grava puede ser objeto de maniobra y ajuste en mayor o menor grado, dependiendo de su origen y del tamaño máximo que se

utilice. Por ejemplo, para tamaños máximos hasta 20 mm (3/4") es usual que la grava se maneje en una sola fracción que abarque todo su intervalo nominal, en cuyo caso la posibilidad de poder ajustar su granulometría depende de su origen: si la grava se produce por trituración, es factible ejercer cierto control en este aspecto mediante ajustes en el proceso de fragmentación; pero cuando la grava procede de un depósito natural, si bien existe la posibilidad de hacer una explotación selectiva y/o una trituración correctiva, no siempre es práctica su realización y entonces resulta necesario adaptarse a la granulometría de este intervalo como se halla en el depósito. Cuando el tamaño máximo excede a 20 mm es recomendable, y así se acostumbra, dividir la grava en dos o más fracciones, de manera que así se dispone de la facilidad para acomodar su granulometría a un cierto modelo deseable, mediante la dosificación proporcionada de sus diferentes fracciones.

#### ➤ **Granulometría de la arena.**

La composición granulométrica de la arena se determina cribándola por siete mallas cuyas aberturas se duplican consecutivamente desde 150 micras hasta 9.5 mm, con lo cual se obtienen otros tantos grupos de partículas; y para hacer la evaluación de las proporciones en que resultan estos grupos, se utilizan dos medios: 1) se compara el porcentaje que representa cada grupo, con respecto a determinados límites establecidos empíricamente, y 2) se calcula el llamado módulo de finura, que corresponde a la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada malla, dividida entre cien, y también se le compara contra ciertos valores extremos. Para la aplicación del primer medio, es común considerar los límites granulométricos establecidos en la especificación ASTM C 33. En cuanto al módulo de finura, la propia especificación señala como límites de tolerancia un valor mínimo de 2.3 y un máximo de 3.1, con el requisito adicional de que ningún grupo de partículas represente más de 45 por ciento del total; normalmente se considera que si el módulo de finura resulta inferior a 2.3 la arena es demasiado fina, y si resulta superior a 3.1 es demasiado gruesa.

## **CAPÍTULO III**

# **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO DE MEZCLA.**

### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta, la pasta está compuesta de cemento y agua, la cual une a los agregados (arena y grava). Dosificar una mezcla de concreto es determinar la combinación más práctica y económica de los agregados disponibles, cemento, agua y en ciertos casos aditivos; con el fin de producir una mezcla con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecerse a la velocidad apropiada adquiera las características de resistencia y durabilidad necesarias para el tipo de construcción en que habrá de utilizarse.

Para realizar un diseño o una dosificación de mezcla con el cual se logre la resistencia requerida en el concreto, es necesario realizar una caracterización de los materiales; en la cual se determinan las características físicas y químicas de los agregados con el fin de lograr la mejor combinación de los recursos, ya que los agregados por su naturaleza son los que más variación presentan, ocupan del 60% al 75% del volumen del concreto y tienen fuerte impacto en: demanda de agua, trabajabilidad, módulo de elasticidad, durabilidad y expansión térmica del concreto. La selección de materiales y el control adecuados de buena calidad son esenciales para darle al concreto capacidad para resistir la acción de agentes atmosféricos y químicos, dándole durabilidad al ataque de procesos de deterioro como la abrasión.

Para encontrar las proporciones más apropiadas, será necesario realizar varias mezclas de prueba; las características de las mezclas de prueba indicaran los ajustes que deben hacerse en la dosificación.

### **3.2 MÉTODO DE LA AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 211.1 (97).**

**Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto de peso normal, pesado y masivo.**

### **3.2.1 Descripción del método ACI 211.1.**

La selección de las proporciones de concreto implica un balance entre economía razonable y los requisitos específicos de colocación, resistencia, durabilidad, densidad y apariencia. Las características requeridas se rigen por el empleo que se va a dar al concreto y por las condiciones que se espera encontrar en el momento del colado. El método ACI para diseño de mezclas describe procedimientos para selección y ajuste de proporciones para concreto de peso normal, ambos con y sin aditivos químicos, puzolanas y materiales escoriaados. Un método está basado en un peso estimado del concreto por unidad de volumen; el otro está basado en cálculos del volumen absoluto ocupado por los ingredientes del concreto. Los procedimientos toman en consideración los requerimientos para colocación, consistencia, resistencia, y durabilidad. El método proporciona una primera aproximación de proporciones pretendidas para ser verificadas por mezclas de prueba en el laboratorio o en el campo y ajustadas como sea necesario, para producir las características deseadas en el concreto.

### **3.2.2 Procedimiento.**

- El procedimiento para la selección de proporcionamiento de mezclas dados en esta sección es aplicable a concreto de peso normal, aunque pueden emplearse los mismos datos y procedimientos básicos para seleccionar las proporciones de concretos pesados y masivos.
- La estimación de los pesos de las mezclas de concreto requeridos implica una secuencia de pasos lógicos y directos que de hecho, ajustan las características de los materiales disponibles a una mezcla adecuada para el trabajo. Las especificaciones de la obra pueden dictar todas o algunas de las siguientes recomendaciones:
  - Máxima relación agua/cemento o agua/materiales cementantes.
  - Máximo contenido de cemento.
  - Contenido de aire.

- Revenimiento.
  - Tamaño máximo del agregado.
  - Resistencia.
  - Otros requerimientos relacionados con aspectos tales como sobre-diseño de resistencia, aditivos y tipos especiales de cemento, otros materiales cementantes o agregado.
- Independientemente de si las características del concreto son prescritas a través de las especificaciones o si son dejadas al criterio individual de la persona que está seleccionando las proporciones, el establecimiento de los pesos por metro cúbico de concreto pueden ser adecuadamente logrados con la siguiente secuencia:

### **Paso 1: Elección del revenimiento.**

Si el revenimiento no se ha especificado, su valor apropiado para el trabajo puede ser seleccionado a partir de la Tabla 3.1 de este documento, o Tabla N°3 del código ACI 211.1 (97). Los rangos del revenimiento que se muestran aplican cuando se usa vibración para consolidar el concreto.

**Tabla 3.1: Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción.**

Tipos de Construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Zapatas, campanas y muros de subestructura	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	5	2.5

NOTA: El revenimiento puede ser incrementado cuando se usan aditivos químicos

con tal que una vez se haya incorporado al concreto, este tenga la misma o una más baja relación agua/cemento o agua/cementantes y no exhiba segregación potencial o excesivo sangrado.

(\*) Puede incrementarse en 1 pulgada cuando no se usa vibración para consolidar el concreto.

## **Paso 2: Elección del tamaño máximo del agregado.**

Los tamaños más grandes de agregados bien graduados tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños. Por esto, los concretos con agregados de tamaños mayores requieren menos mortero por volumen unitario de concreto.

Generalmente, el tamaño máximo de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo debe exceder de:

- a.  $1/5$  de la menor dimensión entre los costados de las cimbras.
- b.  $1/3$  del espesor de la losa.
- c.  $3/4$  del espaciamiento mínimo libre entre varillas o alambres individuales de refuerzo, paquetes de varillas, cables o ductos de pretensado.

A veces, estas limitaciones se pasan por alto si la trabajabilidad y los métodos de compactación permiten que el concreto sea colado sin cavidades o huecos. Cuando se desea un concreto de alta resistencia, se pueden obtener mejores resultados con agregados de tamaño máximo reducido, ya que éstos producen resistencias superiores con una relación agua/cemento determinada.

## **Paso 3: Estimación del agua de mezclado y el contenido de aire.**

La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula, la granulometría de los agregados y de la cantidad de aire incluido; no le afecta significativamente el contenido de cemento. La Tabla 3.2 de este documento, o Tabla N° 4 del código ACI 211.1 (97) provee valores estimados del

agua de mezclado requerida para concretos hechos con varios tamaños máximos de agregados, con y sin aire incluido. Dependiendo de la forma y textura del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar algunas veces por encima o por debajo de los valores tabulados, pero estos son suficientemente aproximados para la primera estimación. La diferencia en la demanda de agua no se refleja necesariamente en la resistencia ya que pueden estar involucrados otros factores de compensación. Por ejemplo, entre un agregado redondeado y otro angular, ambos gruesos, bien graduados y de buena calidad, se espera que puedan producir concretos de aproximadamente la misma resistencia a la compresión para el mismo factor de cemento, a pesar de la diferencia en la relación A/C resultante de los diferentes requerimientos de agua de mezclado. La forma de la partícula no indica por sí misma que el agregado estará por encima o por debajo del promedio en cuanto a su capacidad para obtener resistencia.

En la parte superior de la Tabla 3.2 de este documento o Tabla N° 4 del código ACI 211.1 (97), se indica la cantidad aproximada de aire atrapado que puede esperarse en concretos sin aire incluido y en la parte inferior, el promedio de contenido de aire recomendado para concreto con inclusión de aire. Para el caso de que sea necesario o deseable incluir aire, se señalan tres niveles de contenido de aire para cada tamaño de agregado, los que dependen del propósito de la inclusión de aire y de la severidad de la exposición, si la inclusión está en función de la durabilidad.

- **Exposición ligera.** Esta exposición incluye servicio interior o exterior en climas en los que el concreto no estará expuesto a agentes de congelación o deshielo.
- **Exposición moderada.** Implica servicio en climas donde es probable la congelación, pero en los que el concreto no estará expuesto continuamente a la humedad o al agua corriente durante largos períodos antes de la congelación, ni a agentes descongelantes u otros productos químicos agresivos.
- **Exposición severa.** El concreto expuesto a productos químicos descongelantes u otros agentes agresivos, o cuando pueda resultar altamente

saturado por el contacto continuo con humedad o agua antes de la congelación.

**Tabla 3.2: Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaño nominal máximo de agregados.**

Revenimiento En pulgadas.	Agua, kg/m <sup>3</sup> de concreto, para los tamaños nominales de agregado, pulgadas.							
	3/8*	1/2*	3/4*	1*	1 1/2*	2*i	3i+	6 i+
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
<b>1 a 2</b>	205	200	185	180	160	155	145	125
<b>3 a 4</b>	225	215	200	195	175	170	160	140
<b>6 a 7</b>	240	230	210	205	185	180	170	
	Cantidad aprox. de aire atrapado, concreto sin aire incluido (%)							
	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0,2
<b>Concreto con aire incluido</b>								
<b>1 a 2</b>	180	175	165	160	145	140	135	120
<b>3 a 4</b>	200	190	180	175	160	155	150	135
<b>6a7</b>	215	205	190	185	170	165	160	---
	Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición**							
<b>Exposición ligera</b>	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5***ij	1.0 ***ij
<b>Exposición moderada</b>	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5***ij	3.0***ij
<b>Exposición severa++++</b>	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5***ij	4.0***ij

(\*) Las cantidades de agua de mezclado dadas para concreto con aire incluido son basadas en los requerimientos totales de contenido de aire como son mostrados para "Exposición moderada" en la parte inferior de la tabla. Estas

cantidades de agua de mezclado son para usarlas en el cálculo de los contenidos de cemento en mezclas de prueba de 20° a 25°C (68° a 77°F). Son cantidades máximas de agregados gruesos angulares, razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los límites de las especificaciones aceptadas. Los agregados redondeados generalmente requieren 14 Kilogramos menos de agua para concreto sin aire incluido, mientras que para concreto con aire incluido requiere 11 Kilogramos menos de agua. El uso de aditivos reductores de agua, ASTM C494 puede además reducir el agua de mezclado en el orden del 5% o más. El volumen de los líquidos de los aditivos es incluido como parte del volumen total del agua de mezclado. Los valores del revenimiento de más de 7 pulgadas solamente son obtenidos a través del uso de aditivos reductores de agua, estos son para concretos que contienen agregados con tamaño nominal máximo de 1 pulgada.

(j) Los valores del revenimiento para concreto que contienen agregados mayores a 1½ pulgadas están basados en las pruebas de revenimiento realizadas después de haber removido las partículas superiores a 1½ pulgadas de diámetro.

(+) Estas cantidades de agua de mezclado se usan para el cálculo de los factores de cemento para mezclas de prueba cuando se usan agregados con tamaño nominal de 3 ó 6 pulgadas, son promedios para agregados gruesos razonablemente bien formados y con buena granulometría de grueso a fino.

(\*\*) En varios documentos del ACI aparecen recomendaciones adicionales con respecto al contenido de aire y a las tolerancias necesarias de contenido de aire para control en el campo. Entre estos documentos están: ACI 201, 345, 318, 301 y 302. La norma ASTM C94 para concretos premezclados también proporciona los límites de contenido de aire. Los requerimientos que aparecen en otros documentos no siempre pueden concordar exactamente, por lo que al proporcionar concreto debe prestarse atención a la selección de un contenido de aire que se ajuste a las necesidades de la obra, así como a las especificaciones aplicables.

(\*\*\*) Para concretos conteniendo agregados de gran tamaño que serán tamizados

en húmedo a través de una malla de 1½ pulgadas antes de someterse a la prueba de contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en el material inferior al tamaño mencionado debe ser como el tabulado en la columna de 1½ pulgadas sin embargo, los cálculos iniciales de proporción deben incluir el contenido de aire como un porcentaje del total.

(ii) Cuando se emplea agregado grande en concretos con bajo factor de cemento, la inclusión de aire no debe ir en detrimento de la resistencia. En la mayoría de los casos el requerimiento de agua de mezclado se reduce lo suficiente para mejorar la relación A/C y de esta manera, compensar el efecto reductor de resistencia del concreto con inclusión de aire. Sin embargo, generalmente, para dichos tamaños máximos grandes de agregado los contenidos de aire recomendados en caso de exposición severa deben tomarse en consideración aunque pueda haber poca o ninguna exposición a la humedad o al congelamiento.

(+++++) Estos valores se basan en el criterio de que es necesario un 9% de aire en la fase de mortero del concreto. Si el volumen del mortero va a ser sustancialmente diferente del determinado en esta obra, puede ser conveniente calcular el contenido de aire necesario tomando un 9% del volumen real del mortero.

El empleo de cantidades normales de aire incluido en concretos con resistencia especificada a 350 kg/cm<sup>2</sup> o aproximada, puede no ser factible debido al hecho de que cada porcentaje de aire adicional reduce la resistencia máxima que se puede obtener con determinada combinación de materiales. En estos casos la exposición al agua, sales descongelantes y temperaturas de congelación deben ser cuidadosamente evaluadas. Si un elemento no va a estar continuamente mojado ni expuesto a sales descongelantes, son apropiados los valores de contenido de aire más bajos, como los que se señalan en la Tabla 3.2, para exposición moderada, aunque el concreto esté expuesto a temperaturas de congelación y deshielo. Sin embargo, en condiciones de exposición en las que el elemento puede estar saturado antes de la congelación, no debe sacrificarse el aire incluido en favor de la resistencia.

Cuando se emplean mezclas de prueba con el fin de establecer las relaciones de resistencia o verificar la capacidad para producir resistencia de una mezcla, debe emplearse la combinación menos favorable de agua de mezclado y aire incluido; es decir, el contenido de aire debe ser el máximo permitido y el concreto se debe mezclar para un revenimiento lo más elevado posible. Esto evitará la elaboración de un cálculo demasiado optimista de la resistencia, basado en la suposición de que en el campo prevalecerán las condiciones promedio en lugar de presentarse condiciones extremas.

**Paso 4: Selección de la relación agua-cemento (A/C).**

La relación A/C requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado. Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación A/C, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación A/C para los materiales que de hecho van a emplearse. En ausencia de estos datos, valores aproximados relativamente conservadores para concreto elaborado con cemento portland tipo I pueden tomarse de la Tabla 3.3 de este documento, o Tabla N°5 del código ACI 211.1 (97). Con materiales comunes, las relaciones A/C tabuladas deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de especímenes curados bajo condiciones estándar de laboratorio. La resistencia promedio seleccionada debe por supuesto exceder de la resistencia especificada por un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con bajos valores (ver ACI 214).

**Tabla 3.3: Relación Agua/Cemento (A/C) y la resistencia a la compresión del concreto.**

Resistencia a la compresión requerida	Relación agua / cemento (A / C) por peso	
	Concreto sin aire	Concreto con aire

<b>(f'cr) a los 28 días, Kg / cm<sup>2</sup> *</b>	incluido	incluido
<b>420</b>	0.41	----
<b>350</b>	0.48	0.40
<b>280</b>	0.57	0.48
<b>210</b>	0.68	0.59
<b>140</b>	0.82	0.74

(\*) Los valores son resistencias promedio estimadas para concreto que no contiene más del 2% de aire para concreto sin aire incluido y 6% de contenido total de aire para concreto con aire incluido. Para una relación A/C constante se reduce la resistencia del concreto en la medida que el contenido de aire es incrementado. Los valores de resistencia a 28 días pueden ser conservadores y pueden cambiar cuando varios materiales cementantes son usados.

La resistencia está basada en su determinación a través del ensayo de especímenes estándar de 6 x12 pulgadas curados de acuerdo con ASTM C31.

Estos son cilindros curados con humedad a  $23 \pm 1.7$  °C ( $73.4 \pm 3$  °F) previo a su ensayo. Las relaciones dadas en esta tabla asumen un tamaño nominal máximo del agregado de  $\frac{3}{4}$  de pulgada a 1 pulgada. Para una fuente de agregados dada, la resistencia producirá una relación A/C que se incrementará en la medida que se reduzca el tamaño máximo del agregado.

### **Paso 5: Cálculo del contenido de cemento.**

La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el tercero y cuarto paso de este procedimiento (cálculo del contenido de agua y selección de la relación A/C). El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado dividido entre la relación A/C. A pesar que, la especificación incluye un límite mínimo independiente para la cantidad de cemento, en adición a los requerimientos de

resistencia y durabilidad; la mezcla debe basarse en el criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento. El empleo de aditivos puzolánicos o químicos afectará las propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

### **Paso 6: Estimación del contenido de agregado grueso.**

El agregado de esencialmente el mismo tamaño máximo nominal y granulometría producen concretos de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de concreto, con base en el Peso unitario seco varillado. En la Tabla 3.4 de este documento o Tabla N°7 del código ACI 211.1 (97), aparecen valores apropiados para estos volúmenes de agregado. Puede observarse que, para igual trabajabilidad, el volumen de agregado grueso en volumen unitario de concreto depende únicamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino. Las diferencias en la cantidad de mortero requerido para la trabajabilidad con diferentes agregados, debidas a diferencias en la forma y granulometría de las partículas, quedan compensadas automáticamente por las diferencias en el contenido de vacíos, obtenidas cuando se determina el Peso unitario varillado en seco. En la Tabla 3.4 se muestra el volumen de agregado en metros cúbicos, con base al Peso volumétrico varillado en seco para un metro cúbico de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por el Peso unitario varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso. Para obtener un concreto de buena trabajabilidad, lo que a veces es necesario para colar mediante bombeo o cuando el concreto se va a colocar alrededor de lugares congestionados de acero de refuerzo; es reducir aproximadamente en 10% el contenido estimado de agregado grueso determinado de la Tabla 3.4. Sin embargo, deben tomarse precauciones para garantizar que el revenimiento resultante, la relación A/C y las propiedades de resistencia del concreto concuerdan con las recomendaciones de los pasos 1 y 4 de este procedimiento y cumplan con los requisitos aplicables de las especificaciones de proyecto.

**Tabla 3.4. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.**

Tamaño máximo de agregado, pulg. (mm)	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
<b>3/8 ( 10)</b>	0.50	0.48	0.46	0.44
<b>1/2(12.5)</b>	0.59	0.57	0.55	0.53
<b>3/4(20.0)</b>	0.66	0.64	0.62	0.60
<b>1 (25.0)</b>	0.71	0.69	0.67	0.65
<b>1 ½( 40.0)</b>	0.75	0.73	0.71	0.69
<b>2 (50.0)</b>	0.78	0.76	0.74	0.72
<b>3 (70.0)</b>	0.82	0.80	0.78	0.76
<b>6 (150.0)</b>	0.87	0.85	0.83	0.81

(\*) Los volúmenes están basados en agregados en condición varillado en seco, como se describe en ASTM C29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado en la construcción reforzada. Para concretos menos trabajables, como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, los valores de esta tabla pueden incrementarse en un 10% aproximadamente. Como se ha mencionado arriba, para concretos más trabajables es necesario disminuir aproximadamente estos valores en un 10%.

#### **Paso 7: Estimación del contenido de agregado fino.**

Al término del paso 6 se han estimado todos los componentes del concreto, excepto el agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Puede emplearse cualquiera de los dos procedimientos siguientes: Método de peso del concreto por unidad de volumen ó el Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del concreto.

- Si el peso del concreto por volumen unitario se supone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido del agregado fino es, simplemente, la diferencia entre el peso del concreto fresco y el peso total de los demás componentes. A menudo se conoce con bastante precisión el peso unitario del concreto, por experiencia previa con los materiales. En ausencia de dicha información, puede emplearse la Tabla 3.5 de este documento o Tabla N°8 del código ACI 211.1 (97), para hacer un cálculo tentativo. Aun si el cálculo del peso del concreto por metro cúbico es aproximado, las proporciones de la mezcla serán suficientemente precisas para permitir un ajuste fácil con base en mezclas de prueba. Cuando se desea un cálculo teóricamente exacto del peso del concreto fresco por metro cúbico, puede emplearse la siguiente ecuación:

$$U = 10.0G_a * (100 - A) + C * \left(1 - \frac{G_a}{G_c}\right) - W * (G_a - 1)$$

Dónde:

U= Peso del concreto fresco por metro cúbico, Kg.

$G_a$ =Gravedad Específica Bulk (SSS) de los agregados finos y grueso combinados.

$G_c$ = Gravedad Específica del cemento (generalmente 3.15)

A= Contenido de aire, %

C= Requerimiento de cemento por metro cúbico, Kg.

W= Requerimiento del agua de mezclado por metro cúbico, Kg.

- Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos, implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes (agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su peso dividido entre la densidad de este material (siendo ésta el producto de la gravedad específica del agua por el peso específico del material).

**Tabla 3.5. Primera estimación del peso del concreto fresco.**

Tamaño máximo de agregado, pulg. (mm)	Primera estimación del peso del concreto fresco, kg/m <sup>3</sup> *	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
3/8 ( 10.0)	2285	2190
1/2 ( 12.5)	2315	2235
1/4 (20.0)	2355	2280
1 (25.0)	2375	2315
1 1/2 ( 40.0)	2420	2355
2 (50.0)	2445	2375
3 (70.0)	2465	2400
6 (150.0)	2505	2435

(\*) Valores calculados por medio de la ecuación para peso del concreto fresco por metro cubico de riqueza mediana (330 Kg de cemento por m<sup>3</sup> de concreto) y revenimiento medio con agregado de peso específico de 2.7. Los requerimientos de agua se basan en valores de la Tabla 3.2 de este documento o Tabla N°4 de ACI 211.1 (97), para revenimiento de 3 a 4 pulgadas si se desea, el peso estimado puede afinarse como sigue, si la información necesaria está disponible: por cada 6 Kg de diferencia en los valores del agua de mezclado de la Tabla 3.2, para revenimiento de 3 a 4 pulgadas, corregir el peso por m<sup>3</sup> en 9 kg en dirección contraria; por cada 59 kg de diferencia en contenido de cemento a partir de 300 kg, corregir el peso en 9 kg en la misma dirección; por cada 0.1 que el peso específico del agregado se desvíe de 2.7, debe corregirse el peso del concreto en 59 kg en la misma dirección. Para concreto con aire incluido el contenido de aire usado ha sido el expuesto en la Tabla 3.2. El peso puede ser incrementado en 1% por cada porcentaje de reducción en el contenido de aire a partir de la cantidad indicada.

### **Paso 8: Ajustes por contenido de humedad.**

Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto, deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua que contienen ya sea absorbida o libre en la superficie. Por lo tanto el agua de mezclado será corregida dependiendo de los valores de humedad y absorción que tengan los agregados, así:

- Si  $Ab \% > Hum.\%$ , el agregado absorberá agua del agua de mezclado obtenido de la Tabla 3.2, por lo tanto hay necesidad de agregar una cantidad de agua equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los agregados a fin de evitar que este consumo adicional de agua se refleje en mezclas poco manejables.
- Si  $Ab \% < Hum.\%$ , el agregado aportará agua al agua de mezclado por lo tanto, hay necesidad de disminuir el agua de mezclado en una cantidad equivalente a la diferencia entre la humedad y la absorción a fin de evitar que la mezcla a elaborar sobrepase el revenimiento previsto.

### **3.3 NORMAS DE LA AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM).**

- 3.3.1** Método de ensayo estándar para reducción de muestras de agregado a tamaños de prueba. (ASTM C-702)
- 3.3.2** Método de ensayo estándar para análisis granulometría de agregado grueso y fino. (ASTM C-136).
- 3.3.3** Método de ensayo estándar para gravedad específica y absorción del agregado fino. (ASTM C-128).
- 3.3.4** Método de ensayo estándar para contenido de humedad total del agregado por secado. (ASTM C-566).
- 3.3.5** Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C-127).

- 3.3.6** Método de ensayo estándar para densidad bruta (peso unitario) y vacíos en los agregados (ASTM C-29).
- 3.3.7** Método de ensayo estándar para resistencia al desgaste de agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles (ASTM C-131).
- 3.3.8** Práctica estándar para elaboración y curado en el laboratorio de especímenes de concreto para ensayo. (ASTM C-192).
- 3.3.9** Método de ensayo estándar para esfuerzo a compresión en especímenes cilíndricos de concreto. (ASTM C-39).
- 3.3.10** Método de ensayo estándar para resistencia a la flexión del concreto. (usando viga simple con carga a los tercios del claro) (ASTM C-78).
- 3.3.11** Método de ensayo estándar para cambio longitudinal en especímenes de concreto y mortero de cemento hidráulico endurecido. (ASTM C-157).
- 3.3.12** Método de ensayo estándar para la medición de temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado. (ASTM C-1064).
- 3.3.13** Método de ensayo estándar para contenido de aire en mezclas de concreto fresco por el método de presión (ASTM C-231).
- 3.3.14** Tiempos de fraguado en mezclas de concreto por resistencia a la penetración. (ASTM C-403).
- 3.3.15** Método de ensayo estándar para densidad (peso unitario), volumen y contenido de aire (método gravimétrico) en una mezcla de concreto. (ASTM C-138).
- 3.3.16** Método de ensayo estándar para revenimiento del concreto de cemento hidráulico (ASTM C 143).

#### **3.4 CEMENTO.**

En el presente trabajo de investigación, es utilizado el cemento portland fabricado con base en la norma ASTM C 1157, tipo HE (HE= Alta resistencia a edades tempranas) conocido comercialmente en El Salvador como Holcim CESSAPAV.

Este cemento alcanza resistencias a la compresión mayores a los 4400 psi (libras por pulgada cuadrada) a los 28 días. Su aplicación es para la elaboración de todo tipo de mezclas de concreto estructurales, y funciona de gran manera en la construcción de pavimentos en autopistas, carreteras, calles municipales y residenciales, pisos industriales y parqueos de centros comerciales. Además su uso es recomendado para la estabilización de suelos, elaboración de rellenos fluidos, compactación de suelo cemento y bases granulares.

La gravedad específica del cemento a utilizar es 2.98; dato proporcionado por Holcim El Salvador, quienes son los productores y distribuidores del cemento Holcim CESSA PAV en el país.

### **AGREGADOS**

El agregado empleado en el desarrollo de la investigación (tanto fino como grueso) es proveniente del río Jiboa específicamente del Plantel Comalapa, ubicado en el kilómetro 40 ½, carretera antigua a Zacatecoluca, departamento de La Paz. Según dato proporcionado por el Ing. Saúl Cea, actual encargado de control de calidad de dicha planta, éste agregado es catalogado como proveniente de depósito sedimentario cuyas rocas son una mezcla de basaltos y andesitas predominando el componente basalto, por lo que se denominan basaltos andecíticos.

#### **3.5 AGREGADO FINO.**

Antes de la realización de cada uno de los ensayos que se muestran a continuación se debe realizar una adecuada homogenización del material como lo indica la norma ASTM C-702 Método de ensayo estándar para reducción de muestras de agregado a tamaños de prueba.

### **3.5.1 Granulometría y módulo de finura del agregado fino (ASTM C-136).**

Este ensayo consiste en la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas separándolas por tamices de abertura cuadrada, con denominaciones sucesivas de mayor a menor. La granulometría de un agregado sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños que la forman; en base a este ensayo se calcula el módulo de finura del agregado fino.

A continuación se presenta el equipo utilizado para la realización del ensayo:

- Balanza. Legible a 0.1 gramo y precisión de 0.1 gramo o 0.1% de la carga de prueba, la que sea mayor.
- Juego de tamices N°4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.
- Charolas de lámina galvanizada.
- Brochuelo y cepillo de alambre.
- Agitador mecánico.
- Horno. Capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

#### **Procedimiento.**

- a) Se coloca la muestra de agregado fino en una charola y se deja al aire libre el tiempo necesario hasta que esta pierda su humedad.
- b) Se cuartea la muestra por medio del método C: Apilado en miniatura, de la Norma ASTM C-702 "Práctica estándar para reducción de muestras de agregado a tamaños de prueba", y se pesan 500 gramos, para garantizar que luego de haberla secado al aire libre o en horno por 24 horas el tamaño mínimo de la muestra sea de 300gramos; en este caso la masa de ensayo fue de 367gramos. (Ver fotografía 3.1).
- c) Se coloca la muestra en la malla N°4, cuidando que el fondo se encuentre ensamblado con la malla. Se tapa la malla y se agita manualmente por un tiempo de 3 a 5 min.



Fotografía 3.1 Método de cuarteo para agregado fino por apilado en miniatura.

- d) Se superponen las mallas de mayor a menor diámetro de abertura. Verter la muestra que pasa la malla N°4 en la malla superior y colocar el juego de mallas en el agitador mecánico por un tiempo de 10 a 15 min. (Ver fotografía 3.2).



Fotografía 3.2 Tamizado mecánico de muestra.

- e) Colocar las porciones retenidas en cada malla en charolas y pesar dichas cantidades retenidas. (Ver fotografía 3.3)



Fotografía 3.3 Procedimiento de pesado de porciones retenidas en mallas.

**Datos obtenidos.**

**Tabla 3.6 Masas parciales retenidas de análisis granulométrico de agregado fino. Masa inicial: 367gr**

Malla	Masa Retenida parcial (g)
3/8 pulg.	
Nº 4	0.00
Nº 8	27.50
Nº 16	57.80
Nº 30	91.60
Nº 50	110.40
Nº 100	60.00
Nº 200	
Fondo	18.80
sumas	366.10

**Cálculos:**

$$\text{Error} = \text{Peso inicial} - \sum \text{Pesos retenidos} = 367 - 366.1 = 0.9$$

$$\% \text{ De error} = \frac{w_o - w_f}{w_o} * 100 = \frac{367.0 - 366.10}{367.0} * 100 = 0.24\%$$

De acuerdo a la norma ASTM C-136 el porcentaje de error debe ser  $\leq 0.30\%$ , en este caso el error es de  $0.24\%$ ; por lo tanto el ensayo es aceptable y se pueden realizar correcciones, sumando el error en la malla que ha retenido más peso.

$$\text{Modulo de finura} = \frac{\text{suma retenido acumulado de 4, 8, 16, 30, 50 y 100}}{100}$$

$$\text{Modulo de finura} = \frac{0 + 7.49 + 23.24 + 48.20 + 78.53 + 94.88}{100} = 2.52$$

$$\% \text{ Retenido parcial} = \frac{\text{peso retenido en cada malla}}{\text{peso inicial}(w_o)} * 100$$

% Retenido acumulado

= % ret. acum. de malla anterior + % ret. parcial de dicha malla

% Acumulado que pasa malla N<sup>o</sup> "x" = (100%) – % ret. acumulado de malla N<sup>o</sup>"x"

**Diámetros característicos:**

$$D_{10} = 0.19 \text{ mm}$$

$$D_{30} = 0.37 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 0.77 \text{ mm}$$

**Coefficiente de uniformidad:**

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.77}{0.19} = 4.05$$

**Coefficiente de curvatura:**

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} = \frac{(0.38)^2}{(0.19 \times 0.77)} = 0.99$$

**Resultados obtenidos:**

**Tabla 3.7 Resultados de análisis granulométrico de agregado fino.**

Malla	M. Retenida parcial corregida (gramos)	Masa retenida. (%)	Retenido acumulado. (%)	Que pasa la malla. (%)
4	0.00	0.00	0.00	100.00
8	27.50	7.49	7.49	92.51
16	57.80	15.75	23.24	76.76
30	91.60	24.96	48.20	51.80
50	111.3	30.33	78.53	21.47
100	60.00	16.35	94.88	5.12
200				

Fondo	18.80	5.12	100.00	0.00
sumas	367.0	100.00		

### Curva granulométrica agregado fino.

La curva granulométrica para el agregado fino utilizado en la investigación se presenta en el gráfico 3.1.

**Gráfico 3.1 Curva granulométrica de agregado fino.**



### 3.5.2 Gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTM C-128).

La gravedad específica es la relación entre el peso al aire de una unidad de volumen de agregado, al peso de un volumen igual de agua destilada en un

mismo estado de temperatura. No es una medida de la calidad del agregado, solamente indica cuanto más pesado es con respecto al agua.

La absorción se define como el incremento del peso del agregado debido al agua de los poros, no incluyendo el agua adherida en la superficie externa de las partículas expresada como un porcentaje de peso seco. La absorción fija la cantidad de agua en la dosificación de mezclas de concreto, ya que además del agua necesaria para la hidratación del cemento hay que agregar lo que absorben los agregados.

El equipo necesario para la realización del ensayo se presenta a continuación:

- Balanza con capacidad hasta de 1 kilogramo o más, sensibilidad a 0.1 gramos o menos.
- Picnómetro.
- Molde y pisón. El molde metálico será de forma de un cono truncado con diámetro de  $40 \pm 3$  mm en el borde superior,  $90 \pm 3$  mm de diámetro interno en la base y  $75 \pm 3$  mm de altura. El pisón metálico tendrá una masa de  $340 \pm 15$  g y una cara golpeadora circular y plana de  $25 \pm 3$  mm de diámetro.
- Charolas.
- Horno. Capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230^{\circ}\text{F} \pm 9^{\circ}\text{F}$ ).

### **Procedimiento:**

- a) Aplicando el método C: Apilado en miniatura, de la norma ASTM C-702 “Practica estándar para reducción de muestras de agregado a tamaños de prueba”, se obtuvo una muestra de ensayo de aproximadamente 1 kg. (Ver fotografía 3.4).
- b) Se secó el espécimen de ensayo en horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$  por 24 horas; se dejó un tiempo para que se enfriase y luego se cubrió con agua

dejándolo reposar por 24 horas para que se saturara por completo. (ver fotografía 3.5)



Fotografía 3.4 Muestra de ensayo, para pruebas de gravedad específica y absorción de agregados finos.



Fotografía 3.5 Saturación con agua de espécimen de ensayo.

- c) Se decantó el exceso de agua con cuidado para evitar la pérdida de finos.  
(Ver fotografía 3.6)



Fotografía 3.6 Eliminación de excedente de agua.

- d) Se esparció la muestra en una superficie plana no absorbente expuesta a una ligera corriente de aire, removiendo constantemente para alcanzar la condición de superficie superficialmente seca (SSS) (Ver fotografía 3.7).



Fotografía 3.7 Prueba manual para alcanzar la condición superficie superficialmente seca (SSS) de la muestra.

- e) Para saber si la muestra ha alcanzado la condición SSS, se sujeta el molde (cono truncado) firmemente sobre una superficie lisa y no absorbente, con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con una porción de la muestra, hasta que se desborde; ligeramente apisonar el agregado fino dentro del molde con 25 golpes ligeros del pisón, iniciando caída 5 mm arriba de la superficie de agregado fino. Se remueve el agregado suelto en la base del recipiente y con cuidado se levanta el recipiente, un ligero desplome de la muestra indica que se ha alcanzado la condición SSS.
- f) Se llenó el picnómetro con agua a su capacidad de calibración, y se tomó la lectura de la masa (frasco y contenido de agua). (Ver Fotografía 3.8).



Fotografía 3.8 Procedimiento de pesado de picnómetro más contenido de agua.

g) Se llenó parcialmente el picnómetro con agua y se introdujo en el picnómetro 500 gramos de agregado fino en condición SSS; se llenó con agua hasta aproximadamente el 90% de la capacidad. Agitar el picnómetro hasta eliminar las burbujas de aire y luego llevar el nivel de agua en el picnómetro a su capacidad de calibración. Se tomó la lectura de la masa (frasco, agua y agregado). (Ver fotografía 3.9)



Fotografía 3.9 Peso de masa de picnómetro más contenido de agua y agregado.

**Datos obtenidos:**

**Tabla 3.8 Datos obtenidos de ensayo de Gravedad específica y Absorción.**

	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>
S Masa de la muestra SSS (g)	500	500
B Masa picnómetro + agua (g)	1443.3	1443.3
C Masa picnómetro + agua + muestra (g)	1746.5	1747.0
Masa seca de la muestra + tara (g)	641.4	653.0
Masa tara (g)	160.7	172.3
A Masa seca de la muestra(g)	480.7	480.7
Agua (g)	19.3	19.3

**Cálculos:**

$$G. E. seca = \frac{A}{B + S - C}$$

$$G.E. sss = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{S - A}{A} * 100\%$$

### Muestra N°1

$$G.E. seca = \frac{480.7}{1443.3 + 500 - 1746.5} = 2.44$$

$$G.E. sss = \frac{500}{1443.3 + 500 - 1746.5} = 2.54$$

$$\text{Absorción} = \frac{500 - 480.7}{480.7} * 100 = 4.02\%$$

Para la muestra N° 2, los cálculos se realizan de igual manera. Los resultados se presentan en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9 Resultados de ensayo de Gravedad específica y absorción.**

	Muestra 1	Muestra 2	promedio
Gravedad específica seca	2.44	2.45	2.45
Gravedad específica SSS	2.54	2.55	2.55
Absorción (%)	4.02	4.02	4.02

### 3.5.3 Resumen y análisis de resultados.

En la Tabla 3.10 se presenta un cuadro resumen de las características del agregado fino.

**Tabla 3.10 Características del agregado fino.**

Agregado fino.	
Módulo de finura	2.52
Gravedad específica seca	2.45
Gravedad específica SSS	2.55

Absorción (%)	4.02
Coeficiente de uniformidad (Cu)	4.05
Coeficiente de Curvatura (Cc)	0.99

### **Análisis de resultados de ensayos realizados al agregado fino.**

- A través del análisis granulométrico se determinó el módulo de finura de la arena, el cual es de 2.52. De acuerdo al módulo de finura la arena se puede clasificar como media fina y aceptable para la fabricación de concreto, pues la Norma ASTM C33 especifica que para ello el módulo de finura debe estar en un rango de 2.3 a 3.2.
- A través del análisis granulométrico se determinó el cumplimiento de la distribución de tamaños de partículas, pues cumple con los límites granulométricos establecidos por la Norma ASTM C 33 “Especificaciones estándar para agregados de concreto”.
- El resultado del análisis granulométrico puede ser usado para criterios de aceptación del material, pues al comparar la masa final de la muestra con la masa inicial solamente difieren en un 0.25% y la Norma ASTM C 33 establece que no debe diferir como máximo en un 0.3%.

Es importante mencionar que existen otros criterios de aceptación del agregado fino que no están contemplados en la Norma ASTM C33, pero que sin embargo dan una idea de la calidad de la arena en estudio, estos son: el Coeficiente de uniformidad Cu y el Coeficiente de curvatura Cc. Desde el punto de vista de la variación de los tamaños de los granos el agregado fino se puede considerar inadecuado, pues el Cu es de 4.05 y para que un agregado fino se considere adecuado el Cu debe ser mayor a 6.0. También se puede considerar inadecuado desde el punto de vista curvatura de la gráfica, pues el Cc es de 0.99 y para que

un agregado fino se considere adecuado el  $C_c$  debe ser mayor a 1.0 y menor a 3.0. Se debe recalcar que los criterios que definen si un agregado es aceptable o no, son los establecidos en la Norma ASTM C33, por lo tanto este agregado es de granulometría aceptable.

### 3.6 AGREGADO GRUESO.

El agregado grueso es aquel que se retiene en la malla N°4 y ha pasado la maya de 6 pulgadas. En los agregados gruesos toma mayor importancia la grava, la cual se divide así:

- Grava N°2, cuyas dimensiones están entre 19.1 y 38.1 mm (pasa malla de 1½ pulgadas y se retiene en la de ¾ de pulgada).
- Grava 1<sup>6</sup>, cuyas dimensiones están entre 5 y 19.1 mm (retenido en malla N°4 y debe pasar la de ¾ de pulgada).
- Grava N°0 o chispa, se utiliza para hacer la mezcla conocida como grout, la cual se usa para llenar los huecos en bloques de concreto.

Antes de la realización de cada uno de los ensayos que se muestran a continuación se debe realizar una adecuada homogenización del material como lo indica la norma ASTM C-702 Método de ensayo estándar para reducción de muestras de agregado a tamaños de prueba. (Ver fotografía 3.10)



Fotografía 3.10 Homogenización de agregado grueso.

---

<sup>6</sup>Agregado grueso utilizado en el desarrollo de la investigación.

### 3.6.1 Granulometría de agregado grueso (ASTM C-136).

La granulometría de los agregados es una propiedad de los agregados que sirve como uno de los indicadores de la calidad de los mismos, ya que si el agregado es bien graduado, el concreto será de buena calidad y de alta densidad.

El análisis granulométrico es todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se pueden conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta al peso total.

El equipo necesario para la realización del ensayo se presenta a continuación:

- Báscula. Legible y precisa en 0.5 gramos o 0.1% de la carga de prueba, la que sea mayor.
- Juego de mallas 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8, N°16 y fondo.
- Charolas de lámina galvanizada.
- Cuarteador mecánico; debe tener un número igual de conductos, pero no menor de ocho; el ancho mínimo del conducto individual debe ser de aproximadamente 50% mayor que el tamaño máximo de las partículas en la muestra.

#### **Procedimiento:**

- a) Se realiza el cuarteo manual descrito en la norma ASTM C-702 para obtener una muestra homogénea, seleccionando dos partes opuestas de las cuatro en que se ha separado el material. (Ver fotografía 3.11)



Fotografía 3.11 Cuarteo manual de agregado grueso.

- b) Se realiza un cuarteo mecánico para reducir la muestra a la cantidad requerida para el ensayo. (Ver fotografía 3.12)



Fotografía 3.12 Cuarteo mecánico de agregado grueso.

- c) Se calibra la báscula y posteriormente se pesa el tamaño de la muestra; para el caso para un agregado de tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, la norma ASTM C-136 especifica que el tamaño mínimo de la muestra es de 5 kg; para éste caso la masa de ensayo fue de 6971 gramos. (Ver fotografía 3.13).



Fotografía 3.13 Determinación de masa del tamaño de la muestra.

- d) Se secó la muestra a una temperatura de 110°C por 22 horas.
- e) Se ordenan las mallas de mayor a menor abertura (1",  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", N°4, N° 8, N°16, Fondo), para tamizar el material. (Ver fotografía 3.14).
- f) Se tamiza la muestra de ensayo. Para regular la cantidad de material en cada malla se pueden utilizar otras mallas adicionales o realizar el tamizado separadamente. (Ver fotografía 3.15).
- g) Una vez separado el material, pesar cada porción en charolas previamente pesadas. Los pesos deben registrarse en hoja de resultados.



Fotografía 3.14 Juego de mallas para tamizar el agregado grueso.



Fotografía 3.15 Tamizado manual de agregado grueso.

**Datos obtenidos.**

**Tabla 3.11 Datos obtenidos de análisis granulométrico de agregado grueso.  
Masa inicial: 6971 gr.**

<b>Malla</b>	<b>Masa retenida parcial. (gramos)</b>
¾"	589.0
½"	3004.0
3/8"	2504.0
Nº4	763.0
Nº8	70.4
Nº16	19.0
fondo	13.7
Sumas	6963.1

### Cálculos:

$$\text{Error} = \text{Peso Inicial} - \sum \text{Pesos Retenidos} = 6971 - 6963.1 = 7.9$$

$$\% \text{ de error} = \frac{w_o - w_f}{w_o} * 100 = \frac{6971 - 6963.1}{6971} * 100 = 0.11\%$$

El porcentaje de error según la norma ASTM C-136 debe ser  $\leq 0.3\%$ , en este caso el error es de  $0.11\%$ ; por lo tanto el ensayo se acepta y se procede a realizar las correcciones sumando el error en la malla que más peso ha retenido.

$$\% \text{ retenido parcial} = \frac{\text{peso retenido en cada malla}}{\text{peso inicial}(w_o)} * 100$$

% retenido acumulado

$$= \% \text{ ret. acum. de malla anterior} + \% \text{ ret. parcial de dicha malla}$$

$$\% \text{ acumulado que pasa malla "x"} = (100\%) - \% \text{ ret. acumulado de malla "x"}$$

### **Diámetros característicos:**

$$D_{10} = 8.0 \text{ mm}$$

$$D_{30} = 11.08 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 14.4 \text{ mm}$$

### **Coefficiente de uniformidad:**

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{14.4}{8.47} = 1.80$$

### **Coefficiente de curvatura:**

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} = \frac{(11.08)^2}{(8.0 \times 14.4)} = 1.07$$

### Resultados obtenidos.

**Tabla 3.12 Resultado obtenido de análisis granulométrico de agregado grueso.**

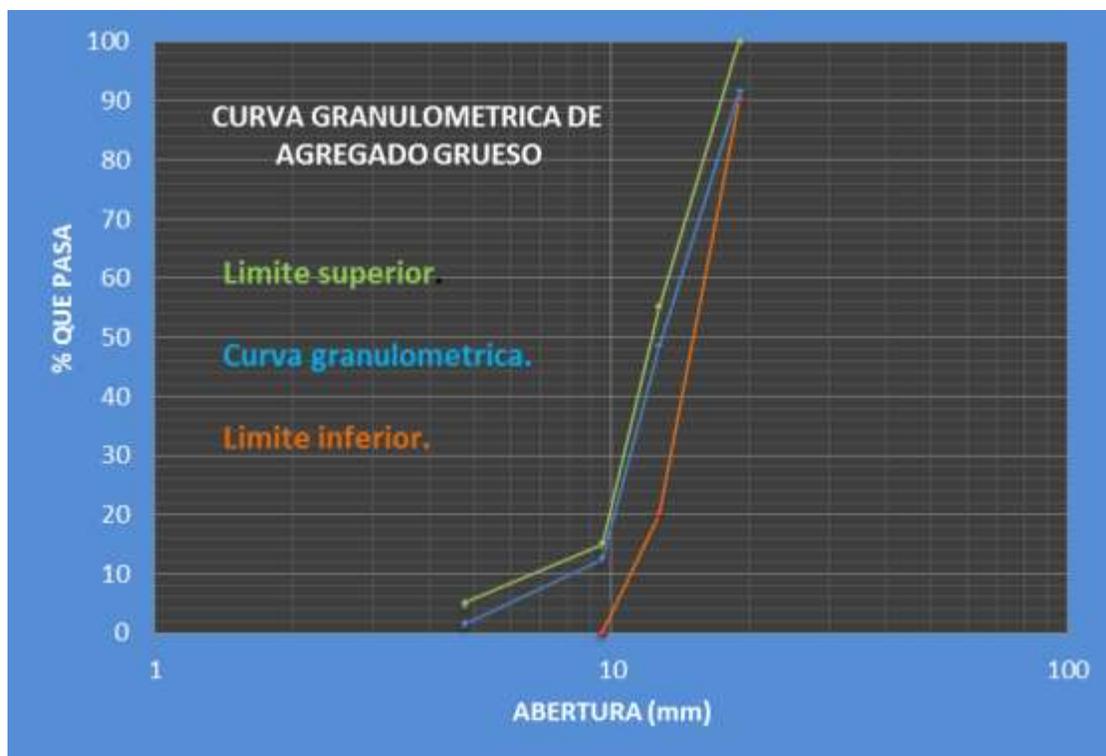
Malla	Masa Retenida parcial (g)	Masa retenida. (%)	Retenido acumulado. (%)	Que pasa la malla. (%)
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	589.00	8.45	8.45	91.55

½"	3011.90	43.21	51.66	48.34
3/8"	2504.00	35.92	87.58	12.42
#4	763.00	10.94	98.52	1.48
#8	70.40	1.01	99.53	0.47
#16	19.00	0.27	99.80	0.20
fondo	13.70	0.20	100.00	0.00
sumas	6971.00	100.00		

### Curva granulométrica del agregado grueso.

La curva granulométrica para el agregado grueso utilizado en la investigación se presenta en el gráfico 3.2.

**Gráfico 3.2 Curva granulométrica de agregado grueso.**



### **3.6.2 Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C-127).**

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (no incluyendo el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. Tanto la densidad como la densidad relativa, dependiendo del procedimiento usado pueden ser expresadas como secado al horno (SH), saturado superficialmente seco (SSS) y como densidad aparente o densidad relativa aparente.

El equipo necesario para la realización del ensayo se presenta a continuación:

- Balanza. Legible y con precisión de 0.05% de la masa de la muestra o 0.5 gramos, el que sea mayor.
- Contenedor de muestra. Cesta de alambre de 3.35 mm (N°6) o malla fina, o una canastilla de ancho y altura iguales con una capacidad de 4 a 7 litros.
- Tanque de agua.
- Mallas (tamiz N°4).
- Horno. Capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Otros (cucharon, franela, pala, probeta graduada)

#### **Procedimiento:**

- a) Se selecciona la muestra con cuidado para evitar la presencia de otros elementos, se tamiza por la malla N°4 y se lava para retirar otras partículas como el polvo. La masa mínima de la muestra de ensayo para un agregado con tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$ " es de 3 kg; para este caso la masa de ensayo fue de 3358 gramos para la muestra N°1 y 3583 gramos para la muestra N°2. (Ver fotografía 3.16)



Fotografía 3.16 Lavado de muestra para ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso.

- b) Se seca la muestra de ensayo en horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, se enfría al aire y posteriormente se sumerge en agua por un periodo de 24 horas. (Ver fotografía 3.17)



Fotografía 3.17 Saturación de muestra de agregado grueso.

- c) Remover la muestra de ensayo del agua y enrollarla en una franela absorbente hasta que toda la película visible de agua sea removida y así obtener la condición de SSS.
- d) Se determina la masa de la muestra en condición SSS. (Ver fotografía 3.18)



Fotografía 3.18 Peso de muestra de agregado grueso en condición SSS.

- e) Después de determinar la masa de la muestra saturada superficialmente seca, colocarla en el contenedor, teniendo cuidado de eliminar todo el aire atrapado y posteriormente determinar su masa aparente en agua. (Ver fotografía 3.19 y 3.20)
- f) Se secó la muestra de ensayo en un horno a una temperatura de 110°C por 24 horas, se enfrió al aire a temperatura ambiente y se determinó su masa.



Fotografía 3.19 y 3.20 Muestra de agregado grueso en contenedor y determinación de masa aparente en agua.

**Datos obtenidos:**

**Tabla 3.13 Datos obtenidos de Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de agregado grueso.**

Datos obtenidos	Muestra 1	Muestra 2
Masa de tara, sss (g)	15.0	15.0
Masa saturada (sss)+ tara. (g)	3373	3583
Masa saturada, Wsss (g)	3358	3568
Masa tara sumergida (g)	848	848
Masa sumergida, Wsum + tara sum (g)	2942	3076
Masa sumergida neta, Wsum (g)	2094	2228
Masa tara/ seca (g)	226.4	226.2
Masa seca, Wseca + tara (g)	3522	3729
Masa seca, Wseca. (g)	3295.6	3506.4
Agua (g)	62.4	61.6

### **Cálculos:**

Los cálculos realizados a continuación son para la muestra N°1 y se realizan de la misma forma para la muestra N°2. Los resultados se presentan en la tabla 3.14.

#### **Gravedad específica seca.**

$$G. E. \text{ seca} = \frac{W_{\text{seca}}}{W_{\text{sss}} - W_{\text{sum}}} * 100$$

$$G. E. \text{ seca} = \frac{3295.6}{3358 - 2094} = 2.61$$

#### **Gravedad específica SSS.**

$$G. E. \text{ sss} = \frac{W_{\text{sss}}}{W_{\text{sss}} - W_{\text{sum}}} * 100$$

$$G. E. \text{ sss} = \frac{3358}{3358 - 2094} = 2.66$$

#### **Porcentaje de absorción.**

$$\text{Absorción} = \frac{W_{\text{sss}} - W_{\text{seca}}}{W_{\text{seca}}} * 100\%$$

$$\text{Absorción} = \frac{3358 - 3295.6}{3295.6} * 100\% = 1.89\%$$

**Resultados promedios.** Los resultados se muestran en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14 Resultados obtenidos de Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de agregado grueso.**

	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Promedio</b>
G.E. seca	2.61	2.62	2.62
G.E. sss	2.66	2.66	2.66
Absorción (%)	1.89	1.76	1.83

### 3.6.3 Densidad Bruta (Peso unitario) (ASTM C-29)

El peso unitario de un agregado es el peso necesario para llenar un recipiente de una unidad de volumen determinado. Se usa el término “Peso volumétrico unitario” porque se trata del volumen ocupado por el agregado y sus huecos entre partícula y partícula. El peso volumétrico unitario puede ser suelto y varillado. Suelto se usa para la conversión de peso a volumen, con el propósito de conocer el consumo de agregado por metro cubico de concreto. Varillado, se usa para la conversión de peso a volumen con el propósito de conocer el consumo de materiales apilados y que estarán sujetos al acomodamiento o asentamiento provocados por el transito sobre ellos.

El equipo necesario para la realización del ensayo se presenta a continuación:

- Balanza. Con una precisión de 0.1% de la carga de ensayo, con una graduación de al menos 0.05 kilogramos.
- Varilla compactadora. De acero redonda de 5/8 de pulgada de diámetro y de aproximadamente 24 pulgadas de longitud, con ambos o un extremo redondeados a una punta hemisférica
- Recipiente volumétrico. Cilíndrico, metálico, impermeable, altura igual al diámetro pero en ningún caso la altura será menor del 80% ni mayor del 150% del diámetro.
- Pala o cucharón.
- Regla enrasadora.

#### **Procedimiento:**

- a) Se obtiene la muestra de ensayo aplicando el método B: cuarteo manual de la norma ASTM C-702 “Practica estándar para reducción de muestras de agregado a tamaños de prueba”. El tamaño de la muestra debe ser aproximadamente de 125 a 200% de la cantidad requerida para llenar el recipiente volumétrico. (Ver fotografía 3.21)

- b) Se secó la muestra de ensayo en horno a una temperatura de 110°C por 23 horas.
- c) En caso de no poseer el volumen del recipiente, se debe realizar el procedimiento de calibración del mismo descrito en la Norma ASTM C29. El volumen del recipiente es de  $9.4386 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ .



Fotografía 3.21 Cantidad de agregado grueso para ensayo de Densidad Bruta.

- d) Selección del procedimiento: el procedimiento de varillado se realiza para agregados que tienen un tamaño máximo nominal de  $1 \frac{1}{2}$ " (37.5 mm) o menos.
- e) Procedimiento por varillado:
  - Se llena el recipiente hasta un tercio de su altura y se nivela con los dedos. Se varilla la capa de agregado con 25 golpes de la varilla, igualmente distribuidas sobre la superficie. (Ver fotografía 3.22)



Fotografía 3.22 Varillado en ensayo de Densidad Bruta.

- Se llena el recipiente a dos tercios de su altura, se vuelve a nivelar con los dedos y a varillar como se hizo anteriormente.

- Se llena el recipiente hasta rebalsarlo y se varilla de nuevo, en la forma previamente mencionada.
  - Se nivela la superficie de agregado con los dedos o con una regla enrasadora en tal forma que ninguna pieza del agregado grueso sobresalga, balancear los huecos en la superficie por debajo del borde del recipiente.
- f) Procedimiento por paleo.
- Llenar el recipiente hasta rebalsarlo por medio de una pala o cuchara, descargando los agregados desde una altura que no exceda 2".
  - Nivelar superficie del agregado con un enrasador, de tal manera que ninguna pieza del agregado grueso sobresalga, balancear los huecos en la superficie por debajo del borde del recipiente.
- g) Determinar la masa del recipiente más su contenido y la masa del recipiente vacío. (Ver fotografía 3.23)



Fotografía 3.23 Determinación de masa en ensayo de densidad bruta.

**Datos obtenidos:**

**Tabla 3.15 Datos obtenidos de Ensayo de Densidad Bruta (Peso Unitario) y Vacíos en los Agregados.**

	<b>suelto</b>	<b>varillado</b>
A Masa de recipiente vacío (kg)	5.423	5.423
B Volumen de recipiente (m <sup>3</sup> )	9.4386*10 <sup>-3</sup>	9.4386*10 <sup>-3</sup>
Masa de recipiente + agregado 1 (kg)	18.847	20.206

Masa de recipiente + agregado 2 (kg)	18.944	20.136
Masa de recipiente + agregado 3 (kg)	18.964	20.122
Masa de recipiente + agregado (kg) promedio	18.918	20.150
CMasa agregado (kg) promedio	13.495	14.730

**Cálculos:**

$$\text{Peso Unitario} = \frac{C}{B}$$

$$\text{Peso Unitario Suelto} = \frac{13.495}{9.4386 * 10^{-3}} = 1429.77 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso Unitario Varillado} = \frac{14.730}{9.4386 * 10^{-3}} = 1560.61 \text{ kg/m}^3$$

**3.6.4 Resistencia al desgaste de agregado grueso (ASTM C-131).**

La resistencia al desgaste de un agregado grueso se usa frecuentemente como identificador de la calidad del agregado. Esta característica es esencial cuando el agregado se va a usar en concreto sujeto al desgaste como pavimentos y pisos industriales para servicio pesado.

El método de prueba más comúnmente usado para la resistencia al desgaste es el método del tambor giratorio de los ángeles.

El equipo necesario para la realización del ensayo se presenta a continuación:

- Máquina de Los Ángeles.
- Mallas 1½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8, N°16.
- Balanza. Con precisión dentro de 0.1% de la carga.
- Esferas de acero de carga. Cada una deberá tener una masa de entre 390 y 445 gramos. El promedio del diámetro de las esferas deberá ser aproximadamente 46.8 mm.

**Procedimiento:**

- a) Se obtiene la muestra de ensayo y se reduce al tamaño adecuado. Según se muestra en la Tabla 3.16.
- b) Se lavó la muestra y se secó al horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas.

**Tabla 3.16. Graduación de la muestra de ensayo.**

Tamaño malla(pulgada)		Masa de la carga, gramos			
		Grado.			
Pasa.	Retenido	A	B	C	D
1 ½	1	1250±25			
1	¾	1250±25			
¾	½	1250±10	2500±10		
½	⅜	1250±10	2500±10		
⅜	¼			2500 ± 10	
¼	N° 4			2500 ± 10	
N° 4	N° 8				5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: Norma ASTM C-131

- c) Se coloca la muestra de ensayo y la carga abrasiva (esferas de carga) en la máquina de ensayo Los Ángeles y se rota la máquina a una velocidad de 30 a 33 RPM para 500 revoluciones. (Ver fotografía 3.24).
- d) Se descarga el material de la máquina para hacer una separación. (Ver fotografía 3.25).
- e) Se hace una separación preliminar de la muestra en una malla más gruesa que 1.7mm (N° 12) (Ver fotografía 3.26).



Fotografía 3.24 Muestra de ensayo mas carga abrasiva en maquina de los ángeles.



Fotografía 3.25 Muestra ensayada en maquina de los ángeles.



Fotografía 3.26 Tamizado de muestra ensayada en maquina de los ángeles.

- f) Se tamiza la muestra en la malla N°12, se lava el material más grueso que la malla N°12 y se secó al horno a 110°C durante 24 horas y luego se determinó su masa.

**Cálculos:**

Masa inicial: 5005.7 gramos

Masa final: 4109.0 gramos

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{5005.7 - 4109.0}{5005.7} * 100 = 17.91\%$$

### 3.6.5 Resumen y análisis de resultados.

En la Tabla 3.17 se presenta un cuadro resumen de las características del agregado grueso.

**Tabla 3.17 Características de agregado grueso (grava).**

Gravedad Especifica seca	<b>2.62</b>
Gravedad Especifica sss o bulk	2.66
Absorción (%)	1.83
Peso Unitario Suelto	1429.77 kg/m <sup>3</sup>
Peso Unitario Varillado	1560.61 kg/m <sup>3</sup>
% de desgaste	17.91%

Nota: la gravedad especifica sss o bulk es la que se usará en el diseño de mezcla.

#### **Análisis de resultados de ensayos realizados al agregado Grueso.**

- En el Capítulo II sección 2.3.4 Propiedades de los agregados del concreto, se establece que si el agregado va a ser usado en losas de concreto o en pavimentos rígidos el desgaste debe ser menor del 35%. Por lo tanto el agregado grueso puede utilizarse en la construcción de pavimentos y pisos industriales, lo que indica que es válido en la ejecución de la investigación.
- La curva granulométrica de agregado grueso cumple con la distribución de tamaños de partículas, pues cumple con los límites granulométricos establecidos por la norma ASTM C-33 “Especificaciones estándar para agregados de concreto”.

- En el caso de la absorción se puede concluir que al realizar la mezcla este fijará la cantidad de agua en la dosificación de la misma (ya que además del agua necesaria para la hidratación del cemento es muy importante tener en cuenta que hay que agregarle la cantidad de agua que van a absorber los agregados).

Es importante mencionar que existen otros criterios de aceptación del agregado grueso que no están contemplados en la Norma ASTM C33, pero que sin embargo dan una idea de la calidad del agregado grueso en estudio, estos son: el Coeficiente de uniformidad  $C_u$  y el Coeficiente de curvatura  $C_c$ . Desde el punto de vista de la variación de los tamaños de los granos el agregado fino se puede considerar inadecuado, pues el  $C_u$  es de 1.08 y para que un agregado grueso se considere bien graduado el  $C_u$  debe ser mayor a 4.0. Pero se puede considerar adecuado desde el punto de vista curvatura de la gráfica, ya que el  $C_c$  es 1.07 y para que un agregado grueso se considere adecuado el  $C_c$  debe ser mayor a 1.0 y menor a 3.0. Se debe recalcar que los criterios que definen si un agregado grueso es aceptable o no, son los establecidos en la Norma ASTM C33, por lo tanto este agregado grueso es de granulometría aceptable.

### **3.7 Desarrollo de diseño de mezcla.**

Las mezclas del concreto hidráulico para pavimentos rígidos y pisos industriales deben estar previstas para asegurar la resistencia deseada a la flexión. La flexión en los pavimentos de concreto hidráulico, bajo las cargas aplicadas por los neumáticos, producen esfuerzos de compresión y tensión. Los esfuerzos de compresión son pequeños en relación a la resistencia a tensión. Por lo tanto el concreto hidráulico que se utiliza en los pavimentos se especifica por su resistencia a la flexión, medida por el Módulo de ruptura a los 28 días (MR) expresada en  $\text{kg/cm}^2$  y generalmente varía entre 36 y 45  $\text{kg/cm}^2$ .

Existen muchas correlaciones entre el Módulo de ruptura (MR) y la resistencia a la compresión del concreto hidráulico a los 28 días ( $f'_c$ ); entre las que se pueden numerar:

1.  $0.10 f'_c \leq MR \leq 0.17 f'_c$
2.  $MR = K \sqrt{f'_c}$ , donde K varía entre 2.3 a 2.4

**3.7.1 Cuadro resumen de datos a utilizar en el diseño de mezcla, obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados.**

**Tabla 3.18 Datos de materiales para diseño de mezcla.**

<b>Arena</b>	
Gravedad Especifica SSS	2.55
Módulo de finura	2.52
Absorción (%)	4.02
<b>Grava</b>	
Gravedad Especifica SSS	2.66
Peso volumétrico varillado en seco	1560.61 kg/m <sup>3</sup>
Absorción	1.83
<b>Cemento</b>	
Gravedad Especifica*	2.98

\*La gravedad específica del cemento no fue determinada, pues es un dato proporcionado por Holcim El Salvador, productores y distribuidores de cemento ASTM C-1157 HE en el país.

**3.7.2 Aplicación del método ACI 211.1 en el diseño de mezcla de concreto.**

**a) Diseño de mezcla  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ .**

El diseño será realizado para un metro cubico de concreto ( $1 \text{ m}^3=1000 \text{ lts}$ ), debido a que esta cantidad facilita la determinación del volumen del agregado fino en el concreto.

$$MR = K \sqrt{f'_c}$$

$$K=2.35$$

$$36 = 2.35 \sqrt{f'_c}$$

$$f'_c = 234.68 \frac{kg}{cm^2} \approx \frac{235kg}{cm^2}$$

➤ **Selección de revenimiento:**

El revenimiento recomendado en la tabla 3.1 de este documento para pavimentos y losas es de 2.5 cm como mínimo y 7.5 cm como máximo.

Se utilizara un revenimiento de aproximadamente 3 pulgadas.

➤ **Tamaño máximo de agregado**

El tamaño máximo de agregado que se utilizara será de ¾ pulgada.

➤ **Estimación del agua de mezclado y el contenido de aire.**

A partir de la Tabla 3.2 de este documento para un revenimiento de 3 pulgadas y un concreto sin aire incluido, el contenido de agua sugerido es de: 200 kg/m<sup>3</sup>; para lograr un revenimiento ligeramente menor a 3 pulgadas, se tomaran 190 kg/m<sup>3</sup> de agua. Se considerará un contenido de aire atrapado de 2%.

➤ **Selección de relación A/C**

A partir de la tabla 3.3 de este documento, será necesario interpolar valores para encontrar la relación A/C.

Cuando  $f'_c$  (resistencia a la compresión a 28 días) está en un rango de 210 a 350 kg/cm<sup>2</sup>, el valor de  $f'_{cr}$  (resistencia promedio a la compresión requerida a 28 días, ésta es la que se utiliza en el diseño de mezcla) se calcula de la siguiente manera:

$$f'_{cr} = f'_c + 85$$

$$f'_{cr} = 235 + 85 = 320 \frac{kg}{cm^2}$$

280 ——— 0.57

320 ——— X

350 ——— 0.48

$$(350 - 280)/(320 - 280) = (0.48 - 0.57)/(x - 0.57)$$

$$X = 0.5186$$

$$\mathbf{A/C = 0.52}$$

➤ **Calculo del contenido de cemento.**

$$A/C = 0.52$$

$$\frac{190 \text{ kg/m}^3}{C} = 0.52$$

$$\text{Cemento} = 365.38 \text{ kg/m}^3$$

➤ **Estimación del contenido de agregado grueso.**

$$PVV = 1560.61 \text{ kg/m}^3$$

A partir de la Tabla 3.5 de este documento, el contenido de grava está en función del módulo de finura del agregado fino (2.52) y del tamaño máximo nominal del agregado grueso (¾ de pulgada); por lo que será necesario interpolar.

2.40 ——— 0.66

2.52 ——— X

2.60 ——— 0.64

$$\frac{2.4 - 2.52}{2.4 - 2.6} = \frac{0.66 - X}{0.66 - 0.64}$$

$$X = 0.648 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{X = 0.65 \text{ m}^3}$$

$$\text{Peso de grava} = \text{PVV} \times 0.65 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de grava} = 1560.61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.65 \text{ m}^3 = 1014.40 \text{ kg}$$

➤ **Estimación de contenido de agregado fino.**

Se está diseñando para  $1\text{m}^3$  (1000 lts); se sabe que  $V_{\text{abs}} = \frac{P_{\text{abs}}}{G_s}$ .

**Tabla 3.19 Estimación de contenido de agregado fino.**

Material	Peso absoluto(kg)	Gs	Volumen absoluto (litros)
Agua	190	1.0	190.00
Cemento	365.38	2.98	122.61
Grava	1014.40	2.66	381.35
Aire	2%		20.00*
total			713.96

\* $1\text{m}^3=1000$  litros y 2% de 1000 litros=20 litros

$$\text{Volumen de arena} = (1000 - 713.96) \text{ lts} = 286.04 \text{ lts}$$

$$\text{Peso de arena} = \text{volumen absoluto} \times G_s$$

$$\text{Peso de arena} = 286.04 \times 2.55 = 729.40 \text{ kg}$$

➤ **Ajuste por contenido de humedad.**

Se tendrá que calcular los pesos de los pétreos en estado húmedo y saturado, ya que de la diferencia entre estos dos valores se obtendrá el valor por el cual se tendrá que corregir el agua de mezclado. El peso húmedo se obtiene aplicando la ecuación 3.2 y el peso saturado aplicando la ecuación 3.3. Los resultados se resumen en la Tabla 3.20.

$$W_h = W_s(1 + \omega_h)$$

$$W_{\text{sat}} = W_s(1 + \omega_{\text{sat}})$$

Dónde:

$W_h$  = Peso humedo

$W_{sat}$  = Peso saturado

$W_s$  = Peso seco

$\omega_h$  = Humedad de campo

$\omega_{sat}$  = Absorción

**Tabla 3.20. Corrección de agua de mezclado.**

<b>Material</b>	<b>Peso Seco (kg)</b>	<b>Humedad %</b>	<b>Absorción %</b>	<b>Peso Húmedo(kg)</b>	<b>Peso Saturado(kg)</b>
Arena	729.40	5.0	4.02	765.87	758.72
Grava	1014.40	1.40	1.83	1028.60	1032.96

$$\text{Corrección arena} = 765.87 - 758.72 = 7.15 \text{ kg}$$

$$\text{Corrección grava} = 1028.60 - 1032.96 = -4.36 \text{ kg}$$

$$\text{Agua adicional} = 7.15 + (-4.36) = 2.79 \text{ kg}$$

El signo positivo indica que es agua aportada por los materiales.

Las cantidades finales se presentan en la Tabla 3.21.

**Tabla 3.21 Cantidades de materiales para 1 m<sup>3</sup>, MR= 36 kg/cm<sup>2</sup>**

<b>Material</b>	<b>Peso absoluto(kg)</b>
Agua	187.20
Cemento	365.38
Arena	765.87
Grava	1028.60

**b) Diseño de mezcla MR=45 kg/cm<sup>2</sup>.**

El diseño será realizado para un metro cubico de concreto (1m<sup>3</sup>=1000 lts), debido a que esta cantidad facilita la determinación del volumen del agregado fino en el concreto.

$$MR = K\sqrt{f'_c}$$

$$K=2.35$$

$$45 = 2.35 \sqrt{f'_c}$$

$$f'_c = 366.68 \text{ kg/cm}^2 \approx 367 \text{ kg/cm}^2$$

➔ **Selección de revenimiento.**

El revenimiento recomendado en la tabla 8 de este documento, para pavimentos y losas es de 2.5 cm como mínimo y 7.5 cm como máximo.

Se utilizara un revenimiento de aproximadamente 3 pulgadas.

➔ **Tamaño máximo de agregado.**

El tamaño máximo de agregado que se utilizara será de ¾ de pulgada.

➔ **Estimación del agua de mezclado y el contenido de aire.**

A partir de la tabla 3.2 de este documento, para un revenimiento de 3 pulgadas y un concreto sin aire incluido, el contenido de agua sugerido es de: 200 kg/m<sup>3</sup>; para lograr un revenimiento ligeramente menor a 3 pulgadas, se tomarán 190 kg/m<sup>3</sup> de agua. Se considerará un contenido de aire atrapado del 2%.

➔ **Selección de relación A/C.**

A partir de la tabla 3.3 de este documento, será necesario extrapolar valores para encontrar la relación A/C.

De acuerdo al código ACI 211.1, la fórmula para evaluar la resistencia a la compresión requerida (f'cr), cuando f'c es mayor a 350 kg/cm<sup>2</sup>, es la siguiente:

$$f'_{cr} = 1.1 f'_c + 50$$

$$f'_{cr} = 1.1(367) + 50 = 453.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$350 \text{ ————— } 0.48$$

$$420 \text{ ————— } 0.41$$

$$454 \text{ ————— } X$$

$$(350 - 454)/(350 - 420) = (0.48 - X)/(0.48 - 0.41)$$

$$X = 0.376$$

$$\mathbf{A/C = 0.38}$$

➔ **Calculo del contenido de cemento.**

$$A/C = 0.38$$

$$\frac{190 \text{ kg/m}^3}{C} = 0.38$$

$$\text{Cemento} = 500 \text{ kg/m}^3$$

➔ **Estimación del contenido de agregado grueso.**

$$PVV = 1560.61 \text{ kg/m}^3$$

A partir de la Tabla 3.5 de este documento, el contenido de grava está en función del módulo de finura del agregado fino (2.52) y del tamaño máximo nominal del agregado grueso ( $\frac{3}{4}$  de pulgada); por lo que será necesario interpolar.

$$MF = 2.52$$

$$2.40 \text{ ————— } 0.66$$

$$2.52 \text{ ————— } \mathbf{X}$$

$$2.60 \text{ ————— } 0.64$$

$$\frac{2.4 - 2.52}{2.4 - 2.6} = \frac{0.66 - X}{0.66 - 0.64}$$

$$X = 0.648$$

$$\mathbf{X = 0.65 \text{ m}^3}$$

$$\text{Peso de grava} = PVV \times 0.65 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de grava} = 1560.61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.65 \text{ m}^3 = 1014.40 \text{ kg}$$

➤ **Estimación de contenido de agregado fino.**

**Tabla 3.22: Estimación de contenido de agregado fino.**

Material	Peso absoluto(kg)	Gs	Volumen absoluto (lts)
Agua	190	1.0	190
Cemento	500	2.98	167.79
Grava	1014.40	2.66	381.35
Aire	2%		20
total			759.14

$$\text{Volumen arena} = 1000 - 759.14 = 240.86\text{lts}$$

$$\text{Peso arena} = \text{volumen absoluto} \times \text{Gs}$$

$$\text{Peso arena} = 240.86 \times 2.55 = 614.19 \text{ kg}$$

➤ **Ajuste por contenido de humedad.**

Se tendrá que calcular los pesos de los pétreos en estado húmedo y saturado, ya que de la diferencia entre estos dos valores se obtendrá el valor por el cual se tendrá que corregir el agua de mezclado. El peso húmedo se logra multiplicando el peso seco por la humedad de campo y el peso saturado se logra multiplicando el peso seco por la absorción.

Los resultados se resumen en la tabla 3.23.

**Tabla 3.23: Corrección de agua de mezclado.**

Material	Peso Seco (kg)	Humedad %	Absorción %	Peso Húmedo(kg)	Peso Saturado(kg)
Arena	614.19	5.0	4.02	644.90	638.88
Grava	1014.40	1.40	1.83	1028.60	1033.57

$$\begin{aligned} \text{Corrección arena} &= 644.90 - 638.88 = 6.02 \text{ kg} \\ \text{Corrección grava} &= 1028.60 - 1033.57 = -4.97 \text{ kg} \\ \text{Agua adicional} &= 6.02 + (-4.97) = 1.05 \text{ kg} \end{aligned}$$

Las cantidades finales se presentan en la tabla 3.24.

**Tabla 3.24: Cantidades de materiales para 1 m<sup>3</sup>, diseño MR= 45 kg/cm<sup>2</sup>**

Material	Peso absoluto (kg)
Agua	191.05
Cemento	500.00
Arena	644.9
Grava	1028.6

### 3.7.3 Resultados obtenidos de especímenes de concreto elaborados con diseños de mezcla.

Para verificar los diseños, se elaboraron probetas de ensayo para pruebas de resistencia a compresión en cilindros de concreto y resistencia a la flexión en vigas de concreto, a edades de 7 y 14 días, y así poder estimar la resistencia a 28 días del concreto. Los resultados se muestran a continuación.

**Tabla 3.25: Resultados de ensayos realizados a especímenes de concreto.**

Diseño	Edad	Resistencia a la Compresión ( $f'_c$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Flexión (MR.) (kg/cm <sup>2</sup> )
MR=36 kg/cm <sup>2</sup>	7 días	158.45	31.60
	14 días	212.90	39.24
MR=45 kg/cm <sup>2</sup>	7 días	257.58	34.10
	14 días	340.86	48.11

Los diseños de mezcla requieren de un ajuste, pues en el caso del diseño para MR=36 kg/cm<sup>2</sup> la resistencia a la compresión a 14 días, es de 90%  $f'_c$  (235 kg/cm<sup>2</sup>) lo que indica que se cumplirá a 28 días  $f'_c$ , pero el Modulo de Ruptura ya se ha sobrepasado; en el caso del diseño para MR=45 kg/cm<sup>2</sup> la resistencia a la compresión a 14 días es de 93%  $f'_c$  (367 kg/cm<sup>2</sup>) lo que indica que se cumplirá a 28 días  $f'_c$ , pero en el caso del Módulo de Ruptura ya se ha sobrepasado también. En ambos casos será necesario aumentar la relación A/C pues la relación A/C es inversamente proporcional a la resistencia y lo que se requiere es disminuir los Módulos de Ruptura.

### 3.7.4 Diseños de mezcla óptimos.

Después de realizar ajustes a los diseños de mezclas, se logró obtener un diseño de mezcla óptima el cual se presenta a continuación.

Las cantidades presentadas son para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto; para elaborar los especímenes será necesario modificar las cantidades presentadas dependiendo del volumen requerido.

**Tabla 3.26: Diseño de mezcla óptimo para MR=36 kg/cm<sup>2</sup>**

<b>Diseño de mezcla óptimo para MR= 36 kg/cm<sup>2</sup>; para 1 m<sup>3</sup></b>		
<b>Datos de agregados</b>		
	Arena	Grava
Gravedad especifica (G)	2.55	2.66
Peso volumétrico (Kg/m <sup>3</sup> )		1560.61
Humedad (%)	5.00	1.40
Absorción (%)	4.02	1.83
Módulo de finura	2.52	
Relación A/C	0.61	
<b>Cantidades de materiales con humedad de campo.</b>		
cemento	311.48	Kg
Agua	186.76	kg
Arena húmeda	814.30	Kg
Grava húmeda	1028.60	Kg

**Tabla 3.27: Diseño de mezcla óptimo para MR=45 kg/cm<sup>2</sup>**

<b>Diseño de mezcla óptimo para MR= 45 kg/cm<sup>2</sup>; para 1 m<sup>3</sup></b>		
<b>Datos de agregados</b>		
	Arena	Grava
Gravedad específica (G)	2.55	2.66
Peso volumétrico (Kg/m <sup>3</sup> )		1560.61
Humedad (%)	5.00	1.40
Absorción (%)	4.02	1.83
Módulo de finura	2.52	
Relación A/C	0.48	
<b>Cantidades de materiales con humedad de campo</b>		
Cemento	395.83	Kg
Agua	187.47	Kg
Arena húmeda	738.5	Kg
Grava húmeda	1028.60	Kg

NOTA IMPORTANTE: Los formularios con los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas en laboratorio en el desarrollo de la caracterización de materiales se pueden observar en el ANEXO 3.

## **CAPITULO IV**

# **MEDICIÓN DE CAMBIOS LONGITUDINALES EN EL CONCRETO HIDRÁULICO.**

#### **4.1 Introducción.**

Sin importar que el diseño y construcción de los pavimentos y pisos industriales de concreto hidráulico se hayan realizado en las condiciones más idóneas, éstos tienden a experimentar alabeos y fisuraciones como algo natural, motivo por el cual se deben minimizar las variables que generan estos efectos, para lo cual es indispensable tener en consideración el conocimiento sobre la tecnología del concreto, dentro del cual se puede mencionar el tener en cuenta valores de contracción y expansión representativos de las condiciones y tipo de construcción que se pretende realizar.

En la presente investigación se realiza el procedimiento de medición del cambio longitudinal en consideración a la Norma ASTM C157, la cual permite evaluar el potencial de expansión o contracción del concreto debido a causas ajenas a las fuerzas externas aplicadas y a cambios de temperatura. El método se concentra en la medición de los cambios dimensionales en tres especímenes de concreto de 100 mm de sección transversal cuadrada y 500 mm de longitud, colados cada uno con dos pines embebidos en los extremos sobre los que se registra sistemáticamente la longitud de la vigueta. El cambio longitudinal se determina tomando lecturas del cambio de longitud con respecto al tiempo, comparando la lectura del espécimen con respecto a una barra patrón, por lo tanto; luego de que la éstos son colados, a las 24 horas se desmoldan y sumergen en agua a  $23^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  para posteriormente tomar la primera lectura de su cambio de longitud. Luego de la primera medida, se sumergen en agua saturada con cal para realizar las medidas de longitud, a las edades de 7, 14, 28 y 56 días de edad de los especímenes de ensayo las cuales van mostrando como poco a poco el material va cambiando de longitud. Este procedimiento se encuentra desarrollado en este capítulo, también se muestran las mediciones de cambio de longitud obtenidas en el monitoreo de los especímenes. Estas serán procesadas estadísticamente hasta obtener los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, lo cual se presenta en el Capítulo V.

## **4.2 Procedimiento de ensayo para la medición de los cambios longitudinales del concreto.**

El procedimiento de ensayo de cambio longitudinal es desarrollado en correspondencia con la Norma ASTM C 157, la cual se presenta a continuación.

### **4.2.1 Norma ASTM C 157/C 157M.**

#### **Método de Ensayo Estándar para la Medición de Cambio Longitudinal del Mortero y el Concreto de Cemento Hidráulico Endurecido.**

**NOTA:** Se han citado en este apartado los aspectos considerados más importantes en la realización del ensayo para la medición de los cambios longitudinales del concreto, si se desea observar la Norma ASTM C157/C 157M en su totalidad ésta se encuentra en el Anexo N°1 del presente trabajo de grado.

- **Alcance.** Esta norma cubre la determinación de los cambios de longitud producidos por causas diferentes a las fuerzas externas aplicadas y a los cambios de temperatura en especímenes de mortero y concreto de cementos hidráulicos endurecidos hechos en laboratorio y expuestos a condiciones controladas de humedad y temperatura.
- **Cambio en longitud.** Un aumento o disminución en la longitud del espécimen de prueba causado por cualquier factor diferente a las fuerzas externas aplicadas y a los cambios en temperatura.
- **Importancia y uso**
  - La medición del cambio de longitud permite evaluar el potencial de expansión o contracción volumétrica del mortero o del concreto debido a causas diferentes a las fuerzas externas aplicadas y a cambios en temperatura. Este método de prueba es particularmente útil durante la

evaluación comparativa de este potencial en mezclas diferentes de concreto o mortero de cemento hidráulico.

- Este método de ensayo suministra información útil para fines experimentales o para productos que requieran ser probados bajo condiciones de mezclado, colocado, manejo o curado no normalizados (no normalizado se refiere a condiciones de temperatura y humedad no controladas), como un producto con alta trabajabilidad o con diferentes tiempos de desmoldado.
- Si son requeridas condiciones de mezclado, curado, muestreo y almacenamiento diferentes a las especificadas en esta norma, estas deben reportarse pero no se considerarán como condiciones normalizadas de este método. Las condiciones no normalizadas deben reportarse clara y específicamente junto con los valores comparativos, y además deben justificarse claramente las razones por las cuales no se emplean las condiciones normalizadas.

#### ➤ **Aparatos**

- Moldes y longitud del comparador. Los moldes para fabricar los especímenes y la longitud del comparador empleado en la medición del cambio en longitud deben satisfacer los requerimientos de la Norma ASTM C 490, *Moldes en General: Los moldes para especímenes o sujetadores que están en contacto con el concreto pueden ser hechos de acero, hierro fundido u otro material no absorbente, no reactivo con concreto portland u otros cementos hidráulicos. Los moldes tendrán las dimensiones y tolerancias especificadas en el método para el cual los especímenes son requeridos. Los moldes mantendrán sus dimensiones y formas bajo todas las condiciones de uso. Deben ser provistos los medios para mantener los platos de las bases unidos firmemente a los moldes. Los moldes reusables serán ligeramente cubiertos con aceite mineral o un adecuado material desmoldante no reactivo antes de su uso.*

- Varilla de compactación. La varilla de compactación debe ser una varilla recta de acero, con un diámetro igual a 10 mm (3/8 de pulgada), con una longitud no inferior a 250 mm (10 pulgadas) y con el extremo de compactación redondeado hemisféricamente del mismo diámetro.

➤ **Toma de muestras.**

Tome muestras de acuerdo con lo establecido en la práctica C 192/C 192M de mezclas “bachadas” de mortero o concreto de cemento hidráulico hechas en el laboratorio. Cuando se tomen muestras en condiciones no normalizadas, como en el sitio de obra, se sugiere se siga la C192/C 192M. Especímenes elaborados en el sitio de obra pueden presentar hasta dos veces la contracción por secado mostrada en especímenes moldeados en el laboratorio, para los mismos materiales y proporciones.

➤ **Especímenes de ensayo.**

El espécimen de prueba para el concreto, en el que todo el agregado pasa el tamiz de 50 mm (2 pulgadas), debe ser un prisma con una sección transversal cuadrada de 100 mm (4 pulgadas) de lado y de una longitud aproximada de 285 mm (11 ¼ de pulgada). Sin embargo, si todo el agregado pasa el tamiz de 25 mm (1 pulgada) debe usarse un prisma de una sección transversal cuadrada de 75 mm (3 pulgadas) de lado, (Revisar limitante N° 4 en el Capítulo I). Para cada condición de prueba deben prepararse tres especímenes. Como el cambio en longitud puede ser afectado por el tamaño del espécimen los que vayan a ser comparados deben tener las mismas dimensiones y cualquier límite en la especificación debe aplicarse al tamaño específico del espécimen.

➤ **Procedimiento para la mezcla del concreto.**

Mezcle el concreto en un mezclador de laboratorio de acuerdo con las provisiones de la práctica C 192/C 192/M. Determine el asentamiento del concreto usando la práctica C 143/C 143M.

➤ **Procedimiento para el moldeo de los especímenes.**

Coloque el concreto en el molde en dos capas aproximadamente iguales de acuerdo con las instrucciones generales suministradas para la colocación del concreto en la práctica C 192/C 192/M.

Compacte cada capa mediante la varilla de compactación excepto en los casos en que el asentamiento sea menos de 75 mm (3 pulgadas) de acuerdo con las instrucciones dadas para la consolidación a la flexión de especímenes de prueba en la práctica C 192/C 192 M (Este es el caso en la presente investigación); el mismo método de consolidación debe usarse en todos los especímenes a ser comparados. Además, cuando se esté colocando la capa superior, trabaje completamente con los dedos el concreto alrededor de cada tornillo de calibración. La capa superior debe sobrepasar ligeramente el molde. Luego de que la consolidación se haya terminado, elimine el exceso de material con la ayuda de un emparejador. Tan pronto la operación de moldeo se complete, y para evitar cualquier traba de los pernos de calibración durante la contracción inicial del espécimen, afloje en cada extremo del molde el dispositivo que sostiene los pernos de calibración en su lugar.

➤ **Procedimiento para el curado de los especímenes.**

- Cure los especímenes moldeados en una cabina o cuarto de humedad que cumpla lo establecido en la especificación C-511. Proteja los especímenes del agua que escurre de techos y muros.
- Remueva los especímenes de los moldes luego de  $23 \frac{1}{2} \text{ h} \pm \frac{1}{2} \text{ h}$  de haber agregado el agua al cemento durante la operación de mezclado. Para evitar daños a los especímenes cuando se remueven de los moldes puede ser necesario, especialmente en casos de ciertos cementos de fraguado lento, dejar a los especímenes en los moldes más de 24 h. En estos casos, el curado en húmedo debe extenderse y todos los especímenes a compararse unos con otros deben someterse a las mismas condiciones de curado en

húmedo y las lecturas iniciales de comparación deben hacerse dentro de  $\pm 1/2$  h de la misma edad. Mediante el dispositivo de desmolde remueva cuidadosamente los especímenes, sin aplicar presión directamente en los tornillos de calibración. Durante esta operación, el sostenedor de los tornillos de calibración debe permanecer adherido a los tornillos. Limite las marcas de identificación o posición en los especímenes a las hechas mediante grafito aplicado ya sea con lápiz o mediante un líquido que deposite el grafito sin adherirse, o a las marcas hechas con tinta impermeable indeleble. Una vez los especímenes se remuevan de los moldes y antes de medir su longitud, colóquelos en agua saturada con cal y a una temperatura de  $73\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) por un periodo mínimo de 15 min en el caso de especímenes de sección transversal cuadrada de 25 mm (1 pulgada) de lado o 30 min en el caso de especímenes de sección transversal cuadrada de 75 mm (3 pulgadas) de lado o 100 mm (4 pulgadas) de lado. Este procedimiento minimiza las variaciones en longitud debidas a los cambios en temperatura. Luego de  $24\text{ h} \pm 1/2\text{ h}$  de haber agregado el agua al cemento durante la operación de mezclado, remueva los especímenes del depósito de agua, uno por uno; séquelos con un paño húmedo e inmediatamente tome la lectura de comparación inicial.

- Luego de la lectura de comparación inicial, almacene los especímenes en agua saturada con cal a una temperatura de  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $73\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) hasta que alcancen una edad de 28 días, incluyendo el periodo en los moldes. Al final del periodo de curado, haga una segunda lectura de comparación luego de que los especímenes se coloquen en condiciones de temperatura más controladas.

➤ **Procedimiento para el almacenaje de los especímenes.**

Luego de realizar la medición al final del periodo de curado, se almacenan los especímenes de acuerdo con alguna de las siguientes dos opciones:

- Tanques de agua. Sumerja los especímenes en tanques de agua saturada con cal de acuerdo con la práctica C 511. Tome lecturas de comparación de cada espécimen cuando estos hayan alcanzado una edad, incluyendo el periodo de curado, de 8, 16, 32, y 64 semanas. Realice estas mediciones inmediatamente luego de que los especímenes hayan sido sumergidos en agua a una temperatura de  $23\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$  ( $73\text{ °F} \pm 1\text{ °F}$ ) por lo menos por 15 min cuando se trate de especímenes de 25 mm (1 pulgada) o por 30 min cuando se trate de especímenes de 75 mm (3 pulgadas) o 100 mm (4 pulgadas).
- Almacenamiento al aire. Almacene los especímenes en el cuarto de secado, de tal forma que estos tengan un espacio mínimo de 25 mm (1 pulgada) en todos los lados. Tome lecturas de comparación de cada espécimen cuando estos hayan alcanzado una edad, incluyendo el periodo de curado, de 8, 16, 32, y 64 semanas. Preferiblemente tome estas lecturas en cuarto que se mantenga a una humedad relativa de  $50 \pm 4\%$ , mientras que los especímenes están a una temperatura de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  ( $73\text{ °F} \pm 3\text{ °F}$ ).

➤ **Procedimiento para el cálculo de la longitud de cambio.**

- Lectura del comparador. Lea el dial del comparador con el espécimen de prueba en el comparador; luego lea el dial del comparador con la barra de referencia en el comparador. Calcule la diferencia entre las dos lecturas como se describe en la práctica C 490.
- Cambio en la longitud. Luego de la lectura inicial del comparador, calcule la longitud de cambio de cualquier espécimen a cualquier edad de la siguiente manera:

$$\Delta L_x = \frac{\text{CRD} - \text{CRD inicial}}{G} * 0.001$$

Dónde:

$\Delta L_x$  = longitud de cambio de espécimen a cualquier edad.

CRD = diferencia entre la lectura en el comparador del espécimen y la barra de referencia a cualquier edad (lectura de cambio longitudinal).

CRD<sub>inicial</sub> = diferencia inicial entre la lectura en el comparador del espécimen y la barra de referencia (lectura de cambio longitudinal inicial).

G = longitud de calibración del espécimen (545 mm)

### **4.3 Elaboración de probetas de ensayo.**

Se elaboraron probetas para el ensayo de cambio longitudinal cuya sección transversal cuadrada es de 100 mm y cuya longitud es de 500 mm; probetas para ensayo de resistencia a la flexión, éstas son prismas de sección transversal cuadrada de 150 mm y longitud de 600 mm; así como también las probetas para ensayo a compresión, los cuales son especímenes cilíndricos con diámetro de 150 mm y 300 mm de longitud.

#### **4.3.1 Fabricación del concreto hidráulico.**

Para elaborar las probetas de ensayo descritas en la sección 4.3 se realizó la fabricación del concreto hidráulico en correspondencia con el procedimiento descrito en la norma ASTM C 192/C 192/M Práctica estándar para elaboración y curado en el laboratorio de especímenes de concreto para ensayo. Este procedimiento se presenta en el Anexo 2.1.

#### **4.3.2 Ensayos de control de calidad al concreto en estado fresco.**

El concreto requiere de rigurosos controles después de su fabricación, por lo tanto se realizan diversas pruebas para asegurar que este posee la calidad deseada y que está dentro de las especificaciones; pruebas muy esenciales como lo son: medición de revenimiento, medición de temperatura, contenido de aire atrapado y peso volumétrico, cuyos resultados se muestran a continuación:

- **Medición de revenimiento del concreto hidráulico en estado fresco (ASTM C-143).** Este procedimiento se puede observar en el Anexo 2.2. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Revenimientos en pulgadas de bachadas de concreto.**

<b>Módulo de Ruptura</b>	<b>N° Bachada</b>	<b>Concreto vigas, pulg.</b>	<b>Concreto cilindros, pulg.</b>	<b>Concreto cambio longitudinal, pulg.</b>
MR=36 kg/cm <sup>2</sup>	1	2 ¾	3	3
	2	2 ½	2 ¾	
	3	2 ¼		
	4	2 ½		
MR=45 kg/cm <sup>2</sup>	1	2 ½	3	2 ¾
	2	3	2 ¾	
	3	2 ½		
	4	2 ¾		

- **Determinación de Peso Unitario y contenido de aire en las mezclas de concreto fresco por el método de presión (ASTM C-138).** Este procedimiento se puede observar en el Anexo 2.3. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2: Resultados de ensayo de peso unitario y contenido de aire del concreto.**

<b>Mezcla</b>	<b>Peso Unitario (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de aire (%)</b>
Diseño MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	2362.59	0.8
Diseño MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>	2372.69	0.8

- **Determinación de la temperatura del concreto hidráulico en estado fresco (ASTM C-1064).** Este procedimiento se encuentra descrito en el Anexo 2.4. los resultados se presentan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Temperaturas de batchadas de concreto para elaborar las vigas del ensayo de cambio longitudinal.**

Vigas	Temperatura (°C)
Concreto MR=36 kg/cm <sup>2</sup>	27
Concreto MR=45 kg/cm <sup>2</sup>	26

Pero también, al concreto utilizado en la elaboración de las probetas, se le realizó un ensayo más especializado; como lo es el ensayo para determinar el tiempo de fraguado, el cual se describe a continuación:

- **Determinación del tiempo de fraguado del concreto hidráulico por resistencia a la penetración. (ASTM C-403)**

Fraguado es el término utilizado para describir la rigidez de la pasta de cemento y se refiere al cambio en el concreto de un estado fluido a un estado rígido. Se utilizan los términos de fraguado inicial y fraguado final para describir las etapas del fraguado.

El equipo utilizado para realizar el ensayo es el siguiente:

- Contenedores para especímenes de mortero.
- Agujas de penetración.
- Aparato de carga.
- Malla N°4.
- Barra de apisonado.
- Cronómetro.
- Pipeta.

**Procedimiento:**

- a) Del concreto a ensayar obtener una muestra de mortero (suficiente para llenar dos moldes cúbicos de 15 cm por lado) por medio de tamizado por la malla N°4, auxiliándose de mesa vibratoria. (Ver fotografía 4.1)



Fotografía 4.1 Tamizado de concreto para ensayo de tiempo de fraguado.

- b) Colocar el mortero en los contenedores en una sola capa. (Ver fotografía 4.2)



Fotografía 4.2 Colocación de mortero en moldes de ensayo para tiempos de fraguado.

- c) Consolidar el mortero para evitar bolsas de aire en el espécimen y nivelar la superficie, esto se obtiene a través de un movimiento de un lado hacia otro del contenedor sobre una superficie sólida. La superficie del mortero debe quedar al menos  $\frac{1}{2}$  pulgada abajo del borde de la superficie del contenedor.
- d) Se almacenan los especímenes en un ambiente que se encuentre dentro de un rango de temperatura de 20 a 25 °C. Hacer el ensayo inicial después de un tiempo transcurrido de 3 a 4 horas, es muy importante señalar que este tiempo se comienza a contar desde el momento en que el agua entra en

contacto con el cemento. Los ensayos posteriores deberán ser hechos a intervalos de  $\frac{1}{2}$  a 1 hora, se deben realizar penetraciones a intervalos menores (por ejemplo cada 5 minutos) a medida que las lecturas se acercan a 500 y 4000 psi.

- e) Justo antes de los ensayos de penetración, remover el agua de sangrado de la superficie de los especímenes por medio de una pipeta.
- f) Insertar una aguja de tamaño apropiado (se recomienda iniciar con la aguja de sección transversal de 1 pulgada<sup>2</sup>), en el aparato de resistencia a la penetración, dependiendo del grado de fraguado del mortero y acercar la superficie de apoyo de la aguja, al contacto con la superficie del mortero. Gradualmente y uniformemente aplicar una fuerza vertical en el aparato hasta que la aguja penetre el mortero a una profundidad  $1 \pm 1/16$ " ( $25 \pm 2$  mm). El tiempo requerido para penetrar 1 pulgada de profundidad debe ser de  $10 \pm 2$  segundos. (Ver fotografía 4.3).



Fotografía 4.3 Ensayo de tiempos de fraguado.

- g) Hacer al menos 6 penetraciones por cada ensayo de tiempo de fraguado hasta obtener al menos una lectura igual o mayor de 4000 psi, teniendo mucho cuidado de que en cada penetración se eviten áreas donde el mortero ha sido alterado en penetraciones anteriores. El claro de distancia entre las impresiones de las agujas debe ser al menos dos diámetros de la aguja que está siendo usado, pero no menos que  $\frac{1}{2}$  pulgada. El claro de distancia entre cualquier impresión de aguja y el lado del contenedor debe ser al menos 1 pulgada.

- h) Registrar la fuerza requerida para producir la penetración de la aguja.
- i) Plotear los resultados de ensayos para obtener los tiempos de fraguado.

En la Tabla 4.4 se presentan los datos obtenidos del ensayo para MR=36 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 4.4: Tiempo de fraguado para diseño de mezcla MR= 36 kg/cm<sup>2</sup>**

Tiempo (min)	Área de aguja(pulg <sup>2</sup> )	Fuerza de penetración(lb)	Resistencia (lb/ pulg <sup>2</sup> )
180	1	68	68
200	1/4	54	216
220	1/10	30	300
240	1/10	34	340
260	1/10	50	500
305	1/20	122	2440
320	1/40	64	2560
335	1/40	80	3200
345	1/40	120	4800

Los datos experimentales se presentan en el Gráfico 4.1.

La dispersión de puntos en el gráfico se debe a errores sistemáticos que afectan el ensayo; por lo que será necesario realizar un análisis de regresión aplicando el método de los mínimos cuadrados, con el objetivo de establecer una ecuación de regresión con su correspondiente curva de regresión y con ellos poder efectuar predicciones de la variable dependiente (Resistencia) a partir de la variable independiente (tiempo).

### **Análisis de regresión.**

De acuerdo a la curva mostrada en el grafico 4.1, ésta corresponde a una ecuación de regresión de la forma:  $Y_c = ab^x$

La ecuación del ensayo es:  $R_c = ab^t$

Las ecuaciones normales de regresión son las siguientes:

$$\sum \log Y = n \log a + b \sum \log X$$

$$\sum \log X \log Y = \log a \sum \log X + b \sum (\log X)^2$$

La tabla 4.5 contiene los valores logarítmicos necesarios para resolver las ecuaciones normales.

**Gráfico 4.1 Tiempo de fraguado con datos experimentales MR=36 kg/cm<sup>2</sup>**



**Tabla 4.5: Valores logarítmicos MR= 36 kg/cm<sup>2</sup>**

Tiempo (min.)	Resistencia (psi)	log t	(log t) <sup>2</sup>	log r	log t*log r	R(regresión)
180	68	2.2553	5.0863	1.8325	4.1328	78.2139

200	216	2.3010	5.2947	2.3345	5.3716	148.5300
220	300	2.3424	5.4869	2.4771	5.8025	265.3235
240	340	2.3802	5.6654	2.5315	6.0255	450.6076
260	500	2.4150	5.8321	2.6990	6.5179	733.4980
305	2440	2.4843	6.1717	3.3874	8.4153	1938.1893
320	2560	2.5051	6.2758	3.4082	8.5382	2596.0501
335	3200	2.5250	6.3759	3.5051	8.8507	3430.9539
345	4800	2.5378	6.4405	3.6812	9.3423	4103.6778
Ó 2405	14424	21.7461	52.6293	25.8566	62.997	

Sustituyendo los valores logarítmicos en las ecuaciones normales, se tiene:

$$25.8566 = 9 \log a + 21.7461 b$$

$$62.9969 = 21.7461 \log a + 52.6293 b$$

Resolviendo las ecuaciones se obtiene:

$$b=6.0871$$

$$a=1.4629 \cdot 10^{-12}$$

La ecuación del ensayo es:  $R_c = 1.4629 \cdot 10^{-12} t^{6.0871}$

El grafico 4.2 presenta los datos estimados a partir de la ecuación de regresión encontrada.

A partir de la ecuación de ensayo obtenida se pueden determinar los tiempos correspondientes al fraguado inicial del concreto (500 psi) y al fraguado final (4000 psi).

Al despejar la variable t de la ecuación de ensayo obtenida, se tiene:

$$t = \text{antilogaritmo} \left( \frac{\ln R_c - \ln(1.4629 \cdot 10^{-12})}{6.0871} \right)$$

**Tiempo de fraguado inicial= 500 psi**

$$t = \text{antilog} \left( \frac{\ln 500 - \ln(1.4629 \cdot 10^{-12})}{6.0871} \right) = 244 \text{ min} = 4.066 \text{ horas}$$

**Grafico 4.2 Tiempo de fraguado MR= 36 kg/cm<sup>2</sup>**



**Tiempo de fraguado final =4000 psi**

$$t = \text{antilog} \left( \frac{\ln 4000 - \ln(1.4629 * 10^{-12})}{6.0871} \right) = 344 \text{ min} = 5.73 \text{ horas}$$

De igual forma se procede con el cálculo del tiempo de fraguado para MR= 45 kg/cm<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.6

**Tabla 4.6: Tiempos de fraguado para diseños de mezcla.**

Diseño de mezcla	Tiempo de fraguado (minutos, horas)	
	Inicial	final
MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	244, 4.066	344, 5.73
MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>	224, 3.73	309, 5.15

### **4.3.3 Colado y curado de las probetas de ensayo.**

Luego de realizados los ensayos de control de calidad del concreto hidráulico se procede al colado y curado de las probetas de ensayo basados en la norma ASTM C-192.

El procedimiento realizado para el colado y curado de probetas para ensayo de resistencia a la compresión y a la flexión se puede observar en el Anexo 2.5 y Anexo 2.6 respectivamente.

#### **✦ Colado, curado probetas para ensayo de cambio longitudinal.**

El procedimiento realizado para el colado de las probetas de ensayo para cambio longitudinal, está basado en la norma ASTM C-157; el equipo utilizado y el procedimiento realizado se describen a continuación:

#### **Equipo utilizado:**

- Moldes: las dimensiones de los moldes serán de una sección transversal cuadrada de 4 pulgadas y una longitud aproximada de 19 pulgadas.
- Mesa vibratoria.
- Palas, cucharones, enrasador,
- Planchas o llanas.

#### **Procedimiento:**

- a) Engrasar los moldes con el fin de evitar que el concreto se adhiera al molde.
- b) Colocar los pernos de calibración en los moldes, con el auxilio de un dispositivo sostenedor. (Ver fotografía 4.4)
- c) Colocar el concreto en el molde en una sola capa, trabajando completamente con los dedos el concreto alrededor de cada tornillo de calibración. (Ver fotografía 4.5).
- d) Consolidar el espécimen de concreto mediante consolidación externa a través del uso de una mesa vibratoria; ya que se trata de concreto de revenimiento menor a 3 pulgadas. Para realizar la consolidación del

espécimen se utilizo una Mesa vibratoria de 3600 vpm (Vibraciones por minuto) y una Amplitud de 0 - 1.58 mm (Vibración lineal), durante un tiempo de 25 segundos. (Ver Fotografía 4.6)



Fotografía 4.4 Coloración de pernos de calibración en moldes.



Fotografía 4.5 Acomodamiento manual de concreto en moldes.



Fotografía 4.6 Consolidación de vigas para medir cambio longitudinal.

- e) Remover el exceso de concreto de la superficie; usar una plancha de mano para dar el acabado a la superficie; para evitar cualquier traba de los tornillos

de calibración se recomienda aflojar ligeramente los dispositivos sujetadores de los mismos. (Ver fotografía 4.7).



Fotografía 4.7 Acabado final de vigas para medir cambio longitudinal.

- f) Remover los dispositivos sujetadores de los tornillos de calibración, después de  $23 \frac{1}{2} \text{ h} \pm \frac{1}{2} \text{ h}$  de haber agregado el agua al cemento. (Ver fotografía 4.8).



Fotografía 4.8 Remoción de dispositivos sujetadores de tornillos de calibración.

- g) Remover los especímenes de concreto de los moldes después de  $23 \frac{1}{2} \text{ h} \pm \frac{1}{2} \text{ h}$  de haber agregado el agua al cemento. (Ver fotografía 4.9 y 4.10)



Fotografía 4.9 y 4.10 Desmoldaje de vigas de concreto para medir cambio longitudinal.

h) Una vez los especímenes se remueven de los moldes y antes de medir su cambio de longitud inicial, colocarlos en agua saturada con cal, a una temperatura de  $23 \pm 0.5$  °C, por un periodo de 30 min. (Ver fotografía 4.11)



Fotografía 4.11 Curado de vigas de concreto para medir cambio longitudinal.

i) Remover los especímenes del agua saturada con cal, secarlos con un paño húmedo e inmediatamente tomar la lectura de comparación inicial (revisar sección 4.4, el procedimiento se encuentra en sección 4.4.3).



Fotografía 4.12 Toma de lectura inicial de cambio longitudinal.

Las lecturas de comparación inicial en los especímenes se presentan en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7: Lecturas iniciales de cambio de longitud.**

N° de viga	Lectura MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	Lectura MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>
1	810	185
	776	227

	799	170
2	597	167
	638	149
	523	161
3	561	379
	484	364
	554	367

#### 4.4 Monitoreo de cambios longitudinales en el concreto.

Una vez medida la longitud inicial de los especímenes de concreto, estos son colocados en un tanque de almacenamiento con agua saturada con cal; durante el tiempo de almacenamiento se va midiendo el cambio de longitud de la viga en las edades de interés, lo que define la tendencia del concreto a ir contrayéndose o expandiéndose. El monitoreo de los cambios longitudinales en el concreto se realizó a las edades de 7, 14, 28 y 56 días de haber sido elaborado.

##### 4.4.1 Equipo necesario para la medición de cambios longitudinales.

El equipo utilizado en la medición de los cambios longitudinales del concreto son los que se detallan a continuación:

- Deformímetro: debe tener una graduación de 0.002 mm, con una precisión de 0.002 en cualquier intervalo o nivel.
- Varilla de calibración: la barra debe estar fabricada con una aleación de acero con un coeficiente de expansión térmica no mayor de 2 millonésimas por grado Celsius.
- Comparador de longitud: el comparador debe estar diseñado para acomodar al tamaño del espécimen empleado y para permitir un medio adecuado de contacto con los tornillos de ajuste.

#### 4.4.2 Calibración y montaje de equipo para realizar la medición de cambios longitudinales.

El procedimiento realizado para la calibración y el montaje del equipo para la medición de los cambios longitudinales se describe a continuación:

- a) Montar deformímetro en el comparador de longitud, apretándolo ligeramente con el tornillo de fijación o sujeción. (Ver fotografía 4.13).



Fotografía 4.13 Montaje de dispositivo de medición de cambio longitudinal.

- b) Colocar la barra de referencia en el comparador de longitud, posteriormente apretar tornillo de sujeción para evitar que este se mueva al tener contacto con los tornillos de medición de los especímenes de concreto (Ver fotografía 4.14)



Fotografía 4.14 Calibración de dispositivo de medición de cambio longitudinal

- c) Registrar la lectura del deformímetro para la barra de referencia.

#### 4.4.3 Descripción de procedimiento de monitoreo de expansión y contracción en las probetas de ensayo.

El procedimiento realizado para la medición de los cambios longitudinales es el siguiente:

- a) Sumergir en agua sin cal los especímenes de concreto, a una temperatura de  $23 \pm 0.5$  °C ( $73 \pm 1$  °F), 30 minutos antes de las lecturas (ver fotografía 4.15)



Fotografía 4.15 Especímenes sumergidos en agua antes de medición.

- b) Remover el espécimen del depósito de agua y secarlo con un paño húmedo (Ver fotografía 4.16)



Fotografía 4.16 Preparación del espécimen antes de toma de lectura de cambio longitudinal.

- c) Realizar el procedimiento descrito en la sección 4.4.2, se retira la barra de calibración con mucha precaución (para no descalibrar el equipo).
- d) Se coloca el espécimen en el comparador de longitud, teniendo cuidado de no golpear los topes; ya que un leve golpe puede moverlos y afectar la lectura. (Ver fotografía 4.17)



Fotografía 4.17 Toma de lectura de cambio longitudinal.

- e) Se lee y registra la lectura de cambio de longitud del espécimen, se retira del comparador de longitud y se sumerge en el agua sin cal, se repite este proceso tres veces por cada uno para obtener tres lecturas por cada espécimen.
- f) Cuando ya se han obtenido tres lecturas de cambio de longitud por cada espécimen estos se retiran del agua sin cal y se sumerge nuevamente en agua saturada con cal.

Los resultados de las mediciones de cambio longitudinal para ambos módulos de ruptura se presentan en la Tabla 4.8. El procesamiento y análisis de los mismos se puede observar en el Capítulo V.

**Tabla 4.8: Lecturas de cambio longitudinal en especímenes de ensayo.**

Edad de ensayo (días)	N° de espécimen	Lectura MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	Lectura MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>
7	N°1	858	252
		834	241
		846	203
	N°2	675	169
		641	192
		649	179

	N°3	611	425
		575	419
		602	407
14	N°1	782	205
		812	198
		779	242
	N°2	592	178
		579	155
		539	150
	N°3	560	381
		532	369
		528	411
28	N°1	779	163
		742	172
		768	160
	N°2	545	168
		559	159
		537	129
	N°3	532	372
		525	345
		503	375
56	N°1	740	129
		765	138
		742	162
	N°2	518	119
		512	132
		557	124
	N°3	511	339

		505	356
		490	346

#### 4.5 Ensayos de resistencia a la compresión y flexión del concreto.

Los ensayos de resistencia a la flexión y compresión se realizaron a las mismas edades de medición de los cambios longitudinales del concreto; con el fin de verificar el cumplimiento de los módulos de ruptura planteados y verificar la resistencia a la compresión alcanzada equivalente al módulo de ruptura.

Estos son ensayos rutinarios, frecuentes y conocidos; por lo tanto sus procedimientos serán descritos en Anexos. Mas sin embargo simultáneamente a estos ensayos se ha realizado el ensayo no destructivo al concreto denominado Velocidad de pulso a través del concreto (Modulo de elasticidad dinámica del concreto) el cual es desarrollado en la sección 4.5.3.

##### 4.5.1 Ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C 39).

El ensayo de resistencia a la compresión consiste en aplicar una carga axial de compresión a un cilindro moldeado. El esfuerzo de compresión del espécimen es calculado dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen.

El procedimiento realizado se puede observar en el anexo 2.7. Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión se presentan en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9: Resultados de ensayos de resistencia a la compresión.**

Edad (días)	Resistencia a la compresión( kg/cm <sup>2</sup> )	
	Diseño MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	Diseño MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>
7	138.44	243.84
14	180.27	304.94

<b>28</b>	228.25	367.58
<b>56</b>	248.9	401.5

#### 4.5.2 Ensayo de resistencia a la flexión (ASTM C 78).

El ensayo de resistencia a la flexión consiste en aplicar una carga en los tercios medios de la viga de concreto. Los resultados son calculados e informados como el módulo de ruptura. El procedimiento realizado se puede observar en el anexo 2.8. Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la flexión se presentan en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10: Resultados de ensayos de resistencia a la flexión.**

Edad (días)	Resistencia a la flexión. ( kg/cm <sup>2</sup> )	
	Diseño MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	Diseño MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>
<b>7</b>	25.73	37.75
<b>14</b>	30.96	43.50
<b>28</b>	37.70	47.57
<b>56</b>	43.70	55.33

#### 4.5.3 Ensayo estándar para velocidad de pulso a través del concreto (Modulo de elasticidad dinámica del concreto).

Los pulsos de ondas de esfuerzo longitudinal son generados por un transductor electro acústico que es mantenido en contacto con una superficie de concreto bajo prueba. Después de atravesar el concreto, los pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor colocado a una distancia L del transductor transmisor. El tiempo de transito T, la velocidad de pulso V, y el módulo de elasticidad E del concreto son medidos electrónicamente.

Este es un ensayo no destructivo, que se aplica para juzgar la uniformidad y calidad relativa del concreto, para indicar la presencia de vacíos y grietas, y para evaluar la efectividad de reparación de las grietas. También es aplicable para indicar cambios en las propiedades del concreto y en el análisis de estructuras, para estimar la severidad del deterioro o agrietamiento.

El ensayo es aplicable a ensayos en el campo y en el laboratorio sin consideraciones de tamaño o forma del espécimen; en este caso el ensayo se aplicara a especímenes cilíndricos de concreto con dimensiones de 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de altura.

El equipo utilizado y el procedimiento realizado se describen a continuación:

**Equipo utilizado:**

- Generador de pulso y transductor transmisor: el generador de pulso consiste en un circuito para generar pulsos de voltaje, pulsos repetitivos a una razón no menor de 3 pulsos por segundo. El transductor deberá ser de material sensitivo al voltaje. Un pulso de encendido será producido para poner en marcha el circuito de medición de tiempo.
- Transductor receptor y amplificador: el transductor receptor será similar al transductor transmisor. El amplificador tendrá una respuesta uniforme entre media y tres veces la frecuencia resonante del transductor receptor.
- Circuito medidor de tiempo: el circuito medidor de tiempo y el pulso disparador asociado será capaz de proveer una total resolución de medición de tiempo de al menos de un micro segundo.
- Unidad de pantalla (Display): una unidad de pantalla indicara el tiempo de transito del pulso con una precisión de un micro segundo.
- Agente de acoplamiento: un material viscoso (grasa) para asegurar eficiente transferencia de energía entre el concreto y los transductores.

**Procedimiento:**

- a) Chequear el funcionamiento del equipo.

- b) Se conectan los cables al equipo para medir el módulo de elasticidad.(ver fotografía 4.18)



Fotografía 4.18 Preparación de equipo generador de pulso ultrasónico.

- c) Aplicar agente de acoplamiento (grasa) a las caras del transductor del equipo (ver fotografía 4.19).



Fotografía 4.19 Engrasado de caras de transductores.

- d) Realizar un ajuste de tiempo cero, juntando y presionando las caras del transductor (ver fotografía 4.20)



Fotografía 4.20 Ajuste de tiempo cero utilizando los transductores.

- e) Secar los especímenes con una franela absorbente.  
f) Aplicar agente de acoplamiento (grasa) a las superficies de ensayo; en

Este caso a las caras de los cilindros. (Ver fotografía 4.21)



Fotografía 4.21 Aplicación de agente de acoplamiento en espécimen.

- g) Presionar las caras de los transductores firmemente contra la superficie del concreto hasta que un tiempo de transito estable aparezca en la pantalla.  
(ver fotografía 4.22)



Fotografía 4.22 Ensayo de pulso ultrasónico.

Los resultados obtenidos en el ensayo de pulso ultrasónico (módulo de elasticidad dinámico del concreto), se presentan en la Tabla 4.9

**Tabla 4.11 Módulo de elasticidad dinámica del concreto.**

<b>Módulo de ruptura</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Módulo de elasticidad dinámico(psi)</b>
<b>MR= 36 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>7</b>	<b>5.54 *10<sup>6</sup></b>

	14	$6.18 \cdot 10^6$
	28	$6.43 \cdot 10^6$
	56	$6.75 \cdot 10^6$
<b>MR= 45 kg/cm<sup>2</sup></b>	7	$6.04 \cdot 10^6$
	14	$6.48 \cdot 10^6$
	28	$6.75 \cdot 10^6$
	56	$6.84 \cdot 10^6$

**NOTA IMPORTANTE:** Los formularios con los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas en laboratorio en el desarrollo de monitoreo, ensayos no destructivos y ensayos destructivos a especímenes de concreto elaborados. Se pueden observar en el ANEXO 4.

## **CAPITULO V**

# **PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.**

## **5.1. Introducción.**

En el desarrollo de la presente investigación es de mucha importancia llevar a cabo un procesamiento ordenado de toda la información obtenida de los ensayos realizados, y de esta manera definir los aportes con los que se contribuye en el desarrollo de las áreas afines a la investigación realizada.

El procedimiento de curado utilizado en la realización de la investigación (curado por sumersión) de acuerdo a la norma ASTM C 157, provoca expansiones en los especímenes de concreto durante las primeras edades; registrando posteriormente el fenómeno de contracción.

Para obtener los coeficientes de expansión y contracción del concreto se realizaron tres lecturas de cambio de longitud 24 horas después del contacto inicial del agua con el cemento en la elaboración de la mezcla (cambio de longitud inicial), y también a las edades de ensayo de 7, 14, 28 y 56 días en cada espécimen elaborado (tal como se describe en el Capítulo IV sección 4.4); se obtuvo un promedio correspondiente a cada edad de ensayo con el cual en comparación con la lectura de cambio de longitud inicial se calculó el coeficiente correspondiente a cada espécimen; de estos coeficientes se obtiene el promedio, el cual se reporta como coeficiente de expansión o contracción del concreto según sea el caso para cada edad de ensayo.

Al reportar los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico se deben describir las características bajo las cuales han sido determinados, como por ejemplo propiedades de los materiales utilizados, método de consolidación del concreto, período y método de curado de los especímenes, etc.

En el presente capítulo se muestra el procesamiento de la información obtenida del monitoreo de los especímenes de concreto; se presentan en forma tabular y gráfica los resultados, posteriormente se realiza el análisis de los mismos.

## **5.2. Tabulación y gráfico de resultados obtenidos de medición de cambios longitudinales.**

Siguiendo el procedimiento descrito para el monitoreo de expansión y contracción en los especímenes de ensayo presentado en el Capítulo IV sección 4.4.3 se obtuvieron las lecturas de cambio de longitud las cuales son procesadas estadísticamente, a partir de estas lecturas se realizan los cálculos necesarios para obtener los coeficientes de expansión y contracción del concreto presentados a continuación en forma tabular y gráfica.

### **5.2.1. Tabulación de resultados**

El procedimiento realizado en el análisis estadístico de la información obtenida de los ensayos se presenta a continuación:

- ✦ De las tres lecturas de cambio longitudinal realizadas en cada espécimen a las edades correspondientes de 7, 14, 28 y 56 días, se obtiene un promedio para cada edad de ensayo. Las lecturas de cambio longitudinal iniciales y los promedios de las mismas para ambos módulos de ruptura, se muestran en la Tabla 5.1; los promedios de las lecturas de cambio longitudinal realizadas en todas las edades a partir de la Tabla 4.8, se presentan en la Tabla 5.2.

Las lecturas de cambio longitudinal (las cuales se observan con el nombre de “Lectura”) en los especímenes de concreto presentadas en las tablas 5.1 y 5.2 representan el número de divisiones observadas en el deformímetro. Cada unidad de división representa un valor de 0.001 mm (1 milésima de mm), por ejemplo si la lectura en el deformímetro es de 810, esto indica que la diferencia entre la barra de calibración y el espécimen de ensayo es de 810 milésimas de mm (0.81 mm).

**Tabla 5.1: Lecturas de cambio longitudinal iniciales en los especímenes de concreto.**

MR=36 kg/cm <sup>2</sup>			MR=45 kg/cm <sup>2</sup>		
N° de viga	Lectura	Promedio	N° de viga	Lectura	Promedio
1	810	795	1	185	194
	776			227	
	799			170	
2	597	586	2	167	159
	638			149	
	523			161	
3	561	533	3	379	370
	484			364	
	554			367	

**Tabla 5.2: Datos de mediciones de cambio longitudinal.**

		MR=36 kg/cm <sup>2</sup>		MR=45 kg/cm <sup>2</sup>	
Edad de ensayo(días)	N° de espécimen	Lectura inicial	Lectura	Lectura inicial	Lectura
7	N°1	795	846	194	232
	N°2	586	655	159	180
	N°3	533	596	370	417
14	N°1	795	791	194	215
	N°2	586	570	159	161
	N°3	533	540	370	387
28	N°1	795	763	194	165
	N°2	586	547	159	152
	N°3	533	520	370	364

<b>56</b>	N°1	795	749	194	143
	N°2	586	529	159	125
	N°3	533	502	370	347

➤ **Cálculo de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.**

Los cálculos se realizan aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta L_x = \frac{\text{CRD} - \text{CRD inicial}}{G} * 0.001$$

Dónde:

$\Delta L_x$  = longitud de cambio de espécimen a cualquier edad (coeficiente).

CRD = diferencia entre la lectura en el comparador del espécimen y la barra de referencia a cualquier edad (lectura de cambio longitudinal).

CRD<sub>inicial</sub> = diferencia inicial entre la lectura en el comparador del espécimen y la barra de referencia (lectura de cambio longitudinal inicial).

G = longitud de calibración del espécimen (545 mm)

**Para MR=36 kg/cm<sup>2</sup>, a una edad de 7 días.**

Viga N°1

$$\Delta L_x = \frac{846 - 795}{545} * 0.001 = 0.0000936$$

Viga N°2

$$\Delta L_x = \frac{655 - 586}{545} * 0.001 = 0.0001266$$

Viga N°3

$$\Delta L_x = \frac{596 - 533}{545} * 0.001 = 0.0001156$$

Para poder determinar el promedio de estos valores de coeficientes y poder emitir un dato que represente el valor del mismo para cada edad de ensayo, se debe

realizar un análisis estadístico. La Norma ASTM C157 señala que la máxima desviación estándar cuando un resultado de prueba representa la media de tres especímenes debe ser como máximo de 0.000026. Esto se realiza para cada edad de ensayo en ambos módulos de ruptura y se calcula tal como se muestra a continuación:

Desviación estándar para la edad de 7 días:

- Se encuentra la media aritmética de los datos.(m)
- Se calcula la varianza.

$$s_x^2 = \frac{(c_1 - m)^2 + (c_2 - m)^2 + (c_3 - m)^2}{3}$$

- Se calcula la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{s_x^2}$$

**Tabla 5.3 Análisis estadístico de coeficientes de expansión y contracción del concreto.**

<b>Espécimen</b>	<b>Coficiente (c)</b>	<b>Media (m)</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación Estándar</b>
Viga 1	0.0000936	0.0001119	0.0000000005553	0.00002356
Viga 2	0.0001266			
Viga 3	0.0001119			

Entonces, la desviación estándar obtenida para la edad de 7 días es 0.00002356 <0.000026, por lo tanto se cumple con lo especificado en la Norma ASTM C157. De igual manera se realiza el cálculo para las siguientes edades obteniéndose valores menores de 0.000026.

El coeficiente para el módulo de ruptura igual a 36 kg/cm<sup>2</sup>, a la edad de 7 días es:

**Coeficiente:**

$$\Delta L_x = \frac{0.0000936 + 0.0001266 + 0.0001156}{3} = 0.0001119$$

El procedimiento para calcular los coeficientes de expansión o contracción es el mismo para todas las edades de ensayo en ambos módulos de ruptura, la única variable que se debe ir cambiando en correspondencia al dato obtenido en el monitoreo de los especímenes en la fórmula es el CRD. Los resultados completos de los cálculos de los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico, se presentan en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.**

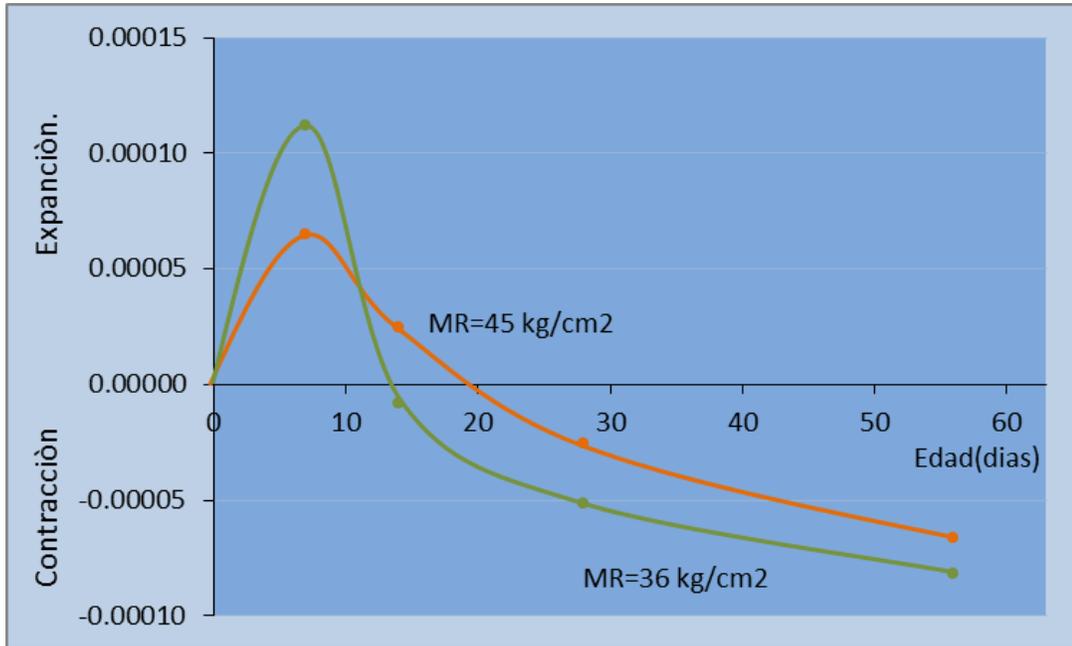
Edad (días)	Coeficientes (MR=36 kg/cm <sup>2</sup> )	Coeficientes (MR=45 kg/cm <sup>2</sup> )
7	0.0001119	0.0000648
14	-0.0000080	0.0000245
28	-0.0000514	-0.0000257
56	-0.0000820	-0.0000661

Los signos negativos que preceden a los coeficientes indican contracciones en los especímenes; mientras que los signos positivos indican expansiones.

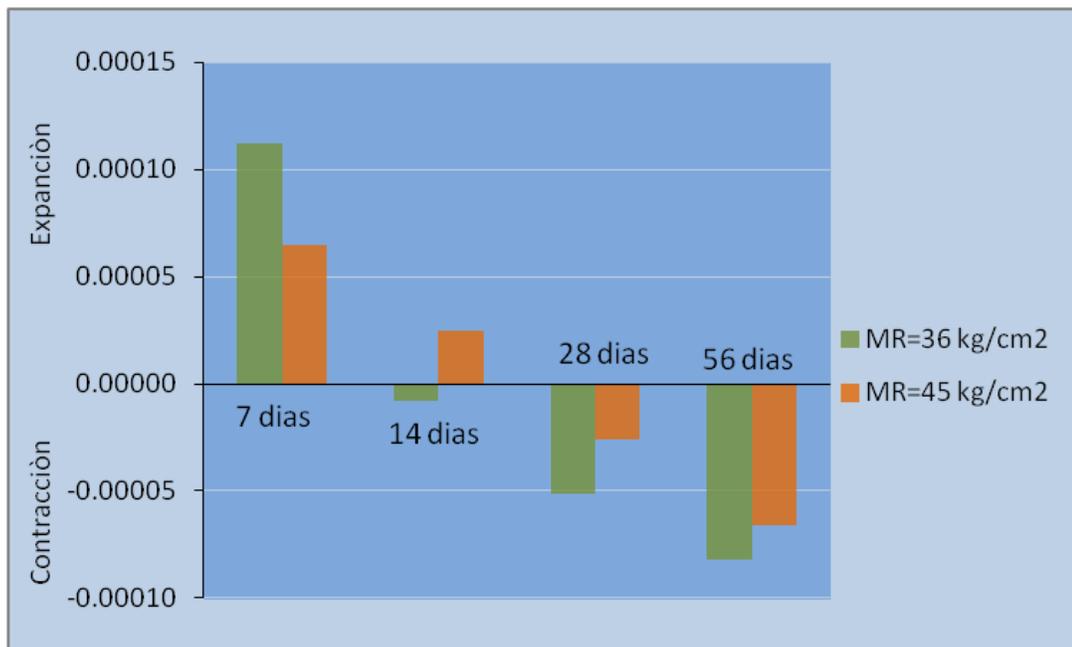
### **5.2.2 Gráficos de resultados obtenidos de coeficientes de cambio longitudinal del concreto.**

Al representar gráficamente los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico presentados en la tabla 5.4, éstos muestran una tendencia específica para cada módulo de ruptura como la que se muestra en el grafico 5.1; en el grafico 5.2 se presenta un análisis comparativo de los coeficientes obtenidos.

**Grafico 5.1 Coeficientes de expansión y contracción del concreto.**



**Grafico 5.2 Comparación de coeficientes de expansión y contracción determinados.**



### **5.3 Análisis correlativos entre variables.**

Tal como se desarrolló en el Capítulo IV sección 4.5 simultáneo al monitoreo de expansión y contracción en los especímenes de concreto se han realizado ensayos de resistencia a la flexión, compresión, y velocidad de pulso a través del concreto (Modulo de elasticidad dinámico) a partir del cual se han calculado los módulos de elasticidad estáticos; además se han calculado estos módulos utilizando formulas propuestas por ACI y AASHTO, para ambos módulos de ruptura.

A partir de estos ensayos se obtienen resultados que constituyen variables en este estudio, los cuales son analizados realizando correlaciones entre éstos y los coeficientes de expansión y contracción del concreto.

#### **5.3.1 Análisis correlativo entre coeficientes y resistencia a la compresión del concreto.**

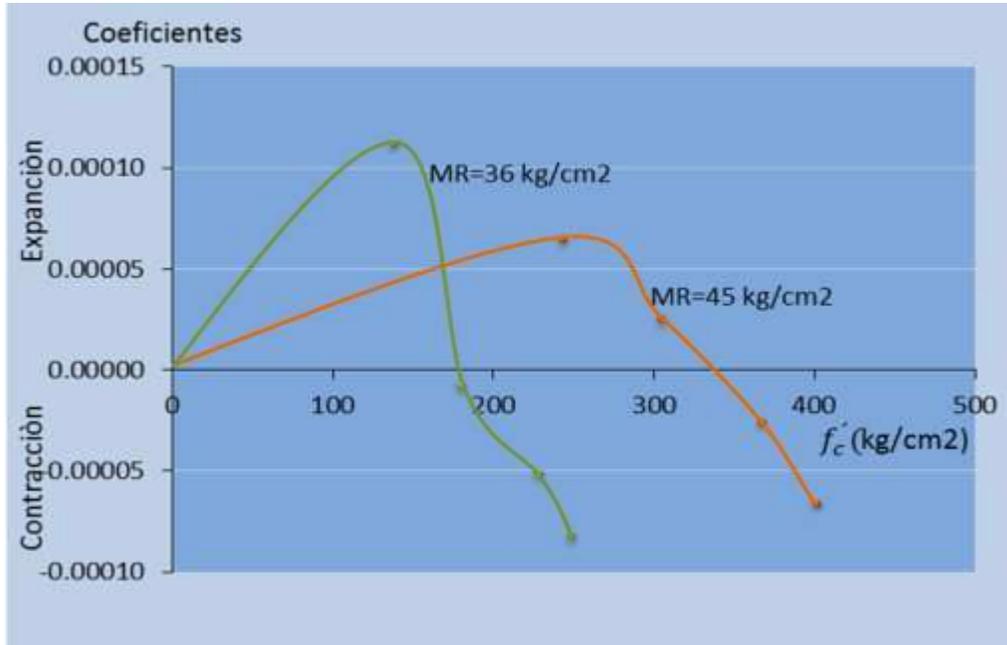
En el grafico 5.3 se presenta el análisis correlativo entre los coeficientes de expansión y contracción del concreto y los resultados de resistencia a la compresión obtenidos experimentalmente. En este gráfico se puede observar el comportamiento que desarrolla el fenómeno de expansión y contracción de los especímenes respecto a la variación de la resistencia a la compresión conforme el concreto va ganando edad.

#### **5.3.2 Análisis correlativo entre coeficientes y módulo de elasticidad dinámico del concreto.**

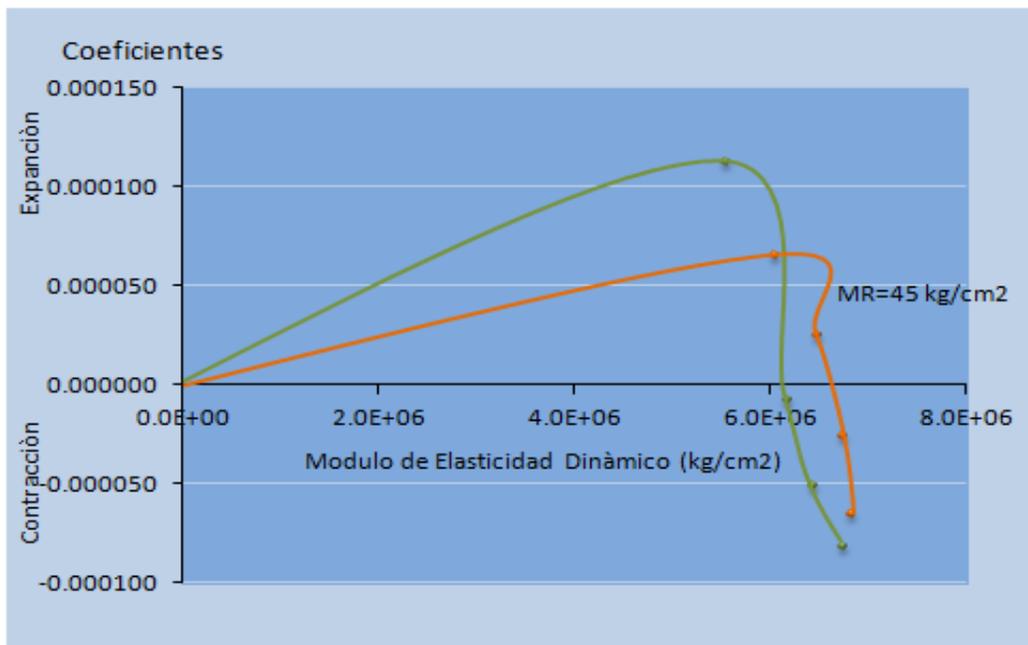
En el grafico 5.4 se presenta el análisis correlativo entre los coeficientes de expansión y contracción del concreto y los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico del concreto, obtenidos a través del ensayo de pulso ultrasónico.

**Nota:** para ambas gráficas los cuatro puntos que definen cada curva, corresponden a las edades de ensayo de 7, 14, 28 y 56 días.

**Grafico 5.3 Correlación entre coeficientes y resistencia a la compresión del concreto.**



**Grafico 5.4 Correlación entre coeficientes y módulos de elasticidad dinámicos del concreto.**



### 5.3.3 Análisis correlativo entre coeficientes y módulo de elasticidad estático del concreto.

Para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto a partir de los resultados obtenidos del ensayo de pulso ultrasónico se realizaron interpolaciones de valores obtenidos de la tabla 5.5, la cual relaciona los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos con la velocidad de onda del pulso ultrasónico. En la tabla 5.6 se presentan los resultados de la interpolación realizada para obtener los módulos de elasticidad estáticos del concreto.

**NOTA:** En el anexo 5 se presenta la tabla de relación empírica entre el módulo de elasticidad estático, módulo de elasticidad dinámico y velocidad de pulso del concreto hidráulico; en el anexo 6 se presenta la curva de relación entre velocidad de pulso con el módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto.

En el gráfico 5.5 se presenta el análisis correlativo entre los coeficientes de expansión y contracción del concreto y los resultados obtenidos de módulo de elasticidad estático del concreto, estimados a partir de la velocidad de onda obtenida del ensayo de pulso ultrasónico. En los gráficos 5.6 y 5.7 se presentan los valores obtenidos para módulos de elasticidad estáticos y los calculados aplicando fórmulas propuestas por ACI y AASHTO, para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  y  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente.

- En el caso de ACI la fórmula utilizada es la siguiente:

$$E = W^{1.5} * 0.14\sqrt{f'_c} \quad (\text{en kg/cm}^2)$$

E: Módulo de elasticidad estático.

W: Densidad del concreto.

$f'_c$  : Resistencia a la compresión del concreto.

- En el caso de AASHTO, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$E = 6750 * MR \quad (\text{en kg/cm}^2)$$

E: Módulo de elasticidad estático del concreto.

MR: Módulo de ruptura del concreto.

**Tabla 5.5 Relación empírica entre módulo estático, dinámico y velocidad de pulso ultrasónico en el concreto.**

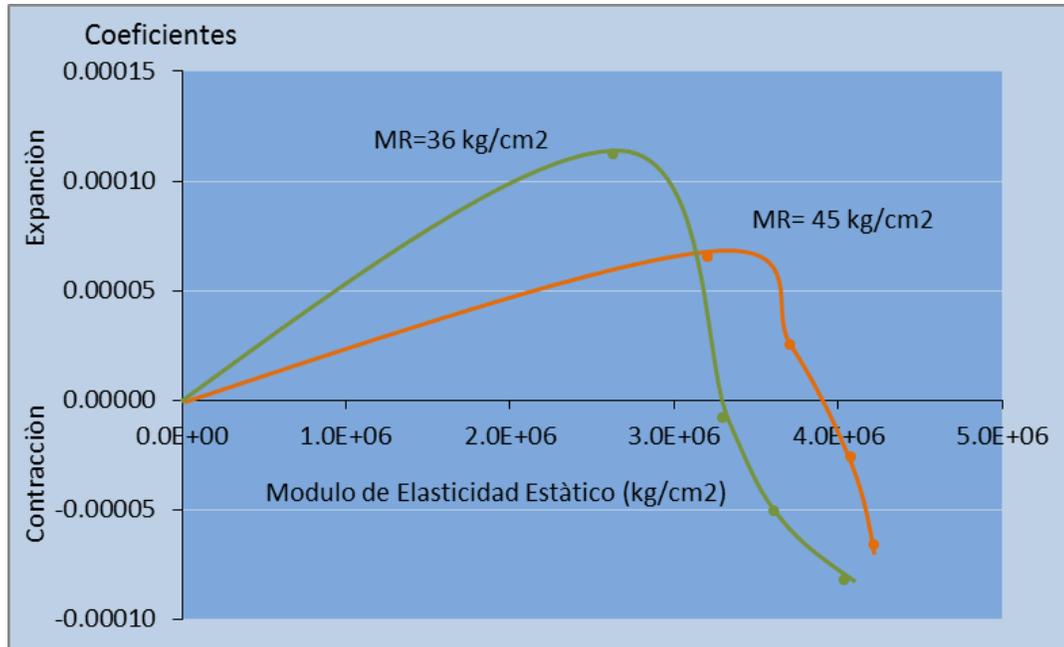
Velocidad de pulso (ft/s)	Módulo de elasticidad	
	Dinámico (psi)	Estático (psi)
11808	3.38*10 <sup>6</sup>	1.89*10 <sup>6</sup>
12464	3.77*10 <sup>6</sup>	2.18*10 <sup>6</sup>
13120	4.21*10 <sup>6</sup>	2.61*10 <sup>6</sup>
13776	4.64*10 <sup>6</sup>	3.19*10 <sup>6</sup>
14432	5.22*10 <sup>6</sup>	3.92*10 <sup>6</sup>
15088	6.09*10 <sup>6</sup>	4.93*10 <sup>6</sup>
15744	7.11*10 <sup>6</sup>	6.24*10 <sup>6</sup>
16400	8.41*10 <sup>6</sup>	7.54*10 <sup>6</sup>

Fuente: Manual de "The V-Meter MK II, James Instrument INC", Testing Concrete, Párrafo 6.13, pag. 51 (Pulso Ultrasónico)

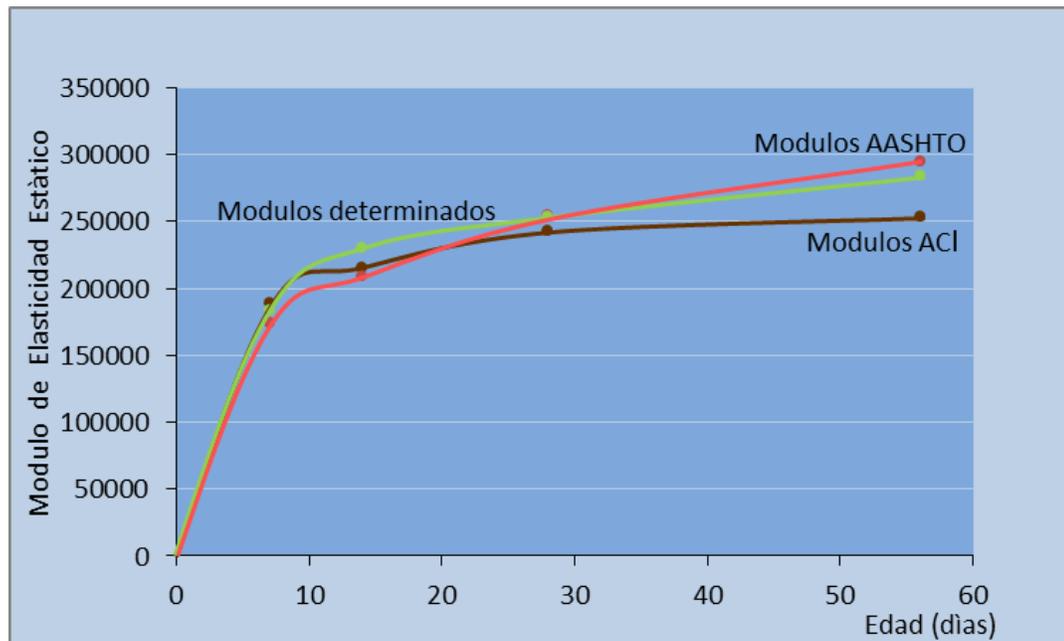
**Tabla 5.6 Módulos de elasticidad estáticos del concreto, determinados por interpolación.**

Módulo de ruptura	Edad (días)	Velocidad de pulso ultrasónico (ft/s)	Módulo de elasticidad estático. (psi)
MR= 36 kg/cm <sup>2</sup>	7	13131.33	2.62*10 <sup>6</sup>
	14	13876.00	3.61*10 <sup>6</sup>
	28	14152.00	2.77 *10 <sup>6</sup>
	56	14507.00	4.04 *10 <sup>6</sup>
MR= 45 kg/cm <sup>2</sup>	7	13796.00	3.21 *10 <sup>6</sup>
	14	14246.33	3.71 *10 <sup>6</sup>
	28	14535.00	4.08 *10 <sup>6</sup>
	56	14631.00	4.23 *10 <sup>6</sup>

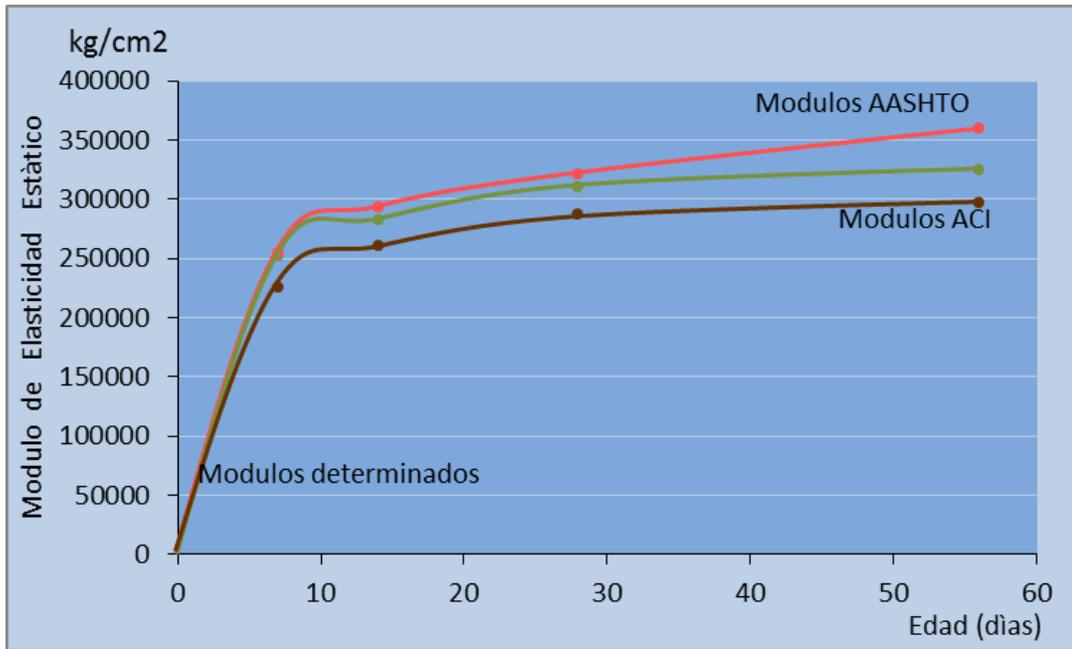
**Grafico 5.5 Correlación entre coeficientes y módulo de elasticidad estático del concreto.**



**Grafico 5.6 Módulos de elasticidad estáticos obtenidos y calculados utilizando formulas propuestas por ACI y AASHTO, para MR=36 kg/cm².**



**Grafico 5.7 Módulos de elasticidad estáticos obtenidos en la investigación y calculados utilizando formulas propuestas por ACI y AASHTO, para MR=45 kg/cm<sup>2</sup>.**



#### 5.4 Tabulación de coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico.

En la tabla 5.7 se presenta la propuesta definitiva de coeficientes de expansión y contracción del concreto.

**Tabla 5.7 Coeficientes definitivos de expansión y contracción del concreto hidráulico.**

Edad (días)	Coeficientes (MR=36 kg/cm <sup>2</sup> )	Coeficientes (MR=45 kg/cm <sup>2</sup> )
7	0.000112	0.000065
14	-0.000008	0.000025
28	-0.000051	-0.000026
56	-0.000082	-0.000066

Los coeficientes de expansión y contracción presentados anteriormente, son representativos de las características descritas a continuación:

- El tamaño máximo nominal del agregado grueso utilizado en la investigación corresponde a  $\frac{3}{4}$  de pulgada.
- Para la elaboración de los especímenes se utilizó consolidación por vibrado externo, utilizando para ello mesa vibratoria con una frecuencia de vibración de 3600 VPM (Vibraciones por minuto), Amplitud 0 - 1.58 mm (Vibración Lineal), durante un periodo de de 30 segundos.
- Los especímenes sometidos a mediciones de cambio longitudinal del concreto han sido almacenados sumergidos en tanques de agua saturada con cal a una temperatura de 25 °C durante los 56 días de monitoreo.
- Las dimensiones de los especímenes sometidos a mediciones son de una sección transversal cuadrada de 100mm y una longitud de 500 mm.
- Se utilizaron tres especímenes de concreto para evaluar el potencial de expansión y contracción en cada edad de prueba y para cada módulo de ruptura.

### **5.5 Análisis e interpretación de resultados obtenidos de medición de cambios longitudinales.**

- Los valores negativos obtenidos de las mediciones de los especímenes, indican contracciones; así mismo los valores positivos indican expansiones de los especímenes de concreto.
- Los especímenes sometidos a mediciones de cambio longitudinal, en un principio sufrieron expansiones debido a la saturación del concreto, puesto que

la expansión (hinchazón) ocurre debido a la combinación del crecimiento de los cristales y absorción de agua producto de estar sumergidos.

- A medida que los especímenes ganaban edad, las expansiones se fueron revertiendo por efecto de las contracciones sufridas por el concreto, obteniéndose finalmente éste tipo de cambio longitudinal. A partir del Gráfico 5.1 y Gráfico 5.2 se puede observar que a 7 días de edad del concreto se presentan expansiones en ambos módulos de ruptura; las cuales representan las mayores expansiones del concreto registradas en el periodo de monitoreo, correspondientes a 111.9 millonésimas para el concreto con  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ , y 64.8 millonésimas para el concreto con  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$ ; pero a 14 días la mezcla que contiene menor cantidad de cemento ( $MR= 36 \text{ kg/cm}^2$ ), ya no presenta expansiones como la mezcla correspondiente a  $MR= 45 \text{ kg/cm}^2$ , sino; aunque pequeñas, ésta mezcla ya presenta contracciones. Si se sigue observando el gráfico 5.1 se podrá notar como de 28 días a 56 días ambos módulos de ruptura presentan la misma tendencia, registrando que las mayores contracciones del concreto corresponden a 82 millonésimas para el concreto con  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  y 66 millonésimas para el concreto  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$ ; ambas contracciones a la edad de 56 días, y como era de esperarse a mayor relación agua cemento (A/C) las contracciones en el concreto son mayores.
- Si se observa el Gráfico 5.3 el cual muestra la relación entre el comportamiento que desarrolla el fenómeno de expansión y contracción de los especímenes respecto a la variación de la resistencia a la compresión conforme el concreto va ganando edad, se podrá notar que para  $MR= 36 \text{ kg/cm}^2$  la mayor expansión registrada (0.000112) corresponde a una resistencia a la compresión de 138.44  $\text{kg/cm}^2$ ; mientras que para  $MR= 45 \text{ kg/cm}^2$  la mayor expansión registrada (0.000065) corresponde a una resistencia a la compresión de 243.84  $\text{kg/cm}^2$ .

También se observa que para  $MR= 36 \text{ kg/cm}^2$  la mayor contracción registrada (-0.000082) corresponde a una resistencia a la compresión de  $248.9 \text{ kg/cm}^2$ ; mientras que para  $MR= 45 \text{ kg/cm}^2$  la mayor contracción registrada (-0.000066) corresponde a una resistencia a la compresión de  $401.5 \text{ kg/cm}^2$ .

- Del análisis correlativo entre los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico y los módulos de elasticidad dinámicos, se puede observar que la mayor expansión registrada (0.000112) para  $MR= 36 \text{ kg/cm}^2$ , ocurre para un módulo de elasticidad dinámico de  $5540000 \text{ kg/cm}^2$ ; mientras que para  $MR= 45 \text{ kg/cm}^2$  la mayor expansión registrada (0.000065), ocurre para un módulo de elasticidad dinámico de  $6040000 \text{ kg/cm}^2$ .
- Del análisis correlativo entre los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico y los módulos de elasticidad dinámicos, se puede observar que la mayor contracción registrada (-0.000082) para  $MR= 36 \text{ kg/cm}^2$ , ocurre para un módulo de elasticidad de  $6750000 \text{ kg/cm}^2$ ; mientras que para  $MR= 45 \text{ kg/cm}^2$  la mayor contracción registrada (-0.000066) ocurre para un módulo de elasticidad de  $6840000 \text{ kg/cm}^2$ .
- A partir del grafico 5.6 se puede observar como los módulos estáticos determinados a partir de la velocidad de pulso presentada por el concreto durante el ensayo de pulso ultrasónico muestran la misma tendencia y se encuentran dentro del rango que muestran los calculados utilizando las formulas propuestas por ACI y AASHTO.

**CAPITULO VI:**  
**APLICACIONES PRÁCTICAS DE**  
**LOS COEFICIENTES DE**  
**EXPANSION Y CONTRACCION DEL**  
**CONCRETO HIDRAULICO.**

## 6.1 Introducción.

La mayor parte de la contracción del concreto ocurre a muy temprana edad en la vida del pavimento provocado principalmente por cambios de temperatura. Como es normal, el calor de hidratación y temperatura del concreto alcanza su valor máximo muy poco tiempo después de su colocación y una vez alcanzado su valor máximo, la temperatura del concreto baja debido a la reducción de la actividad de hidratación y también debido al efecto de la baja temperatura ambiente durante la primera noche del pavimento. Otro factor que contribuye es la reducción de volumen a causa de la pérdida de agua en la mezcla durante la consolidación y el fraguado, pues la mayor parte del agua en exceso sangra a la superficie y se evapora provocando que con la pérdida de agua el concreto ocupe menos volumen, posteriormente, cuando el concreto se endurece se origina la evaporación del volumen total de este líquido.

La fricción de la subrasante ó terreno de apoyo se resiste a la contracción del pavimento por lo que éste presenta en su interior algunos esfuerzos de tensión, los cuáles de no ser considerados pueden provocar fisuras y grietas aleatorias en las losas de concreto; las cuales no se pueden prever completamente, pero pueden ser controladas y minimizadas debilitando la resistencia del concreto en una línea continua, haciendo un corte con una profundidad específica. Por lo tanto, en los pavimentos de concreto y en pisos industriales uno de los aspectos a considerar es la construcción de juntas, ya que éstas permiten los movimientos de la losa, controlando las grietas longitudinales y transversales surgidas de los efectos combinados de la contracción del concreto, causados por los cambios de temperatura, humedad y la fricción entre la losa y la base.

El presente capítulo describe el procedimiento para realizar el diseño del espesor de las juntas en pavimentos rígidos y pisos industriales, mediante la aplicación de las características de expansión térmica de los agregados y las de contracción del concreto hidráulico, las cuales están representadas mediante los coeficientes de expansión térmica y coeficientes de contracción del concreto.

## 6.2 Aplicaciones prácticas del uso de los coeficientes de expansión y contracción del concreto.

El movimiento de las losas depende de las características de contracción del concreto; las juntas le permiten al concreto un ligero movimiento, esto genera reducción en los esfuerzos por restricción, evitando de ésta manera el agrietamiento. Sin embargo, un gran espaciamiento de las juntas induce grietas de mayor espesor para la transferencia de cargas, decreciendo la eficiencia en la transferencia de las mismas por medio de la trabazón de los agregados.

La función principal de las juntas es permitir los movimientos de la losa, mantener la transferencia de cargas deseables, dividir el pavimento en tramos lógicos para la construcción y proveer una caja para el material de sello; por lo tanto requieren de un sellado y de un posterior mantenimiento para controlar el despostillamiento en los bordes, infiltración de agua y de finos; factores que al no controlarlos generan efectos desastrosos en el pavimento disminuyendo la vida útil del mismo. Por lo que la planeación para el diseño y colocación de juntas de concreto es muy importante, proponiendo el tipo, número, ubicación y espaciamiento de las mismas, ya que de esta manera se logra una mejor estimación en los costos y reducción de errores durante la construcción.

Para estimar la abertura de las juntas de contracción se utiliza la ecuación presentada a continuación, la cual estima el ancho de la grieta inducida que garantice satisfactoriamente la transferencia de cargas a través de la trabazón de los agregados en las losas de concreto:

$$\Delta L = CL(\alpha \Delta T + \epsilon)$$

Dónde:

$\Delta L$ : Abertura de la grieta que debe inducirse por medio de la junta, en base a la contracción del concreto y el cambio de temperatura.

C: Coeficiente de fricción 0.65 para bases estabilizadas y 0.80 para bases granulares.

L: Longitud de la losa en mm o en pulgadas.

$\alpha$ : Coeficiente de expansión térmica del concreto, basado en el tipo de agregado.

$\epsilon$ : Coeficiente de contracción del concreto.

$\Delta T$ : Gradiente térmico. Máxima variación de temperatura esperada en el concreto en °C o en °F.

En esta estimación, se debe considerar los factores de seguridad para incluir las diferencias entre los movimientos estimados y los reales.

En las juntas longitudinales casi no se produce movimiento, dejando sin efecto ésta ecuación, por lo que puede que no necesiten la misma cantidad de sello que se obtiene con base en el movimiento calculado. Pero su sellado es de vital importancia ya que a menudo son perpendiculares a la pendiente del drenaje, permitiendo una significativa entrada de agua.

### **6.3 Ejemplos prácticos del uso de los coeficientes de expansión y contracción del concreto.**

Los coeficientes de contracción y expansión térmica del concreto hidráulico tienen su aplicabilidad principalmente, en el diseño de cajas de reservorio para juntas y materiales sellantes para pavimentos y pisos industriales, siendo de vital importancia el uso de los coeficientes de contracción idóneos para cada diseño. Se debe considerar que el sellador tenga la capacidad de acomodarse a los movimientos de apertura y cierre de la junta, ocasionados por los cambios en la temperatura ambiente.

Como parte de las aplicaciones prácticas de los coeficientes serán desarrollados cuatro escenarios comparativos, los cuales se detallan a continuación:

1<sup>er</sup> Escenario: cálculos para MR= 36 kg/cm<sup>2</sup> utilizando coeficientes de expansión térmica del concreto y coeficiente de contracción del concreto propuestos por AASHTO.

2<sup>do</sup> Escenario: cálculos para MR= 45 kg/cm<sup>2</sup> utilizando coeficientes de expansión térmica del concreto y coeficiente de contracción del concreto propuestos por AASHTO.

3<sup>er</sup> Escenario: cálculos para MR= 36 kg/cm<sup>2</sup> utilizando coeficientes de expansión térmica del concreto y coeficiente de contracción del concreto determinados en El Salvador.

4<sup>to</sup> Escenario: cálculos para MR= 45 kg/cm<sup>2</sup> utilizando coeficientes de expansión térmica del concreto y coeficiente de contracción del concreto determinados en El Salvador.

#### **Coeficientes a utilizar:**

- El coeficiente de contracción del concreto igual a 0.00045 in/in y el de 0.0002 in/in a utilizarse en el 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> escenario respectivamente provienen de la tabla 2.5 Coeficientes de contracción por secado del concreto, estos se han elegido realizando las conversiones necesarias para determinar que coeficiente corresponde a cada modulo de ruptura analizado. El coeficiente de expansión térmica del concreto igual a 0.000006 in/in/°F correspondiente al agregado tipo grava a utilizarse en el 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> escenario se ha tomado de la Tabla 2.6 Coeficiente de expansión térmica del concreto basado en el tipo de agregado (basado en el agregado fino y grueso) .Es importante mencionar que se ha utilizado un mismo coeficiente de expansión térmica del concreto para ambos escenario (1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> escenario) ya que dicho coeficiente depende especialmente del tipo de agregado utilizado en la mezcla de concreto y no de los módulos de ruptura. Para el caso del presente estudio el coeficiente de expansión térmica es representativo para los tipos y origen de agregados utilizados en El Salvador.

- El coeficiente de contracción del concreto igual a 0.000051 in/in y el de 0.000026 in/in a utilizarse en el 3<sup>er</sup> y 4<sup>to</sup> escenario respectivamente se ha tomado de la Tabla 5.7 Coeficientes definitivos de expansión y contracción del concreto hidráulico, y el coeficiente de expansión térmica del concreto igual a 0.00000995 in/in/°F y el de 0.00001195 in/in/°F a utilizarse en el 3<sup>er</sup> y 4<sup>to</sup> escenario respectivamente ha sido obtenido de una investigación paralela a la presente, desarrollada por la Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Oriente en colaboración con el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto, con el tema: “Determinación del coeficiente de expansión térmica del concreto hidráulico, para espaciamiento entre juntas en pavimentos de concreto en El Salvador”. A estos coeficientes se les llamará en lo sucesivo determinados en El Salvador.

**NOTA:** en el Anexo 7 se presenta la Tabla de coeficientes de expansión térmica obtenidos de la tesis “Determinación del Coeficiente de Expansión Térmica del Concreto Hidráulico para Espaciamiento entre Juntas en Pavimentos de Concreto en El Salvador”.

### **Características del pavimento a analizar en el diseño de juntas.**

- Tipo de pavimento: Pavimentos de Concreto Hidráulico Simple (JPCP), Sin elementos de transferencia de carga.
- Características de la base: Base estabilizada.
- Ancho de carril: 3.25 metros.
- Tipo de sellante: Silicone.

### **Conceptos básicos:**

- Ancho de grieta inducida (Opening): es la grieta que debe inducirse para garantizar la transferencia de cargas a través de la trabazón de los

agregados, valor de  $\Delta L$  determinado a partir de la ecuación presentada en la sección 6.2.

- Ancho teórico de la caja de reservorio de la junta: el criterio teórico señala que este ancho debe ser como mínimo dos veces el ancho de la grieta inducida.
- Ancho constructivo: éste ancho se recomienda en base a los diámetros de disco de corte que se poseen en la tecnología de corte, ya que podría darse el caso de que en El Salvador no se encuentre el diámetro requerido pero que exista la oportunidad de importarlo desde otro país, por lo que es dependiendo de la embergadura del proyecto que se decide si usar el existente en el mercado local o importar. En los ejemplos desarrollados a continuación se hará la recomendación del ancho técnico en base a los diámetros existentes en El Salvador. Comercialmente en el país el diámetro mínimo de los discos de corte para aserrado de juntas es de 4 mm.

En la figura 6.1 se pueden observar los elementos que se determinan en el diseño de juntas de contracción.

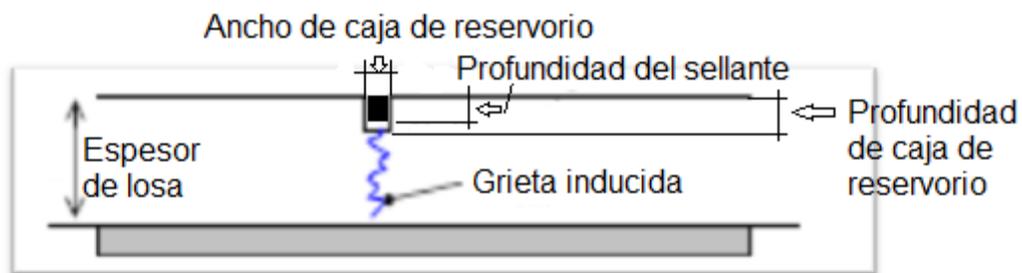


Fig. 6.1 Elementos de junta de contracción.

Paralelo a estos cálculos en los que se utiliza la fórmula presentada en la sección 6.2 en los que se diseñan las cajas de reservorio para juntas se realiza también una simulación de cálculos a través del programa de diseño AASHTOWare Darwin 3.01 (Pavement Design and Analysis System), analizando los mismos escenarios

y variables para cada módulo de ruptura (36 kg/cm<sup>2</sup> y 45 kg/cm<sup>2</sup>). Para realizar el diseño por medio de este software se requiere de la introducción de las características del pavimento señaladas anteriormente y otros datos importantes como por ejemplo los módulos de elasticidad estáticos, se han utilizado los propuestos en la presente investigación determinados a partir de la velocidad de pulso obtenido en el ensayo de pulso ultrasónico, estos son: 2.77 \*10<sup>6</sup> para MR= 36 kg/cm<sup>2</sup> y 4.08 \*10<sup>6</sup> para MR= 45 kg/cm<sup>2</sup> (Tabla 5.6 Módulos de elasticidad estáticos del concreto, determinados por interpolación), la ventaja de utilizar el diseño en el software es que este toma en cuenta el espesor del pavimento en el diseño de juntas generando en el reporte la profundidad del sellante.

**6.3.1 1<sup>er</sup> Escenario: Ejemplos de cálculos para MR=36 kg/cm<sup>2</sup>, utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.**

a) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, utilizando grava como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	6.0*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	46 °F
Coeficiente de contracción del concreto.	0.00045 in/in
Coeficiente de fricción	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.000006 * 46 + 0.00045) = 0.060 \text{ in} = 1.53 \text{ mm}$$

El valor de 1.53 mm es el ancho de la grieta inducida, El ancho teórico de la caja de reservorio de la junta=  $2 \times 1.53 \text{ mm} = 3.06 \text{ mm}$  como mínimo, por lo tanto el ancho constructivo recomendado es de 4 mm.

En el anexo 8.1 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos utilizando el software Darwin 3.01

b) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando grava como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	$6.0 \times 10^{-6} \text{ in/in}/^\circ\text{F}$
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	66.2 °F
Coeficiente de contracción del concreto.	0.00045 in/in
Coeficiente de fricción:	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95 (0.000006 * 66.2 + 0.00045) = 0.070 \text{ in} = 1.79 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.79 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 3.6 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.2 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos utilizando el software Darwin 3.01

c) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando grava como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	6.0*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	66.2 °F
Coeficiente de contracción del concreto:	0.00045 in/in
Coeficiente de fricción:	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 177.17(0.000006 * 66.2 + 0.00045) = 0.098 \text{ in} = 2.48 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida:	2.48 mm
Ancho teórico de caja de reservorio:	4.96 mm
Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio:	5.0 mm

En el anexo 8.3 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos utilizando el software Darwin 3.01.

**6.3.2 2<sup>do</sup> Escenario: Ejemplos de cálculos para MR=45 kg/cm<sup>2</sup>, utilizando datos de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.**

a) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, utilizando grava como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	6.0*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	46 °F
Coeficiente de contracción del concreto.	0.0002 in/in
Coeficiente de fricción	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \varepsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.000006 * 46 + 0.0002) = 0.040 \text{ in} = 1.0 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.0 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 2.0 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.4 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos utilizando el software Darwin 3.01

b) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando grava como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:  $6.0 * (10^{-6} \text{ in/in}) / ^\circ\text{F}$

Rango de temperatura del pavimento de concreto: 66.2 F

Coeficiente de contracción del concreto. 0.00020 in/in

Coeficiente de fricción: 0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \varepsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.000006 * 66.2 + 0.0002) = 0.05 \text{ in} = 1.26 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.26 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 2.52 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.5 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos del software Darwin 3.01.

c) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando grava como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	6.0*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	66.2 °F
Coeficiente de contracción del concreto.	0.00020 in/in
Coeficiente de fricción	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 177.165(0.000006 * 66.2 + 0.0002) = 0.069 \text{ in} = 1.75 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.75 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 3.5 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.6 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos utilizando el software Darwin 3.01.

**6.3.3 3<sup>er</sup> Escenario: Ejemplos de cálculos para MR=36 kg/cm<sup>2</sup>, utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.**

Los agregados a partir de los cuales se ha determinado el coeficiente de expansión térmica son provenientes de la cantera “La pedrera” en la Zona Oriental, éste agregado presenta características similares al agregado proveniente del plantel Comalapa utilizado en la determinación del coeficiente de contracción del concreto.

a) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, utilizando basálticos andecíticos como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:  $9.95 \cdot (10^{-6} \text{ in/in})/^\circ\text{F}$

Rango de temperatura del pavimento de concreto: 46 °F

Coeficiente de contracción del concreto. 0.000051 in/in

Coeficiente de fricción 0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.00000995 * 46 + 0.000051) = 0.042\text{in} = 1.07 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.07 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 2.14 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.7 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos utilizando el software Darwin 3.01.

b) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:  $9.95 \cdot (10^{-6} \text{ in/in})/^\circ\text{F}$

Rango de temperatura del pavimento de concreto: 66.2 °F

Coeficiente de contracción del concreto. 0.000051 in/in

Coeficiente de fricción 0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.00000995 * 66.2 + 0.000051) = 0.06 \text{ in} = 1.50 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.5 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 3.0 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.8 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos del software Darwin 3.01

c) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:  $9.95 \cdot (10^{-6} \text{ in/in})/^\circ\text{F}$

Rango de temperatura del pavimento de concreto: 66.2 °F

Coeficiente de contracción del concreto. 0.000051 in/in

Coeficiente de fricción 0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 177.17(0.00000995 * 66.2 + 0.000051) = 0.082 \text{ in} = 2.08 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 2.08 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 4.14 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 5.0 mm

En el anexo 8.9 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos del software Darwin 3.01

**6.3.4 4<sup>to</sup> Escenario: Ejemplos de cálculos para MR=45 kg/cm<sup>2</sup>, utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.**

- a) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	11.95*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	46 °F
Coeficiente de contracción del concreto.	0.000026 in/in
Coeficiente de fricción	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.000001195 * 46 + 0.000026) = 0.048 \text{ in} = 1.22 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.22 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 2.44 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.10 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos del software Darwin 3.01

- b) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	11.95*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	66.2 °F

Coeficiente de contracción del concreto.	0.000026 in/in
Coeficiente de fricción	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 127.95(0.000001195 * 66.2 + 0.000026) = 0.068\text{in} = 1.7\text{mm}$$

Ancho de grieta inducida: 1.7 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 3.4 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 4.0 mm

En el anexo 8.11 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos del software Darwin 3.01

c) Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado y una base estabilizada para el pavimento.

**Datos:**

Coeficiente de contracción térmica:	11.95*(10 <sup>-6</sup> in/in)/°F
Rango de temperatura del pavimento de concreto:	66.2 °F
Coeficiente de contracción del concreto.	0.000026 in/in
Coeficiente de fricción	0.65

**Cálculo:**

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon)$$

$$\Delta L = 0.65 * 177.17(0.000001195 * 66.2 + 0.000051) = 0.094 \text{ pulg.} = 2.4 \text{ mm}$$

Ancho de grieta inducida: 2.4 mm

Ancho teórico de caja de reservorio: 4.8 mm

Ancho constructivo recomendado de caja de reservorio: 5.0 mm

En el anexo 8.12 se presentan los resultados para este mismo escenario obtenidos del software Darwin 3.01

#### **6.4 Comparaciones entre ejemplos prácticos.**

A continuación se presentan las comparaciones de anchos de grietas inducidas calculadas en cada ejemplo realizado en la sección 6.2. Para ello se han realizado gráficos que comparan los anchos de grietas inducidas de acuerdo a variables como: módulos de ruptura, dimensiones de losas, gradientes de temperatura, coeficientes térmicos y de contracción del concreto sugeridos por AASHTO y determinados en El Salvador.

##### **6.4.1 Análisis para el 1<sup>er</sup> escenario.**

- En el gráfico 6.1 se realiza la comparación entre el ejemplo a) y el ejemplo b) desarrollados en el 1<sup>er</sup> escenario sección 6.2.1.

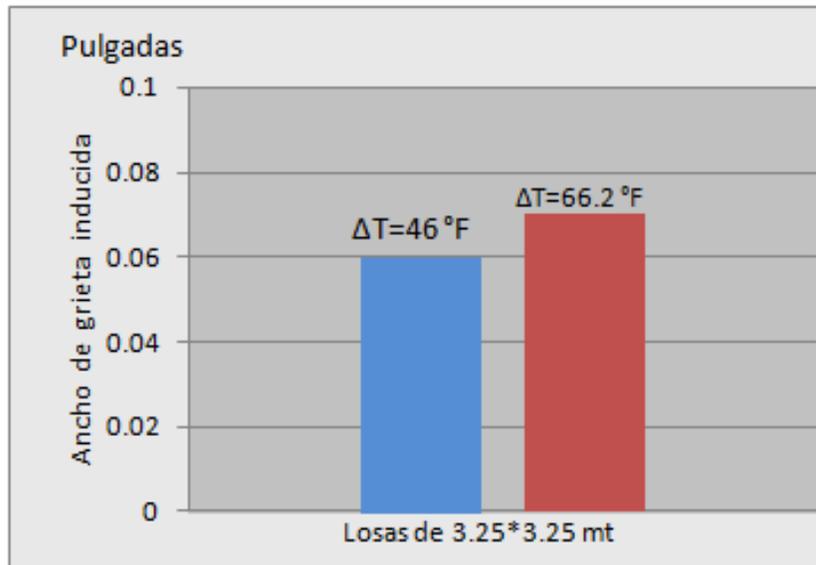
Si se realiza una comparación entre los valores de anchos de grietas inducidas para dos losas de concreto cuadradas de dimensiones de 3.25 x 3.25 metros cada una, en el cual la primera experimenta un gradiente térmico de 46 °F y la segunda un gradiente térmico de 66.2 °F (Ver gráfico 6.1), se puede observar que a mayores gradientes de temperatura el concreto sufre mayores expansiones y por lo tanto requiere de un ancho de grieta inducida mayor para controlar el agrietamiento pero garantizando la transferencia de carga mediante la trabazón de los agregados.

- En el gráfico 6.2 se realiza la comparación entre el ejemplo b) y el ejemplo c) desarrollados en el 1<sup>er</sup> escenario sección 6.2.1.

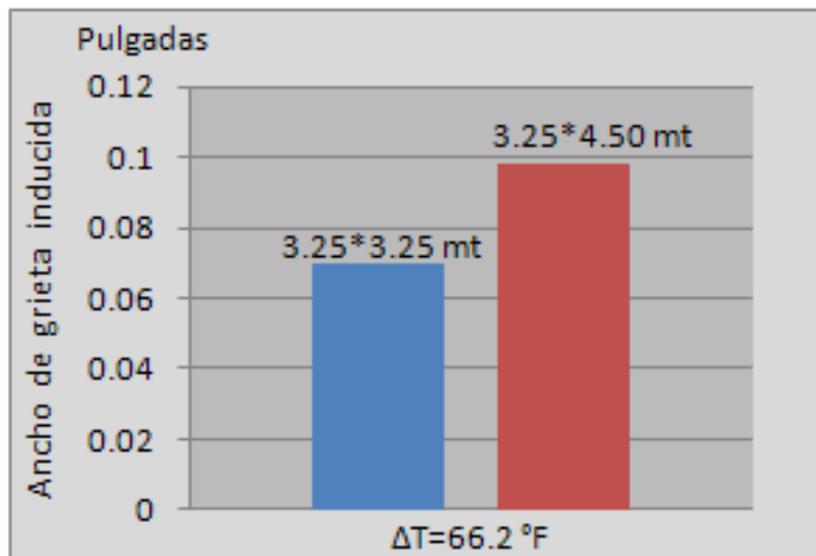
Si se realiza una comparación entre los valores de anchos de grietas inducidas para dos losas de concreto cuadradas de dimensiones diferentes de 3.25 x 3.25 metros la primera y 3.25 x 4.5 metros la segunda, manteniendo constante el gradiente térmico con un valor 66.2 °F (Ver gráfico 6.2), se puede observar que

experimentando ambas un mismo gradiente térmico el ancho de grieta inducida es mayor al utilizar losas más largas, pues a mayor longitud las losas de concreto experimentan mayores contracciones debido a que se generan mayores esfuerzos de tensión.

**Gráfico 6.1 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 y diferentes gradientes de temperatura, para concreto con MR=36 kg/cm<sup>2</sup>.**



**Gráfico 6.2 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y 3.25\*4.50 mts y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=36 kg/cm<sup>2</sup>.**



#### 6.4.2 Análisis para el 2<sup>do</sup> escenario.

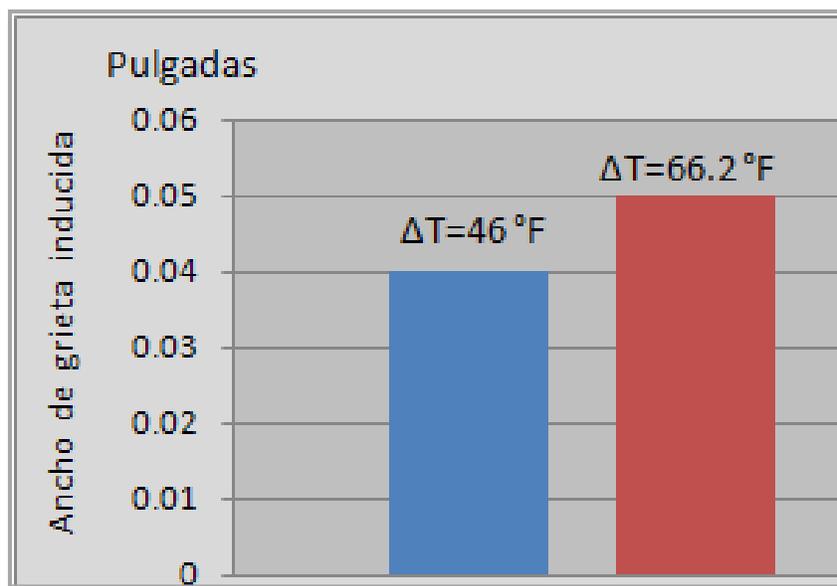
- En el gráfico 6.3 se realiza la comparación entre el ejemplo a) y el ejemplo b) desarrollados en el 2<sup>do</sup> escenario sección 6.2.2.

De acuerdo al gráfico 6.3 se puede observar que se conserva la misma tendencia presentada por el gráfico 6.1, para mayores gradientes de temperatura se requieren mayores anchos de grietas inducidas.

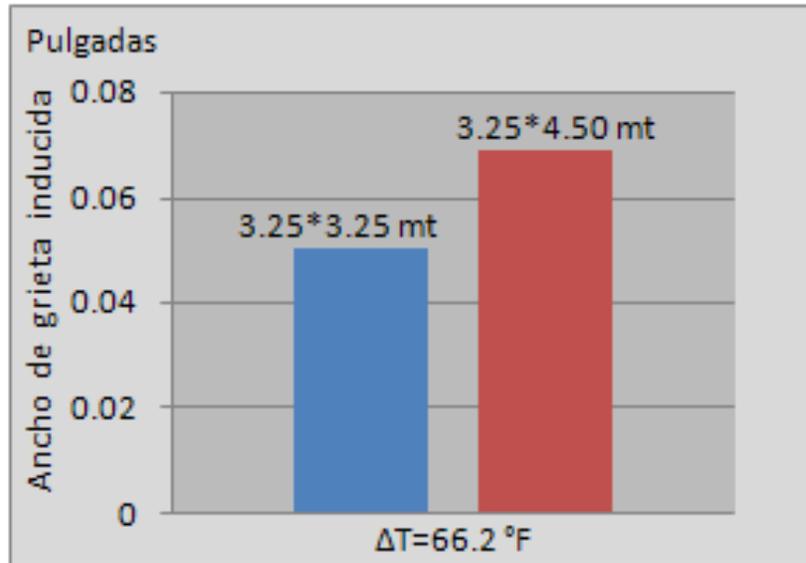
- En el gráfico 6.4 se realiza la comparación entre el ejemplo b) y el ejemplo c) desarrollados en el 2<sup>do</sup> escenario sección 6.2.2.

Si se compara el gráfico 6.4 se puede observar que sigue el mismo comportamiento que el gráfico 6.2, es decir que las losas con mayores longitudes requieren de mayores anchos de grietas inducidas para garantizar que se dé una efectiva transferencia de cargas entre las losas.

**Gráfico 6.3 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y diferentes gradientes térmicos, para concreto con MR=45 kg/cm<sup>2</sup>.**



**Gráfico 6.4 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y 3.25\*4.50 mts y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=45 kg/cm<sup>2</sup>.**



#### **6.4.3 Análisis entre 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> escenario.**

➤ Si se comparan éstos escenarios en los que se han utilizado los coeficientes propuestos por AASHTO se puede observar que con respecto a los gráficos 6.1 y 6.3 que son representativos de concreto con MR=36 kg/cm<sup>2</sup> y concreto con MR=45 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, se observa que aunque la tendencia es la misma (a mayores gradientes de temperatura se requieren mayores anchos de grietas inducidas) a mayores módulos de ruptura se requieren menores anchos de grietas inducidas, pues las contracciones son menores (debido a que los coeficientes de contracción del concreto están en función de la resistencia).

➤ Si se compara el gráfico 6.3 y el gráfico 6.4 que son representativos de concreto con MR=36 kg/cm<sup>2</sup> y concreto con MR=45 kg/cm<sup>2</sup>, se observa que aunque la tendencia es la misma (losas con mayores longitudes requieren de mayores anchos de grietas inducidas) a mayores módulos de ruptura se

requieren menores anchos de grietas inducidas, pues las contracciones son menores.

#### 6.4.4 Análisis para el 3<sup>er</sup> escenario.

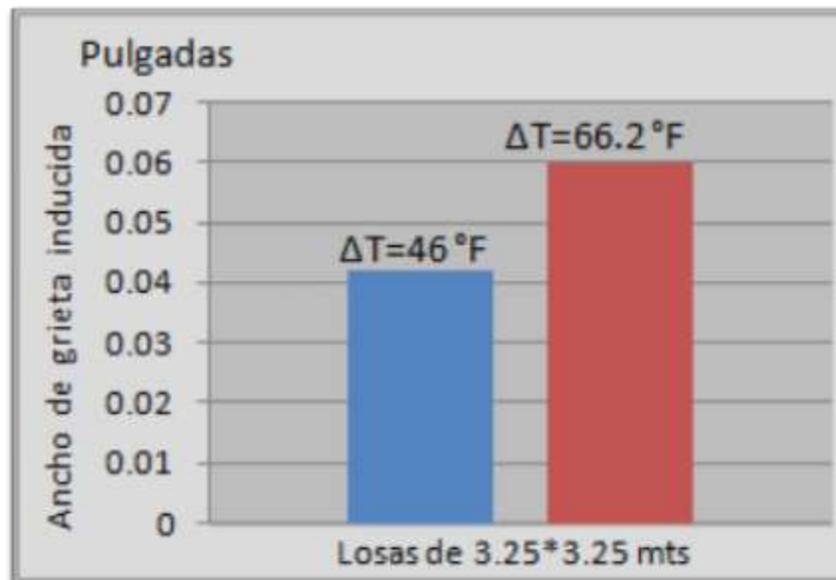
En el tercer escenario se analizan las mismas variables que en el 1<sup>er</sup> escenario, la diferencia radica en que este análisis se ha desarrollado utilizando coeficiente de expansión térmica y contracción del concreto determinados en El Salvador.

- En el gráfico 6.5 se realiza la comparación entre el ejemplo a) y el ejemplo b) desarrollados en el 3<sup>er</sup> escenario sección 6.2.3.

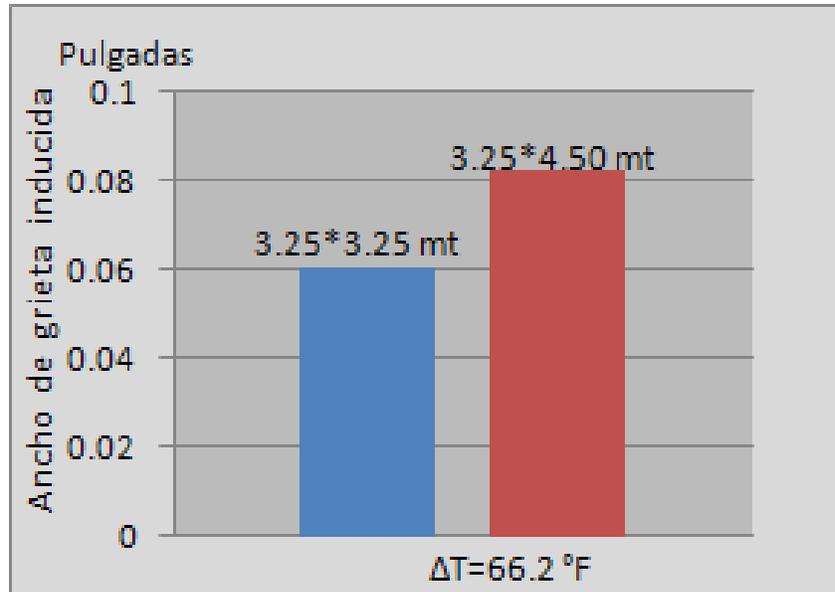
El gráfico 6.5 presenta las mismas tendencias que el gráfico 6.1, es decir que a mayores gradientes de temperatura requieren de mayores anchos de grietas inducidas.

- En el gráfico 6.6 se realiza la comparación entre el ejemplo b) y el ejemplo c) desarrollados en el 4<sup>to</sup> escenario sección 6.2.4. El gráfico 6.6 presenta la misma tendencia que el gráficos 6.2; losas más largas requieren de mayores anchos de grietas inducidas.

**Gráfico 6.5 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=36 kg/cm<sup>2</sup>.**



**Gráfico 6.6 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y 3.25\*4.50 mts y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR=36 kg/cm<sup>2</sup>.**



#### **6.4.5 Análisis para el 4<sup>to</sup> escenario.**

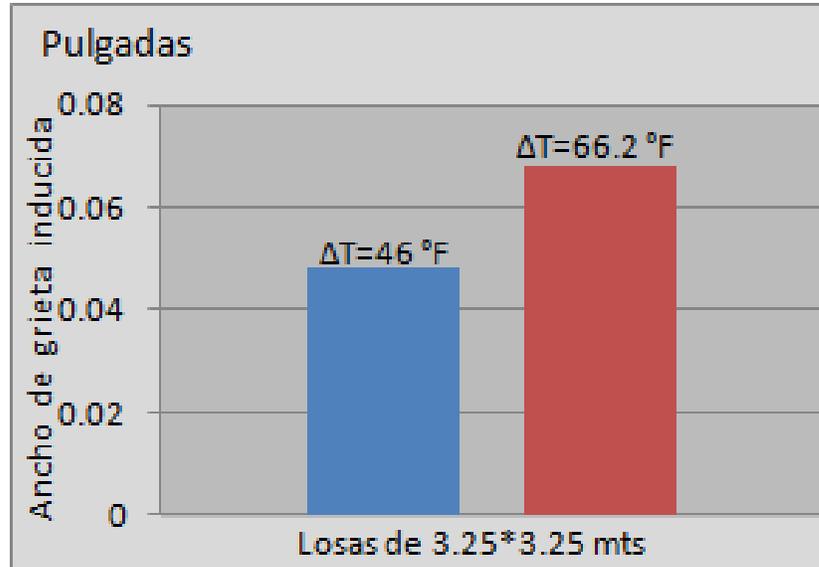
En éste escenario se analizan las mismas variables que en el 2<sup>do</sup> escenario, la diferencia radica en que este análisis se ha desarrollado utilizando coeficientes de expansión térmica y contracción del concreto determinados en El Salvador.

- En el gráfico 6.7 se realiza la comparación entre el ejemplo a) y el ejemplo b) desarrollados en el 4<sup>to</sup> escenario sección 6.2.3.

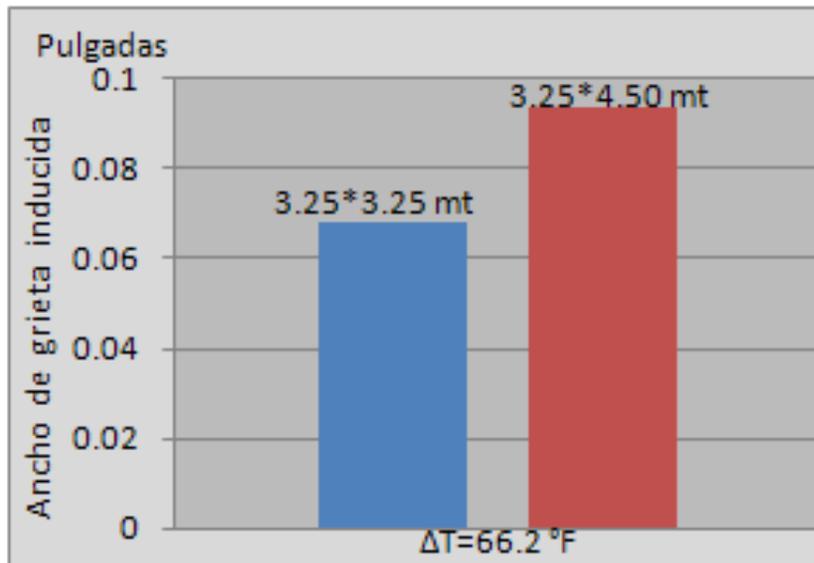
El gráfico 6.7 presenta mismas tendencia que el gráfico 6.3 es decir que a mayores gradientes de temperatura requiere de mayores anchos de grietas inducidas.

- En el gráfico 6.8 se realiza la comparación entre el ejemplo b) y el ejemplo c) desarrollados en el 4<sup>to</sup> escenario sección 6.2.4. El gráfico 6.8 presenta la misma tendencia que el gráfico 6.4; losas más largas requieren de mayores anchos de grietas inducidas.

**Gráfico 6.7 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y diferentes gradientes térmicos, para concreto con MR=45 kg/cm<sup>2</sup>.**



**Grafico 6.8 Resultados para losas de concreto de 3.25\*3.25 mts y 3.25\*4.50 mts y un gradiente térmico de 66.2 °F, para concreto con MR= 45 kg/cm<sup>2</sup>.**



#### **6.4.6 Análisis entre 3<sup>er</sup> y 4<sup>to</sup> escenario.**

Si se comparan éstos escenarios en los que se han utilizado los coeficientes determinados en El Salvador se puede observar que con respecto a los gráficos 6.5 y 6.7 que son representativos de concreto con  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  y  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente, se observa que aunque la tendencia es la misma (a mayores gradientes de temperatura se requieren mayores anchos de grietas inducidas) a mayores módulos de ruptura se requieren mayores anchos de grietas inducidas, pues aunque el coeficiente de contracción es mayor a menor resistencia, en el coeficiente de expansión térmica sucede lo contrario, por lo que el gradiente de temperatura genera una gran influencia.

Si se compara el gráfico 6.6 y el gráfico 6.8 que son representativos de concreto con  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  y concreto con  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente, se observa que aunque la tendencia es la misma (losas con mayores longitudes requieren de mayores anchos de grietas inducidas) a mayores módulos de ruptura se requieren mayores anchos de grietas inducidas.

#### **6.4.7 Análisis entre escenarios.**

Si se comparan los resultados obtenidos entre el 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> escenario, tomando como variable la procedencia de los coeficientes de expansión térmica y contracción del concreto, se podrá notar que los valores para anchos de grietas que son representativos de características de expansión y contracción de materiales determinados en el país, son menores a los anchos de grieta determinados para características de expansión y contracción de materiales propuestos por AASHTO, debido a que los coeficientes de contracción del concreto del país son menores a los propuestos por AASHTO, y aunque las características de expansiones térmicas son levemente mayores predomina el efecto de las contracciones.

Si se comparan los resultados obtenidos entre el 2<sup>do</sup> y 4<sup>to</sup> escenario, tomando como variable la procedencia de los coeficientes de expansión térmica y contracción del concreto, se podrá notar que los valores para anchos de grietas que son representativos de características de expansión térmica y contracción del concreto determinadas en El Salvador son mayores a los anchos de grieta determinados para características de expansión y contracción de materiales propuestos por AASHTO, debido a que el coeficiente de expansión térmica utilizado en 4<sup>to</sup> escenario es casi el doble al propuesto por AASHTO, esto ocurre aunque el coeficiente de contracción del concreto determinado en la presente investigación sea menor al propuesto por AASHTO.

# **CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

## 7.1 CONCLUSIONES.

- Una de las características del concreto en estado fresco es la uniformidad, la cual suele evaluarse realizando pruebas como el revenimiento y peso volumétrico. Con respecto al revenimiento el comité ACI proporciona un revenimiento máximo de 3 pulgadas si el concreto va a ser utilizado en pavimentos, si se revisa la tabla 4.1 se podrá notar que en la investigación realizada se ha cumplido con este requisito. Si se analiza la tabla 4.2 donde se muestran los pesos unitarios del concreto utilizado en el desarrollo de la investigación se podrá notar que los valores de  $2362.59 \text{ kg/m}^3$  para  $\text{MR} = 36 \text{ kg/cm}^2$  y  $2372.69 \text{ kg/m}^3$  para  $\text{MR} = 45 \text{ kg/cm}^2$ , y se toma en cuenta la teoría presentada en el Capítulo II sección 2.3.2 donde se clasifican los agregados de acuerdo a la gravedad específica se tiene que el concreto de peso normal se aproxima a  $2400 \text{ kg/m}^3$ , por lo tanto se concluye que el concreto utilizado en la investigación es de peso normal en ambos módulos de ruptura.
- Para el diseño de mezcla  $\text{MR} = 36 \text{ kg/cm}^2$  el tiempo de fraguado inicia y termina en horas más tempranas después del contacto inicial del agua con el cemento y el periodo que constituye el tiempo de fraguado es más corto; con respecto al diseño de mezcla para  $\text{MR} = 45 \text{ kg/cm}^2$ .
- Las contracciones registradas se aproximan al contexto de contracciones autógenas medidas de acuerdo a la norma ASTM C 157; pues los especímenes de concreto, a pesar de estar en un ambiente saturado internamente sufren contracciones como resultado del fenómeno de la hidratación del cemento.
- El contar con agregados finos y gruesos que cumplan con estándares de calidad y límites de tolerancia, como por ejemplo: gravedad específica y absorción, límites granulométricos, peso unitario, resistencia al desgaste (en

agregados gruesos), etc.; permite realizar diseños de mezcla óptimos. Si se revisa las secciones 2.3.3 y 2.3.4 del Capítulo II se podrá notar la relevancia que tiene el cumplir con estos requisitos en la expansión y contracción del concreto y por ende en el agrietamiento de las losas; por ejemplo cuando son aplicados indiscriminadamente los requerimientos de la Norma ASTM C - 33 se suele incrementar el potencial del agrietamiento no controlado en pavimentos.

- El realizar una adecuada caracterización de agregados permite alcanzar requisitos de resistencia tanto a la flexión como a la compresión en los que la cantidad de cemento tiene influencia importante, pero no la única; puesto que tal como se menciona en el Capítulo II sección 2.3 los agregados juegan un papel de suma importancia en el comportamiento de la mezcla puesto que representan entre el 60% y el 75% del volumen absoluto de todos los componentes, esto fue evidenciado en este estudio ya que antes de realizar el diseño de mezcla, en el Capítulo III se desarrolló lo relacionado a la caracterización de los mismos, realizando ensayos bajo Norma, con cuyos estándares de calidad y límites de tolerancia los agregados utilizados en la investigación cumplieron. Si los agregados no poseen buenas características como las mencionadas anteriormente, la resistencia de la mezcla dependerá en gran magnitud del cemento; si se toma en cuenta que el cemento es el insumo de mayor valor económico el no optimizar su uso vuelve antieconómicas las obras de concreto.
- Si se comparan los coeficientes de expansión y contracción del concreto hidráulico obtenidos para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  con relación  $A/C= 0.61$  y  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  con relación  $A/C=0.48$  mostrados en la Tabla 5.4, se podrá inferir como a menor relación agua cemento y por ende mayor resistencia tanto a flexión como compresión el efecto de contracción se ve revertido en mayor proporción gracias a la expansión que la mezcla presenta a edades tempranas.

- En el diseño de mezcla realizado para ambos módulos de ruptura, se puede concluir en el caso del diseño para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ , que la resistencia a la flexión alcanzada a la edad de 28 días, de  $37.70 \text{ kg/cm}^2$  correspondiente a un 105% de la resistencia de diseño; mientras que para el diseño de mezcla para  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$ , la resistencia a la flexión alcanzada a 28 días de  $47.57 \text{ kg/cm}^2$  corresponde a un 106% de la resistencia buscada; el hecho que en ambos diseños se obtengan valores de resistencia a la flexión levemente mayores a los valores de diseños, se debe a que el método ACI 211.1, permite realizar diseños con ciertos márgenes de seguridad con el fin de asegurar concretos que cumplan satisfactoriamente con las resistencias requeridas.
  
- De acuerdo a las resistencias a la compresión y flexión obtenidas a 28 días en laboratorio, la correlación entre Módulo de ruptura (MR) y la resistencia a la compresión utilizada en el Capítulo 3, sección 3.7 “Diseños de Mezcla” puede ser utilizada con bastante precisión, pues para el diseño  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ , a partir de la resistencia a la compresión del concreto de  $228.25 \text{ kg/cm}^2$  se estima un  $MR=35.5 \text{ kg/cm}^2$ , bastante cercano a  $MR= 37.70 \text{ kg/cm}^2$  obtenido en laboratorio; en el caso del diseño  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  para una resistencia a la compresión de  $367.58 \text{ kg/cm}^2$ , se estima un  $MR=45.06 \text{ kg/cm}^2$ , cercano al  $MR= 47.57 \text{ kg/cm}^2$  obtenido en laboratorio.
  
- El concreto con diseño  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ , experimenta mayores expansiones y contracciones con respecto al concreto con diseño  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  debido a que concretos con mayores relaciones A/C poseen más agua en relación al cemento en la mezcla; al poseer más agua una mezcla de concreto esta ocupa mayor cantidad de poros en el concreto. Esta agua al experimentar el fenómeno de la cristalización tiende a aumentar su volumen provocando una mayor expansión en el concreto y cuando los poros pierden el agua que se encuentra en ellos tienden a ser reducidos por la atracción existente entre las

partículas de cemento, uniéndose más entre ellas y con ello logrando una mayor contracción en el concreto.

- ✦ Como parte de la investigación realizada no se realizaron procedimientos para monitorear las contracciones plásticas en los especímenes de concreto, debido a que no se cuenta con el equipo adecuado para medir la contracción del concreto en estado fresco.
- ✦ Las condiciones de curado empleadas en el almacenamiento de los especímenes, no son representativas de las condiciones de servicio a las que estará expuesto el pavimento o piso industrial; la importancia de la investigación radica en que a través de este estudio normado se contara con un estudio de cambios longitudinales del concreto endurecido bajo condiciones normadas, que puede ser tomado en cuenta en futuras investigaciones que busquen identificar la relación existente entre los valores de contracción determinados de acuerdo a la metodología ASTM C157 frente a la contracción en condiciones reales de la estructura (sin curado bajo agua, ni a una humedad relativa de  $50 \pm 4\%$ ).
- ✦ Los coeficientes de contracción a 28 días propuestos por AASHTO en la guía de diseño para pavimentos son de 0.0006 para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  y 0.0002 para  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$ ; los coeficientes a 28 días determinados en la investigación son de 0.0000514 para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  y 0.0000257 para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ . La diferencia entre los coeficientes AASHTO y los determinados en la investigación radica en que los propuestos por AASHTO son de contracción por secado y los determinados en la investigación son por contracción autógena. Los valores demuestran que la contracción por secado es mayor a la contracción autógena, pues el concreto al estar expuesto a condiciones más adversas sufre mayores contracciones que al estar expuesto a condiciones

más favorables (especímenes sumergidos donde se cuenta con un excelente curado).

- A partir de los cálculos de los módulos de elasticidad estáticos del concreto utilizando formulas propuestas por ACI y AASHTO, se puede concluir que se encuentran en concordancia con los módulos de elasticidad estáticos determinados a través de la velocidad de onda de pulso ultrasónico; por lo tanto se concluye que con cualquiera de los métodos mencionados anteriormente se obtienen valores confiables de módulos de elasticidad estáticos.
- Del análisis correlativo entre coeficientes y módulos de elasticidad estáticos del concreto se concluye que las mayores contracciones y expansiones (diseño MR=36 kg/cm<sup>2</sup>) ocurren para valores de módulos de elasticidad menores, lo que se encuentra en concordancia con el resultado que a mayor relación A/C el concreto tiene menor resistencia y menor modulo de elasticidad pero mayor tendencia a contraerse o expandirse.
- Del análisis correlativo entre coeficientes y resistencia a la compresión se puede observar que a mayor relación A/C menor resistencia del concreto y a menores resistencias mayores expansiones y contracciones.
- De acuerdo al análisis de los anchos de grietas que deben inducirse para garantizar la transferencia de cargas a través de la trabazón de los agregados, se concluye que las losas de concreto con mayor longitud requieren de mayores anchos de grietas, pues las losas de concreto más largas sufren mayores contracciones, generando mayores esfuerzos, los cuales requieren de mayores aberturas de grietas inducidas y de cajas de reservorios de las juntas.
- En el análisis de los anchos de grietas inducidas, a partir de las cuales se estima el ancho de las cajas de reservorio de las juntas; si se analiza como

variable los gradientes de temperaturas que experimentan los concretos a partir del momento en que se coloca el concreto y la máxima temperatura esperada; se concluye que a mayores gradientes de temperatura se requiere de mayores anchos de grietas inducidas, ya que la expansión del concreto es directamente proporcional al incremento de temperatura.

- Al analizar el comportamiento de la contracción y cómo influye en la estimación de los anchos de grietas inducidas, se puede concluir que para un concreto con  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  los anchos de grietas estimados son mayores que para los concretos con  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  pues a mayores resistencias menores contracciones; y las contracciones junto a las expansiones térmicas son los dos factores determinantes de los anchos de grietas inducidas, a partir de las cuales se determina el ancho de la caja de reservorio.
- Al estimar los anchos de grietas inducidas de acuerdo a las características de contracciones y expansiones térmicas del concreto determinadas en el país y compararlas con los anchos determinados bajo características de expansiones térmicas y contracciones del concreto propuestas por AASHTO se puede concluir que para concretos con  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$  se obtienen menores anchos de grietas inducidas para los materiales representativos de las características del país; y para el concreto con  $MR=45 \text{ kg/cm}^2$  se obtienen mayores anchos de grietas inducidas para los materiales con características propuestas por AASHTO; esto es debido a que el comportamiento presentado entre los módulos de ruptura es el siguiente: con respecto a la contracción, a mayores resistencias menores contracciones; con respecto a las características de expansiones térmicas del concreto, a mayores resistencias mayores coeficientes de expansión térmica.
- El concreto a edades tempranas experimenta el fenómeno de expansión, a partir de ello se han determinado los coeficientes de expansión propuestos en

la presente investigación, sin embargo se debe aclarar que los coeficientes de expansión a utilizarse en el diseño de juntas transversales de contracción deben ser provenientes del estudio del comportamiento a tensión del concreto pero debido a expansiones térmicas, por lo que se debe señalar que los coeficientes de expansión que se muestran en la Tabla 5.7 Coeficientes definitivos de expansión y contracción del concreto hidráulico solo indican el comportamiento a tensión que el concreto experimenta en condiciones normales cuya importancia es el disminuir las contracciones que el concreto experimenta.

## **7.2 RECOMENDACIONES.**

- Para realizar diseños de mezcla óptimos es indispensable contar con constitutivos del concreto de calidad, por lo que se recomienda realizar una adecuada caracterización de materiales cumpliendo con estándares de calidad como los que señala la normativa ASTM.
- Es recomendable realizar estudios para concretos almacenados bajo condiciones diferentes a las descritas en la norma ASTM C 157, con el fin de realizar comparaciones y correlaciones entre los coeficientes obtenidos bajo estas condiciones y los coeficientes obtenidos bajo las condiciones normalizadas; pues las condiciones de curado normalizadas difieren en cuanto a las características de curado que experimenta un concreto en condiciones de servicio.
- Al realizar el procedimiento de monitoreo de los cambios longitudinales se debe realizar con mucho cuidado, pues un mínimo golpe entre los tornillos de calibración y los tornillos de ajuste del comparador puede afectar la lectura en el

deformimetro, ya que este al ser un instrumento con un alto grado de precisión también es un instrumento muy sensible.

- Se recomienda que, en estudios posteriores se analicen como variables la influencia de aditivos en las expansiones y contracciones del concreto; pues en la actualidad es cada vez más común el uso de aditivos en los diseños de mezcla.
- Aunque la norma ASTM C157 no especifica el número de veces que se debe realizar el monitoreo de los cambios longitudinales a un mismo espécimen y a una misma edad; es recomendable realizarlo como mínimo tres veces; pues es un procedimiento susceptible a errores de todo tipo debido a que las lecturas tomadas son del orden de las milésimas de milímetro, por lo cual puede ser muy aconsejable contar con datos que corroboren las lecturas de una misma edad.
- Después del colado y acabado de los especímenes de concreto para la medición de los cambios longitudinales es recomendable aflojar los dispositivos sostenedores de los tornillos de calibración con el fin de que no representen una restricción a la contracción plástica del concreto y también para facilitar la remoción de los dispositivos sujetadores al realizar el desmoldaje de los especímenes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería UNAM. Manual de tecnología del concreto. Tomo N° 1 Definición y Requisitos de los Componentes del Concreto. México 1994. Limusa Noriega Editores. Sección 1.0
- Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería UNAM. Manual de tecnología del concreto. Tomo N° 3 Concreto en estado endurecido. México 1994. Limusa Noriega Editores. Págs. 179-219, 343-344
- Practica Estándar Para Seleccionar Proporciones Para Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo.  
ACI 211.1, edición del 97.
- Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos de Concreto.  
Ing. Civil Cipriano A. Londoño N.
- Pavimentos de Concreto para Carreteras  
Vol. 1, editorial IMCYC.
- Diseño de Pavimentos AASHTO-97  
Editorial IBCH.
- Diseño y Construcción de Pavimentos y Pisos de Concreto  
Editada por ACI –PERU, Pág. 37,38 y 39.
- Diseño y Control de Mezclas de Concreto (PCA)  
Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerckhoff  
William C. Panarese, Jussara Tanesi

Primera Edición.

2004 Portland Cement Association.

- Normas ASTM para ensayos de laboratorio.
- Norma Técnica Colombiana Cambio Longitudinal del Mortero y el Concreto de Cemento Hidráulico Endurecido  
NTC 5640 2008-11-26,
- Guía de Usuario AASHTOWare Darwin 3.01 (Pavement Design and Analysis System) Publicada por American Association of State Highway and Transportation Officials, 1997.
- ACI. Guide for Concrete Floor and Slab Construction, ACI 302.IR-96.  
American Concrete Institute, Michigan, E.U. 1992.
- ACI. Design of Slabs on Grade, ACI 360R- 92. American Concrete Institute, Michigan, E.U. 1992.
- Norma ASTM C157:2006. STANDARD TEST METHOD FOR LENGTH CHANGE OF HARDENED HYDRAULIC-CEMENT MORTAR AND CONCRETE Copyright © ASTM International. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19429-2959. United States.
- Tesis Control de Calidad en el Material Sellante para Juntas en Pavimentos de Concreto Hidráulico. Amalia Xiomara Morales Ramírez, Universidad de San Carlos de Guatemala ,2006.
- Tesis Método Constructivo de Losas Cortas en Pavimentos de Concreto Hidráulico. Ing. Luis Rolando Román Ávila, Universidad de San Carlos de Guatemala ,2008

- Manual de "The V-Meter MK II, James Instrument INC", Testing Concrete, Parrafo 6.13, pag. 51 ( Pulso Ultrasónico)
  
- Pavimentos de Concreto Hidráulico  
Ing. Samuel Mora Q.      FIC–UNI ASOCEM
  
- Fundación de la industria de la Construcción. Normas Básicas ASTM para el Control de Calidad del Concreto. 2<sup>da</sup> edición. México D.F. 2007. Resendiz Editores.

# ANEXOS

## ANEXO 1

Norma ASTM Designation: C 157/C 157/M -06 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-CEMENT mortar and Concrete.



Designation: C 157/C 157M - 06

## Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 157/C 157M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

### 1. Scope<sup>2</sup>

1.1 This test method covers the determination of the length changes that are produced by causes other than externally applied forces and temperature changes in hardened hydraulic-cement mortar and concrete specimens made in the laboratory and exposed to controlled conditions of temperature and moisture.

1.2 The values stated in either inch-pound or SI units are to be regarded separately as standard. An exception is with regard to sieve sizes and nominal size of aggregate, in which the SI values are the standard as stated in Specification E 11. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other, without combining values in any way.

1.3 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 143/C 143M Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
- C 172 Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
- C 192/C 192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.08 on Volume Change.

Current edition approved June 1, 2006. Published July 2006. Originally approved in 1980. Last previous edition approved in 2004 as C 157/C 157M - 04.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- C 499 Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
- C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes
- C 596 Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement
- C 1347 Practice for Preparation and Dissolution of Uranium Materials for Analysis
- E 11 Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes
- E 337 Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)

### 3. Terminology

3.1 **Definitions**—The terms used in this test method are defined in Terminology C 125.

3.2 **Definitions of Terms Specific to This Standard:**

3.2.1 **length change,  $n$** —an increase or decrease in the length of a test specimen that has been caused to change by any factor other than externally applied forces and temperature changes.

### 4. Significance and Use

4.1 Measurement of length change permits assessment of the potential for volumetric expansion or contraction of mortar or concrete due to various causes other than applied force or temperature change. This test method is particularly useful for comparative evaluation of this potential in different hydraulic-cement mortar or concrete mixtures.

4.2 This test method provides useful information for experimental purposes or for products that require testing under nonstandard mixing, placing, handling, or curing conditions, such as high product workability or different demolding times. Standard conditions are described in 5.4.1.

4.3 If conditions for mixing, curing, sampling, and storage other than specified in this test method are required, they shall be reported but are not to be considered as standard conditions of this test method. Nonstandard conditions and the reasons for

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

departure from standard conditions shall be reported clearly and prominently with comparator values.

**5. Apparatus**

**5.1 Molds and Length Comparator**—The molds for casting test specimens and the length comparator for measuring length change shall conform to the requirements of Practice C 490.

**5.2 Tamper**—The tamper shall be made of a nonabsorptive, nonabrasive material such as medium-hard rubber or seasoned oak wood rendered nonabsorptive by immersion for 15 min in paraffin at approximately 392 °F [200 °C], and shall have a cross section of ½ by 1.0 in. [13 by 25 mm] and a convenient length of about 6 in. [150 mm]. The tamping face of the tamper shall be flat and at right angles to the length of the tamper.

**5.3 Tamping Rod**—The tamping rod shall be a straight steel rod ¾ in. [10 mm] in diameter and not less than 10 in. [250 mm] in length, having at least the tamping end rounded to a hemispherical tip of the same diameter.

**5.4 Drying Room and Controls**—A drying room with suitable racks shall be provided when storing specimens in air. The racks shall be designed for free circulation of air around specimens, except for necessary supports, and shall be so situated with respect to the nearest wall or other obstruction that air circulation is not restricted in the intervening space. The supports shall be horizontal and shall consist of two nonabsorptive members not deeper than 1 in. [25 mm] and having a bearing area of not more than ¼ in. [6 mm] in width. Conditioned air shall be circulated into and out of the room in a uniform manner so that the specified rate of evaporation is attained adjacent to all specimens.

5.4.1 The air in the room shall be maintained at a temperature of 73 ± 3 °F [23 ± 2 °C] and a relative humidity of 50 ± 4 %. The air movement past all specimens shall be such that the rate of evaporation is 77 ± 30-mL/24 h from an atmometer or 13 ± 5-mL/24 h from a 400-mL Griffin low-form beaker filled to ¾ in. [20 mm] from the top. The temperature and relative humidity of the air in the room shall be measured with either a sling or Assmann psychrometer at least twice each working day. The psychrometer shall comply with Test Method E 337, except that thermometers having an overall length of 10 in. [250 mm] and marked in subdivisions of 0.5 °F [0.25 °C] are permitted. The room shall be equipped with a means of measuring and recording wet- and dry-bulb temperatures continuously. Correction factors as indicated by the sling or Assmann psychrometer shall be applied to the recorded data. The rate of evaporation within the room shall be determined daily by the use of the atmometer or by the loss of mass of water from a 400-mL Griffin low-form beaker filled initially to ¼ in. [20 mm] from the top.

**5.5 Atmometer**—The atmometer shall be constructed as shown in Fig. 1.

**5.5.1 Mounting**—Fig. 2 shows a suggested arrangement for operating the atmometer. Punch a central hole ½ in. [13 mm] in diameter in a filter paper, place it on the atmometer, and secure it in place while dry, by turning the torque handle only,

until it just starts to slip. Mount the atmometer on a stand with the filter paper in a horizontal position. Mount a 100-mL glass graduate so that the 100-mL mark is from 1 to 3 in. [25 to 75 mm] below the level of the filter paper. Stopper the graduate so that entrance is provided for two short glass tubes not extending to the water level and one long tube extending to the bottom of the graduate. Connect the glass tubing leading from the bottom of the graduate to the inlet of the atmometer by means of clear plastic tubing.

**5.5.2 Operation**—Use clear plastic tubing to connect a squeeze bottle containing distilled or deionized water to one of the short glass tubes into the graduate. Force water into the graduate until it is about half full and then close the remaining glass tube into the graduate. Continue to force water through the graduate into the atmometer until the filter paper is saturated and there are no air bubbles in the system. Open the glass tube into the graduate and release pressure on the squeeze bottle gradually to avoid trapping air in the tube leading to the atmometer. Adjust the level of water in the graduate to approximately the 100-mL mark. If the atmometer is to be used under variable temperature conditions, disconnect the squeeze bottle after filling the graduate to avoid the possibility of additional water being forced into the graduate. Permit evaporation of water from the filter paper for 1 h before recording the time and initial reading of the graduate. It is not permitted to omit the waiting period during subsequent use of the atmometer provided the filter paper does not become dry. Change the filter paper whenever it shows signs of contamination but not less frequently than once every two weeks.

**5.6 Filter Paper**—The filter paper to be used with the atmometer shall be white with a smooth surface texture. It shall be 6 in. [152 mm] in diameter and 0.050 ± 0.003 in. [1.27 ± 0.08 mm] thick and shall have a cotton fiber content of not less than 75 weight %. The density shall be between 0.400 and 0.425 g/cm<sup>3</sup>. The Mullen bursting strength shall not be less than 50 psi [345 kPa].

*Note.* 1—E and D filter paper No. 625<sup>1</sup> has been found suitable.

**5.7 Apparatus for Demolding Specimens**—It is useful to construct an apparatus for demolding specimens molded in double molds as detailed in Fig. 3 or to a different design that serves the same purpose. When this device is to be used, the center side plate of the double mold must be appropriately drilled and tapped to receive the 8-32 by ½ in. [4.5-0.74 IMC by 16 mm] machine screw of the demolding thumbscrew. Fig. 4 shows the details of a suitable apparatus for demolding specimens molded in single molds.

<sup>1</sup> The sole source of supply of the apparatus known to the committee at this time is Haco-Dikman Co., Mt. Holly Springs, PA 17065. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend.

C 157/C 157M - 06

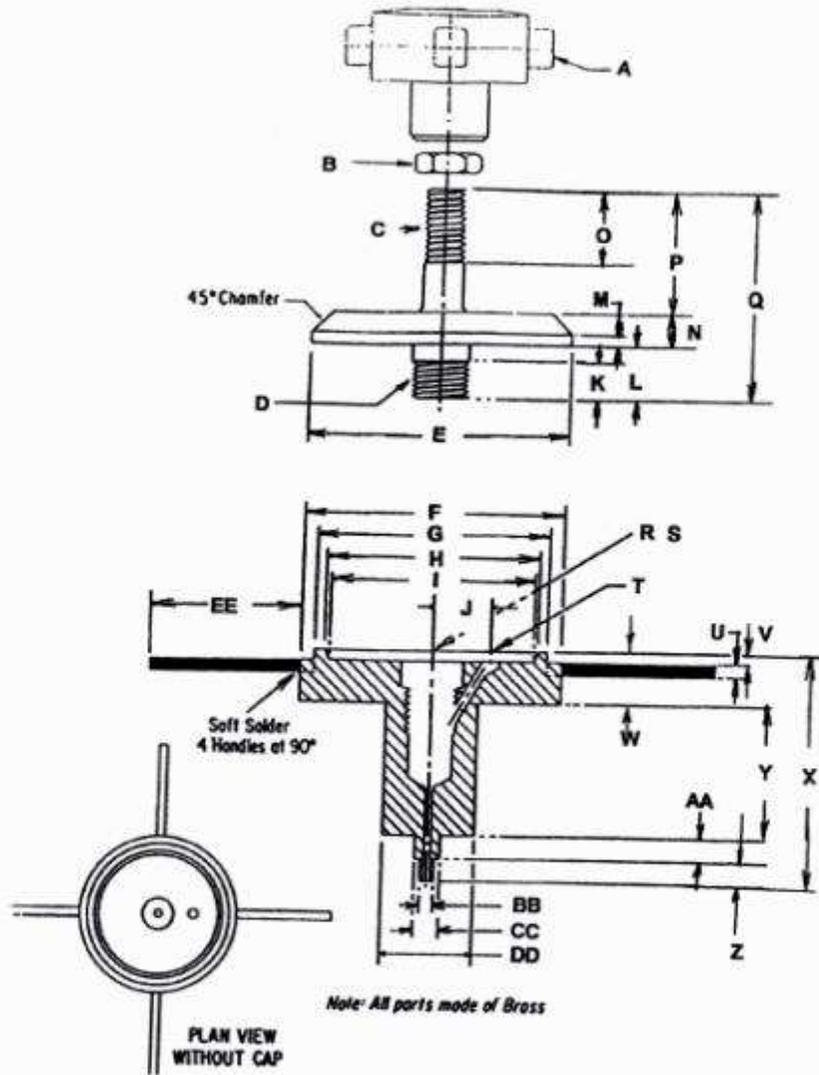
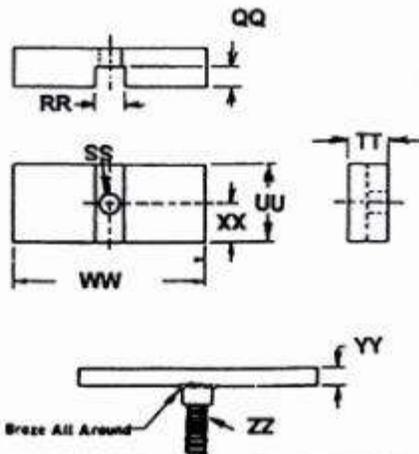
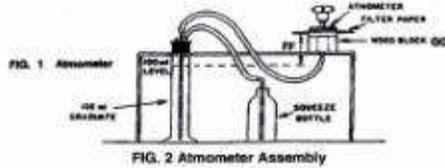
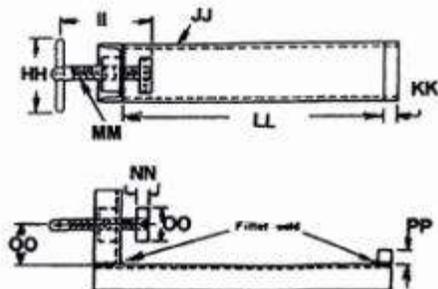


FIG. 1 Atmometer



Instructions for Use—Remove the end and the outer side plates leaving the base, center side plate, and gage stud holders in place. Engage the machine screw in the drilled and tapped end of the center side plate. Turn the thumbscrew to loosen the bars.

FIG. 3 Device for Detaching 1-in. [25-mm] Square by 1 1/2-in. [38-mm] Bars from Center Side Plate of Double Molds



Note—Dimensions shown are appropriate for one design of mold for 3-in. [75-mm] square specimens. Change dimensions as required for other molds.

FIG. 4 Device for Demolding Specimens from Single Molds

Figure Dimensions	ASTM C 197 FIGURES	
	SI Units	Inch-Pound Units
A	Adjustable torque handle 1.4–1.7 Nm	Adjustable torque handle 12–15 in. lb
B	3/8 in. nut	3/8 in. nut
C	10–12 IMC	3/4 in.—16 NC
D	10-mm diameter 1.5 IMC Thd	3/4 in. dia—16 NC Thd
E	12-mm diameter 1.5 IMC Thd	1/2 in. dia—20 NC Thd
F	64-mm diameter	2.50 in. diameter
G	64-mm diameter	2.50 in. diameter
H	57-mm diameter	2.25 in. diameter
I	52-mm diameter	2.06 in. diameter
J	51-mm diameter	2.00 in. diameter
K	14 mm	0.56 in.
L	8 mm	0.31 in.
M	13 mm	0.50 in.
N	3 mm	0.125 in.
O	8 mm	0.31 in.
P	19 mm	0.75 in.
Q	32 mm	1.25 in.
R	53 mm	2.06 in.
S	1.5-mm drill through 11.5-mm C bore	1/16-in. drill through 3/4-in. C bore
T	20-mm deep tap 12-mm 1.5-mm 11/16-in. deep tap 1/2-in.—20 Thd 1/8 Thd	11/16-in. deep tap 1/2-in.—20 Thd
U	19 mm deep 16 mm C bore 6 mm deep	3/4-in. deep 3/4-in. C bore 1/4 in. deep
V	5-mm drill 3-mm deep C drill at 60° as shown	3/16-in. drill 1/4-in. deep C drill at 60° as shown
W	through to center tapped hole	through to center tapped hole
X	3 mm	0.12 in. diameter
Y	2 mm	0.09 in.
Z	10 mm	0.40 in.
AA	60 mm	2.36 in.
BB	35 mm	1.37 in.
CC	6 mm	0.25 in.
DD	23 mm	0.87 in.
EE	38 mm	1.50 in.
FF	25 to 75 mm	1 to 3 in.
GG	35 mm high	1.37 in. high
HH	100 mm	4 in.
II	130 mm	5 in.
JJ	8 cm–6.1 kg/m channel	3 in.—4.1 lb/ft channel
KK	20 mm	3/4 in.
LL	330 mm	13 in.
MM	14–2.0 IMC Thd	1/2 in.—12 Thd
NN	30 mm	3/4 in.
OO	50 mm	2 in.
PP	20 mm	3/4 in.
QQ	60 mm	1/4 in.
RR	10 mm	3/4 in.
SS	Drill C <sub>1</sub> hole for 4.5–6.75 IMC machine screw	Drill C <sub>1</sub> hole for 8–32 in. machine screw
TT	13 mm	1/2 in.
UU	25 mm	1 in.
VV	30 mm	1 1/4 in.
WW	50 mm	2 1/4 in.
XX	12.5 mm	1/2 in.
YY	5-mm diameter steel rod	1/8-in. diameter steel rod
ZZ	4.5–6.75 IMC × 16-mm machine B-32 × 1/4-in. machine screw	8–32 in. machine screw

## 6. Sampling

6.1 Take samples according to the applicable provisions of Practice C 192/C 192M from batches of hydraulic-cement mortar or concrete made in the laboratory (Note 2).

Note 2—When collecting samples in nonstandard conditions, such as field concrete, it is suggested that Practice C 172 be followed. Field cast specimens can show up to twice as much drying shrinkage as laboratory cast specimens from the same materials and proportions.

## 7. Test Specimens

7.1 *Mortar*—The test specimen for mortar shall be a prism of 1-in. [25-mm] square cross-section and approximately 11 1/4 in. [285 mm] in length. Three specimens shall be prepared for each test condition.

7.2 *Concrete*—The test specimen for concrete, in which all of the aggregate passes a 2-in. [50-mm] sieve, shall be a prism of 4-in. [100-mm] square cross-section and approximately 11 1/4 in. [285 mm] long. However, a prism of 3-in. [75-mm] square cross-section shall be used if all of the aggregate passes a 1-in. sieve [25.0-mm]. These specimens shall be prepared for each test condition. Since length change is capable of being influenced by the size of the specimen, specimens to be compared shall have the same dimensions, and any specification limit based upon this method shall be applied to a specified size of specimen.

## 8. Procedure for Mixing Mortars and Concrete

8.1 If the mortar or concrete to be tested is made in accordance with requirements other than those given in one of the following paragraphs, samples shall be taken and specimens molded as described in the sections on sampling and on molding specimens.

8.2 Bring all materials to a temperature between 65 and 75 °F [18 and 24 °C] before using to make mortar or concrete. Proportion solid materials by mass (that is, not by volume). It is permissible to batch water and liquid admixtures either by mass or by volume. For calculation of batch quantities, assume aggregates to be saturated and surface-dry; if they are not in this condition at the time of use, apply appropriate corrections, as necessary, to batch quantities to compensate for absorption or free moisture.

8.3 *Mortar*—Mix mortar in a mechanical mixer as described in Practice C 305. The clearances between paddle and bowl specified in Practice C 305 are suitable only for mortars made with fine aggregates that are finer than the 2.36 mm (No. 8) sieve. Mortars made with aggregates containing particles coarser than this sieve require special clearances or a different type of paddle to permit the mixer to operate freely and to avoid damage to the paddle and bowl. The sequence of mixing shall be in accordance with the applicable provisions of Practice C 305. Determine the flow of the mortar in accordance with the applicable provisions of Test Method C 1437, and use sufficient mixing water to produce a flow of  $110 \pm 5\%$ .

8.4 *Concrete*—Mix concrete in a suitable laboratory mixer in accordance with the applicable provisions of Practice C 192/C 192M. Determine the slump of the concrete using Test Method C 143/C 143M, and use sufficient mixing water to produce a slump of  $3.5 \pm 1/2$  in. [90  $\pm$  15 mm].

## 9. Procedure for Molding Specimens

9.1 *Mortar Specimens*—Place the mortar in the mold in two approximately equal layers. Compact each layer with the tamper. Work the mortar into the corners, around the gage studs, and along the surfaces of the mold with the tamper until a homogeneous specimen is obtained. After the top layer has been compacted, strike off the mortar flush with the top of the mold, and smooth the surface with a few strokes of a trowel.

Immediately after completion of molding, loosen the device by holding the gage studs in position at each end of the mold in order to prevent any restraint of the gage studs during initial shrinkage of the specimen.

9.2 *Concrete Specimens*—Place the concrete in the mold in two approximately equal layers in accordance with the general instructions for placing concrete in specimens given in Practice C 192/C 192M. Consolidate each layer by rodding, except use external vibration if the slump is less than 3 in. [75 mm] in accordance with the instructions for consolidation of flexure test specimens given in Practice C 192/C 192M. The same method of consolidation is to be used for all specimens to be compared. In addition, as the top layer is being placed, work the concrete thoroughly around each gage stud with the fingers. The top layer shall slightly overfill the mold. After consolidation is complete, strike off the excess material with a straight-edge. Immediately after completion of molding, loosen the device by holding the gage studs in position at each end of the mold in order to prevent any restraint of the gage studs before the test specimens are demolded.

## 10. Procedure for Curing of Specimens

10.1 Cure the test specimens in the molds in a moist cabinet or room in accordance with Specification C 511. Protect specimens from dripping water.

10.2 Remove specimens from the molds at an age of  $23 \frac{1}{2} \pm 1/2$  h after the addition of water to the cement during the mixing operation. In order to avoid damage during removal from the molds, it is not permitted, especially in the case of certain slow-hardening cements, to allow specimens to remain in the molds for more than 24 h. When this is found necessary the moist curing schedule shall be extended, but all specimens that are to be directly compared with each other shall be subjected to the same conditions of moist-curing and shall have their initial comparator reading made within  $\pm 1/2$  h of the same age. It is permitted to use the demolding device to remove specimens without striking or jarring and with particular care not to exert pressure directly against the gage studs. The gage stud holder shall remain attached to the stud during this operation. Marks placed on the specimens for identification or positioning are only to be made by graphite applied either by a soft pencil or as a liquid that deposits essentially graphite without binder or made with waterproof indelible ink. Upon removal of the specimens from the molds, place them in lime-saturated water maintained at  $73 \pm 1$  °F [ $23 \pm 0.5$  °C] for a minimum of 15 min in the case of 1-in. [25-mm] square cross-section specimens, and for a minimum of 30 min in the case of 3-in. [75-mm] or 4-in. [100-mm] square cross section specimens before being measured for length. This is to minimize variation in length due to variation in temperature. At an age of  $24 \pm 1/2$  h after the addition of water to the cement during the mixing operation, remove the specimens from water storage one at a time, wipe with a damp cloth, and immediately take the initial comparator reading.

10.3 After the initial comparator reading, store the specimens in lime-saturated water at  $73 \pm 3$  °F [ $23 \pm 2$  °C] until they have reached an age of 28 days, including the period in the molds. At the end of the curing period, take a second comparator reading after the specimens have been brought to a

more closely controlled temperature as was done prior to the earlier reading and in the manner described above.

**Note 3**—To determine the drying shrinkage of concrete subjected to elevated temperature curing in the laboratory, a modification of the previous method is necessary. Where concrete is cured with elevated (non-ambient) temperatures, the curing cycle for this test method shall be that to be used for the project structural members. The elevated temperature curing cycle consists of pre-steam, steam cure, and post-steam periods. To avoid measuring thermal volume change, after the molds are stripped, cool drying-shrinkage specimens at laboratory temperature until they reach equilibrium (approximately 6 h for 4 by 4 by 11-in. [100 by 100 by 280-mm] bars). Then place them in lime-saturated water prior to the initial reading (see 10.2).

## 11. Procedure for Storage of Specimens

11.1 After measurement at the end of the curing period, store the specimens as described in either of the following:

11.1.1 **Water Storage**—Immerse the specimens in lime-saturated water storage in accordance with Specification C 511. Take comparator readings of each specimen when it has reached an age, including the curing period of 8, 16, 32, and 64 weeks. Make these readings immediately after the specimens have been subjected to storage in water at  $73 \pm 1^\circ\text{F}$  [ $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ] for at least 15 min in the case of 1-in. [25-mm] specimens or 30 min in the case of 3-in. [75-mm] or 4-in. [100-mm] specimens.

11.1.2 **Air Storage**—Store the specimens in the drying room, so that the specimens have a clearance of at least 1 in. or 25 mm on all sides. Take comparator readings of each specimen after periods of air storage after curing of 4, 7, 14, and 28 days, and after 8, 16, 32, and 64 weeks. Preferably, take these readings in a room maintained at a relative humidity of  $50 \pm 4\%$  while the specimens are at a temperature of  $73 \pm 3^\circ\text{F}$  [ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ].

## 12. Procedure for Calculating Length Change

12.1 **Comparator Reading**—Read the comparator dial with the test specimen in the comparator; then read the comparator dial with the reference bar in the comparator. Calculate the difference between the two readings as described in Practice C 490.

12.2 **Length Change**—Calculate the length change of any specimen at any age after the initial comparator reading as follows:

$$\Delta L_s = \frac{CRD - \text{initial CRD}}{G} \times 100 \quad (1)$$

where:

$\Delta L_s$  = length change of specimen at any age, %  
 CRD = difference between the comparator reading of the specimen and the reference bar at any age, and  
 G = the gage length (10 in. [250 mm]) (see Note 4).

**Note 4**—In Practice C 490, the comparator dial gage specified for use with 10-in. gage length specimens shall be graduated in fractions of an inch; the comparator dial gage specified for use with 250-mm gage length specimens shall be graduated in fractions of a millimetre.

## 13. Report

13.1 Report the following information:

13.1.1 Identification as mortar or concrete specimens, number of specimens for each condition, and date molded.

13.1.2 Source and identification of each material employed.

13.1.3 Type, maximum size, moisture condition, and grading of the aggregate.

13.1.4 Size of specimens.

13.1.5 Mortar or concrete mixture data at time of mixing, including flow or slump and temperature of mixture.

13.1.6 Description of consolidation of concrete, specifying whether rodding or external vibration was used.

13.1.7 Conditions and periods of moist curing prior and subsequent to removal of molds, if different from those specified.

13.1.8 Description of storage condition, including temperature and humidity, either by indicating whether the water or air storage was followed or by giving the details of any procedure not conforming to either of these conditions.

13.1.9 Total elapsed time of storage and total age of specimen, or total elapsed time of curing and storage if the same condition was used for both.

13.1.10 Length change data, reported as percent increase or decrease in linear dimension to the nearest 0.001 % of the gage length based on the initial measurement made at the time of removal from the molds, and

13.1.11 Any other pertinent information.

## 14. Precision and Bias

14.1 **Precision:**

14.1.1 When this test method was used for the purpose of determining drying shrinkage of mortar as affected by the choice of portland cement used in making it, the precision was found to be as reported in Test Method C 596.

14.1.1.1 The following single-laboratory, multiple-operator precision applies to concrete specimens measured at 180 days.

14.1.1.2 For specimens stored in water, the standard deviation (1s) among specimens is 0.0045 %. When three replicate specimens are tested, the maximum range among them is not expected to exceed 0.0266 % in 95 % of the sets tested. When a test result represents the mean of three specimens, the 1s is 0.0026 %. The difference between two such means is not expected to exceed 0.0074 % in 95 % of such duplicate tests performed.

14.1.1.3 For specimens stored in air, the standard deviation (1s) among specimens is 0.0084 %. When three replicate specimens are tested, the maximum range among them is not expected to exceed 0.0496 % in 95 % of the sets tested. When a test result represents the mean of 3 specimens, the 1s is 0.0048 %. The difference between two such means is not expected to exceed 0.0137 % in 95 % of such duplicate tests performed.

**Note 5**—These precision values were calculated from data taken on specimens described on p. 47 of STP 205,<sup>4</sup> representing 193 concrete mixtures; two specimens made from each of three batches made on separate days, one of each two specimens stored in water; the other stored at nominal 50 % relative humidity.

<sup>4</sup> Mather, Bryant, "The Partial Replacement of Portland Cement in Concrete," *Cement and Concrete*, ASTM STP 205, ASTM, 1954.

## ANEXO 2

Procedimientos de ensayos realizados en la sección 4.3  
Elaboración de probetas de ensayo.

## **ANEXO N°2: Ensayos realizados en la sección 4.3 Elaboración de probetas de ensayo.**

### **➤ Anexo 2.1: Fabricación del concreto hidráulico (ASTM C 192/C 192M).**

La fabricación del concreto se realizó utilizando una máquina de mezclado (concretera). El equipo necesario se describe a continuación:

- Máquina de mezclado.
- Cubetas.
- Báscula.
- Cucharones.
- Probeta.
- Pala.

#### **Procedimiento:**

a) Determinar la humedad de los agregados (grava y arena), para realizar un ajuste en los pesos de los materiales constituyentes del concreto.

El procedimiento para calcular el contenido de humedad consiste en seleccionar una muestra que sea representativa de la humedad del material; determinar la masa de la muestra; secar la muestra por medio de una fuente de calor y determinar la masa de la muestra seca (ver fotografía 2.1.1 y 2.1.2); calcular el contenido de humedad como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \left( \frac{\text{masa de muestra} - \text{masa seca}}{\text{masa seca}} \right) * 100$$

b) Pesar cantidades de materiales según diseño y volumen de concreto a utilizar. (Ver fotografía 2.1.3)

c) Antes de iniciar el proceso de mezclado se debe humedecer la máquina mezcladora para evitar que esta absorba agua de diseño (agua calculada

en el diseño de mezcla necesaria para alcanzar la relación A/C y por ende la resistencia requerida). (Ver fotografía 2.1.4)



Fotografía 2.1.1y 2.1.2 Selección y secado con calor de muestra.



Fotografía 2.1.3 Pesado de materiales para concreto.



Fotografía 2.1.4 Preparación de concretera.

d) Adicionar la mitad del agua de diseño en la mezcladora, luego adicionar el agregado grueso e iniciar el mezclado. (Ver fotografía 2.1.5)

e) Adicionar el agregado fino mientras la maquina mezcladora está en movimiento y dejar que se mezcle con la grava ya humedecida.



Fotografía 2.1.5 Mezclado de materiales en concretera.

- f) Luego, agregar el cemento mientras la mezcladora está en movimiento y dejar que se mezcle con los agregados humedecidos.
- g) Añadir el agua en incrementos para ajustar el revenimiento deseado. En esta etapa juega un papel muy importante la experiencia de la persona que realiza la bachada de concreto; pues debe tener el criterio técnico para predecir con bastante aproximación si el concreto posee el revenimiento buscado.

➤ **Anexo 2.2: Medición de revenimiento en el concreto hidráulico en estado fresco (ASTM C-143).**

Con este método de ensayo se cuenta con una técnica para monitorear la consistencia del concreto en estado plástico.

El equipo necesario para realizar el ensayo de laboratorio se presenta a continuación:

- Molde en forma de cono truncado (diámetro inferior 8 pulgadas, diámetro superior 4 pulgadas, altura 12 pulgadas).
- Varilla apisonadora (diámetro 5/8 de pulgada, longitud aproximada 24 pulgadas).
- Cinta métrica.
- Cucharón.

**Procedimiento:**

- a) Humedecer el molde, su base y la varilla apisonadora, posteriormente colocarlo sobre la base y fijarlo.
- b) Verter el concreto fresco con un cucharon (humedecer el cucharon) en el interior del molde, hasta ocupar una tercera parte de su volumen, luego apisonar con 25 golpes de la varilla, distribuidos uniformemente sobre la superficie de la capa. Apisonar la capa inferior en todo su espesor.(Ver fotografía 2.2.1)
- c) Repetir el procedimiento descrito en b, llenando el molde en dos capas más, teniendo cuidado que al compactar cada capa la varilla de apisonado no penetre más de 1 pulgada en la capa anterior. (Ver fotografía 2.2.2)



Fotografía 2.2.1 Apisonamiento de primera capa en revenimiento.



Fotografía 2.2.2 Llenado de molde de revenimiento.

- d) Después que la última capa ha sido apisonada, si el concreto se asienta bajo el borde superior, añadir concreto para mantener un exceso; alisar la superficie de concreto con la ayuda de la varilla apisonadora (por medio de

un movimiento rotatorio de la varilla, rodándola en la superficie de concreto).  
(Ver fotografía 2.2.3)



Fotografía 2.2.3 Enrasamiento de molde de revenimiento.

e) Levantar el molde mediante un movimiento uniforme hacia arriba sin movimiento torsional o lateral. (Ver fotografía 2.2.4)



Fotografía 2.2.4 Levantamiento de molde para medir revenimiento.

f) Medir inmediatamente el revenimiento, determinando la diferencia entre el borde del molde y el centro original desplazado de la cara superior del espécimen. (Ver fotografía 2.2.5)



Fotografía 2.2.5 Medición de revenimiento.

g) Se registran los revenimientos medidos para cada una de las bachadas para ambos módulos de ruptura, estos se muestran en la Tabla 4.1.

➤ **Anexo 2.3: Determinación de Peso Unitario y contenido de aire en las mezclas de concreto fresco por el método de presión (ASTM C-138).**

Este ensayo se usa en la determinación del peso unitario, y el contenido de aire de una mezcla de concreto fresco excluyendo cualquier aire que queda dentro de los vacíos de las partículas de agregado.

El equipo necesario para realizar el ensayo es el siguiente:

- Medidor de aire: el recipiente debe ser de forma cilíndrica, teniendo un diámetro mínimo igual a 0.75 a 125 veces la altura, y una capacidad de al menos 0.20 pies<sup>3</sup> (0.006 m<sup>3</sup>).
- Tapadera ensamblada: debe tener un indicador directo de contenido de aire, la escala debe tener graduaciones para medir un rango de contenido de aire de al menos 8 % legible al 0.1 %. Debe tener válvulas de aire a presión, válvulas de escape de aire y llaves para quitar o agregar agua.
- Varilla de apisonado: debe ser de acero, lisa, de 5/8" (16 mm) de diámetro y no menor de 16 pulgadas (400 mm) de longitud, con el extremo redondeado o hemisférico con diámetro de 5/8de pulgada (16 mm).
- Mazo: con cabeza de hule o cuero que pese aproximadamente 1.25 ± 0.50 lb (0.57 ± 0.23 Kg).
- Placa para remover exceso de concreto: placa metálica rectangular y plana para remover, de al menos ¼ de pulgada (6 mm).

**Procedimiento:**

a) Determine la masa del recipiente; humedezca el interior del recipiente medidor y colóquelo en una superficie firme, nivelada y plana. Coloque en el recipiente de medición la primera de tres capas de concreto.

- b) Compacte la capa de concreto con 25 golpes de varilla uniformemente distribuidos sobre la sección transversal. Apisone la capa en su profundidad total, evitando que la varilla golpee el fondo del recipiente. (Ver fotografía 2.3.1)



Fotografía 2.3.1 Primera capa en ensayo de contenido de aire.

- c) Golpee los lados del recipiente suavemente con el mazo de 10 a 15 veces para cerrar cualquier hueco que haya quedado y para liberar burbujas de aire atrapado. (Ver fotografía 2.3.2)



Fotografía 2.3.2 Liberación de aire atrapado en recipiente.

- d) Colocar en el recipiente medidor la segunda capa de concreto.
- e) Apisone la segunda capa con la fuerza necesaria para que la varilla penetre 1 pulgada (25 mm) en la capa inferior. (Ver fotografía 2.3.3)
- f) Golpee los lados del medidor suavemente con el mazo de 10 a 15 veces.
- g) Adicione la capa final de concreto de tal manera que evite el exceso de llenado.
- h) Apisone la tercera capa con la fuerza necesaria para que la varilla penetre 1 pulgada (25 mm) en la capa inferior. (Ver fotografía 2.3.4)



Fotografía 2.3.3 Segunda capa en ensayo de contenido de aire.



Fotografía 2.3.4 Tercera capa en ensayo de contenido de aire.

- i) Remueva el exceso de la capa superior utilizando placa de enrase, hasta que el recipiente este totalmente nivelado.(Ver fotografía 2.3.5)
- j) Después del enrasamiento limpiar todo el concreto del exterior del recipiente y determinar la masa del concreto y recipiente. (Ver fotografía 2.3.6)



Fotografía 2.3.5 Enrasamiento de molde para medir contenido de aire.



Fotografía 2.3.6 Determinación de masa de recipiente.

- k) Ensamblar la tapadera al recipiente y verificar que cierre herméticamente.  
(Ver fotografía 2.3.7)



Fotografía 2.3.7 Ensamblaje de equipo de medición de contenido de aire.

- l) Cierre la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medición y abra ambas llaves de desagüe que se encuentran en la cubierta.  
m) Inyectar agua a través de una de las llaves de desagüe hasta que el agua salga por el otro desagüe. (Ver fotografía 2.3.8)



Fotografía 2.3.8 Inyección de agua en equipo de medición de contenido de aire.

- n) Cierre la válvula de escape de la cámara y bombee aire en la cámara hasta que el indicador de presión llegue a la línea de presión inicial. (Ver fotografía 2.3.9)



Fotografía 2.3.9 Medición de contenido de aire.

- o) Después del paso n, deje pasar unos segundos para que el aire comprimido se enfríe a temperatura normal. Estabilice el indicador a la presión inicial, cierre las dos llaves de desagüe en los hoyos de la cubierta, abra la válvula de aire entre la cámara y el recipiente de medición. Golpee suavemente el medidor de presión para estabilizar la aguja y leer el porcentaje de aire.

### **Cálculos:**

$$\text{Peso Unitario} = \frac{\text{masa de concreto}}{\text{volumen de recipiente}}$$

$$\text{Peso Unitario} = \frac{16.609 \text{ kg}}{0.00703 \text{ m}^3} = 2362.59 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El cálculo realizado anteriormente corresponde al diseño de MR= 36 kg/cm<sup>2</sup>, el peso unitario de ambos diseños de mezcla se presentan en la Tabla 4.2 junto con los contenidos de aire.

➤ **Anexo 2.4: Determinación de la temperatura del concreto hidráulico en estado fresco (ASTM C-1064).**

El ensayo de determinación de la temperatura en el concreto es utilizado para verificar el cumplimiento de especificaciones técnicas de temperatura para el mismo. Se requiere de un recipiente para depositar el concreto, el cual debe ser de un tamaño tal que proporcione al menos 3 pulgadas de concreto en todas las direcciones alrededor del dispositivo medidor de temperatura.

El equipo necesario para realizar el ensayo es el siguiente:

- Recipiente para depositar concreto.
- Dispositivo medidor de temperatura

**Procedimiento:**

- a) Humedecer con agua el recipiente (carretilla) para depositar el concreto.
- b) Verter concreto de máquina de mezclado hacia recipiente.
- c) Colocar dispositivo medidor de temperatura de modo que la porción del sensor de temperatura este sumergido un mínimo de 3 pulgadas en la mezcla de concreto fresco. (Ver fotografía 2.4.1).



Fotografía 2.4.1 Dispositivo medidor de temperatura en el concreto fresco.

- d) Presionar suavemente con los dedos el concreto superficial alrededor del dispositivo medidor de temperatura para evitar que la temperatura del ambiente afecte la lectura.

- e) Dejar el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto fresco por un periodo mínimo de 2 minutos o hasta que la lectura de temperatura se estabilice, posteriormente leer y registrar la temperatura.
- f) Se registran los datos obtenidos para cada una de las bachadas hechas para la fabricación de especímenes de cambio longitudinal. Los resultados se presentan en la Tabla 4.3.

➤ **Anexo 2.5: Colado y curado de probetas para ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C-192).**

El equipo utilizado y el procedimiento realizado se describen a continuación:

**Equipo utilizado:**

- Moldes: deben ser de acero, hierro forjado u otro material no absorbente; el diámetro de los cilindros será de 6 pulgadas y una altura de 12 pulgadas.
- Varilla de apisonamiento: de acero recta y redonda con diámetro de 3/8 de pulgada y una longitud de 12 pulgadas; con uno o ambos extremos redondeados, en forma de media esfera.
- Martillo: con cabeza de goma pesando  $1.25 \pm 0.50$  lb ( $0.6 \pm 0.2$  kg).
- Palas, cucharones, enrasador.

**Procedimiento:**

- a) Llenar el molde hasta un tercio de la altura, varillar la capa en toda su profundidad con el extremo redondeado de la varilla, dando 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la sección transversal del molde. (Ver fotografía 2.5.1)
- b) Después de varillar la capa, golpear suavemente los lados del molde de 10 a 15 veces con el martillo, para cerrar agujeros dejados por el varillado y para liberar burbujas de aire. (Ver fotografía 2.5.2).



Fotografía 2.5.1 Llenado y varillado de moldes para ensayo de compresión.



Fotografía 2.5.2 Liberando burbujas de aire en moldes para compresión.

- c) Llenar el molde hasta  $\frac{2}{3}$  de su altura, varillar la capa permitiendo que la varilla penetre a través de la capa siendo varillada e introduciéndose en la capa inferior aproximadamente 1 pulg; posteriormente golpear suavemente los lados del molde de 10 a 15 veces con el martillo.
- d) Llenar el molde completamente y repetir el procedimiento realizado en c) (Ver fotografía 2.5.3).



Fotografía 2.5.3 Moldes para compresión completamente llenos.

- e) Remover el concreto en exceso de la superficie y darle el acabado puliéndola, ejecutando el acabado con el mínimo de manipulación. (Ver fotografía 2.5.4).



Fotografía 2.5.4 Enrasamiento de moldes para ensayo de compresión.

- f) Remover los especímenes de concreto de los moldes después de  $24 \pm 4$  horas de elaborados y colocarlos en tanques de almacenamiento con agua libre mantenida en toda su superficie y a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C, hasta que sean ensayados. (Ver fotografía 2.5.5)



Fotografía 2.5.5 Curado de especímenes de concreto.

➤ **Anexo 2.6: Colado y curado de probetas para ensayo de resistencia a la flexión (ASTM C-192).**

El equipo utilizado y el procedimiento realizado se describen a continuación:

**Equipo utilizado:**

- Moldes: los lados, fondo y extremos deben ser perpendiculares entre si y deben ser planos y sin deformaciones; las dimensiones de las vigas serán de una sección transversal cuadrada de 6x6 pulgadas y una longitud de 20 pulgadas.
- Varilla de apisonamiento: de acero recta y redonda con diámetro de 3/8 de pulgada y una longitud de 12 pulgadas; con uno o ambos extremos redondeados, en forma de media esfera.
- Martillo: con cabeza de goma pesando  $1.25 \pm 0.50$  lb ( $0.6 \pm 0.2$  kg).
- Palas, cucharones, enrasador, planchas o llanas.

**Procedimiento:**

- a) Llenar el molde hasta un medio de la altura, varillar la capa en todo su espesor con el extremo redondeado de la varilla, dando un golpe por cada 2 pulg<sup>2</sup> del área superficial; en nuestro caso 72 golpes distribuidos uniformemente sobre la sección transversal del espécimen. (Ver fotografía 2.6.1)



Fotografía 2.6.1 Llenado y varillado de moldes para ensayo de flexión.

- b) Después de varillar la capa, golpear suavemente los lados del molde de 10 a 15 veces con el martillo, para liberar burbujas de aire y cerrar agujeros dejados por el varillado.
- c) Llenar el molde completamente y adicionar la cantidad de concreto que llenará el molde después de la consolidación; varillar la capa permitiendo que la varilla penetre a través de la capa siendo varillada e introduciéndose en la

capa inferior aproximadamente 1 pulgada; posteriormente golpear suavemente los lados del molde de 10 a 15 veces con el martillo.

- d) Después de la consolidación, remover el exceso de concreto de la superficie y usar una plancha de mano para dar el acabado a la superficie. (Ver fotografía 2.6.2).



Fotografía 2.6.2 Enrasado final en moldes para ensayo a flexión.

- e) Remover los especímenes de concreto de los moldes después de  $24 \pm 8$  horas de elaborados y colocarlos en tanques de almacenamiento con agua libre mantenida en toda su superficie y a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C, hasta que sean ensayados.

#### ➤ **Anexo 2.7: Ensayo de resistencia a la compresión.**

El equipo utilizado y el procedimiento realizado es el que se describe a continuación.

#### **Equipo utilizado:**

- Máquina de Ensayo: la máquina de ensayo será de un tipo que tenga suficiente capacidad de proporcionar la razón de carga.
- Bloques de carga: bloque de acero con caras endurecidas, deberán tener una dimensión mínima al menos 3% mayor que el diámetro del espécimen a ser ensayado.
- Cinta métrica, franela.

**Procedimiento:**

- a) Remover los especímenes de concreto del tanque de almacenamiento, secarlos con una franela y determinar su masa. (Ver fotografía 2.7.1)



Fotografía 2.7.1 Determinación de la masa de cilindros para compresión.

- b) Tomar medidas de diámetro y longitud de especímenes de concreto. (Ver fotografía 2.7.2).



Fotografía 2.7.2 Toma de dimensiones de cilindros para compresión.

- c) Limpiar las superficies de carga de los bloques superior e inferior y del espécimen de ensayo, colocar los bloques de carga sobre el espécimen y colocar el espécimen en el bloque de carga inferior de la máquina de carga y cuidadosamente alinear el eje del espécimen con el centro de carga superior de la máquina. (Ver fotografía 2.7.3)



Fotografía 2.7.3 Ensayo de resistencia a la compresión.

- d) Verificar que el indicador de carga este en cero, si no lo está ajustar el indicador; aplicar la carga continuamente y sin impacto hasta que el indicador de carga muestre que la carga está disminuyendo constantemente y el espécimen muestre una fractura bien definida. (Ver fotografía 2.7.4)



Fotografía 2.7.4 Falla en cilindro ensayado a compresión.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se presentan en la tabla 4.7.

➤ **Anexo 2.8: Ensayo de resistencia a la flexión.**

El equipo utilizado y el procedimiento realizado se muestran a continuación:

**Equipo utilizado:**

- Máquina de Ensayo: la máquina de ensayo será de un tipo que tenga suficiente capacidad para proporcionar la razón de carga.

- Bloques de soporte: la función de los bloques es asegurar que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara del espécimen y sin excentricidad.
- Cinta métrica.

**Procedimiento:**

- a) Preparar máquina de ensayo colocando bloques de carga y de soporte. (Ver fotografía 2.8.1).



Fotografía 2.8.1 Máquina de ensayo de resistencia a la flexión.

- b) Remover los especímenes de concreto de las pilas de curado y realizar el ensayo tan pronto como sea posible.
- c) Girar el espécimen a ensayar con respecto a su posición como fue moldeado y centrarlo en los bloques de soporte. (Ver fotografía 2.8.2).



Fotografía 2.8.2 Ensayo de resistencia a la flexión.

- d) Colocar empaques de cuero en la superficie de contacto entre los bloques de aplicación de carga y la superficie del espécimen. (Ver fotografía 2.8.3).



Fotografía 2.8.3 Viga de concreto en maquina de resistencia a la flexión.

- e) Cargar el espécimen continuamente y sin golpe, la carga deberá ser aplicada a una razón constante hasta la falla. (Ver fotografía 2.8.4)



Fotografía 2.8.4 Falla en viga de concreto.

- f) Determinar las dimensiones del espécimen en su sección transversal, tomando medidas a través de una de las caras fracturadas.
- g) Calcular el módulo de ruptura aplicando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Dónde:

R= Modulo de Ruptura

P= Carga máxima aplicada, indicada por la máquina.

L= Longitud entre los apoyos.

b= Ancho del espécimen.

d= Altura promedio del espécimen.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.8.

## ANEXO 3

Formularios con los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas en laboratorio, en la etapa de caracterización de materiales.



# Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

## Centro de Investigaciones ISCYC

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
Cuscatlan La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164



### ANALISIS GRANULOMETRICO ASTM C-136

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
UBICACIÓN : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
TIPO DE MUESTRA: \_\_\_\_\_  
FECHA DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
FECHA DE ENSAYO: 13 DE ABRIL DE 2011  
LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
REVISO: TECNICO JULIO HE  
OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

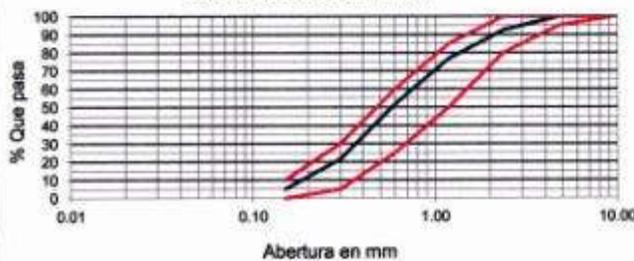
Modulo de finura 2.52

#### HOJA DE LABORATORIO

MASA TARA, g = 172.4      MASA TARA + MUESTRA, g = 539.4      MASA MUESTRA, g = 367

MALLA	M. RETENIDO PARCIAL (g)	MASA RETENIDA (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	QUE PASA LA MALLA (%)	OBSERVACIONES
					Rangos ASTM C-33
3/8"		0.00	0.00	100.00	100
No. 4	0.0	0.00	0.00	100.00	95-100
No. 8	27.5	7.49	7.49	92.51	80-100
No. 16	57.8	15.75	23.24	76.76	50-85
No. 30	91.6	24.96	48.20	51.80	25-60
No. 50	111.3	30.33	78.53	21.47	5-30
No. 100	60.0	16.35	94.88	5.12	0-10
FONDO	18.8	5.12	100.00	0.00	
SUMAS	367.0	100.00			

#### CURVA GRANULOMETRICA







# Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

## Laboratorio de Investigaciones ISCYC

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
Cuscatlan La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164



### ANALISIS GRANULOMETRICO ASTM C-136

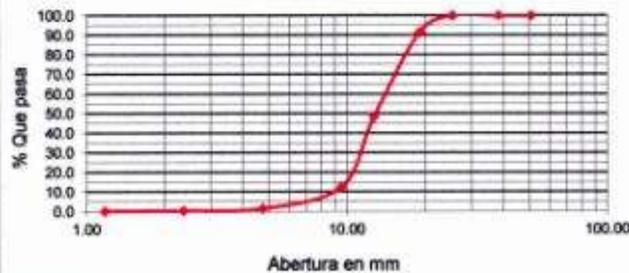
SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
UBICACION : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
MUESTRA : \_\_\_\_\_  
F. DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
F. DE ENSAYO: 13 DE ABRIL DE 2011  
LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
REVISO: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

#### HOJA DE LABORATORIO

MASA TARA, g = 2484      MASA TARA + MUESTRA, g = 9455.0      MASA MUESTRA, g = 6971.0

MALLA	ML. RETENIDO PARCIAL (g)	MASA RETENIDA (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	QUE PASA LA MALLA (%)	OBSERVACIONES
2"	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0	
1"	0.0	0.0	0.0	100.0	
3/4"	589.0	8.5	8.5	91.5	
1/2"	3004.0	43.1	51.6	48.4	
3/8"	2504.0	36.0	87.6	12.4	
No.4	763.0	11.0	98.5	1.5	
No.8	70.4	1.0	99.5	0.5	
No.16	19.0	0.3	99.8	0.2	
FONDO	13.7	0.2	100.0	0.0	
SUMAS	6963.1	100.0			

#### CURVA GRANULOMETRICA





# Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

## Laboratorio de Investigaciones ISCYC

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El espinero y Boulevard Sur, Antiguo  
Cuscatlan La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164



### GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DEL AGREGADOS GRUESOS ASTM C-127

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
UBICACION : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
MUESTRA : MUESTRA No 1  
F. DE MUESTREO :  
F. DE ENSAYO : 13 DE ABRIL DE 2011  
LABORATORISTAS : PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
REVISOR : TECNICO JULIO HERNANDEZ  
OBSERVACIONES :

#### HOJA DE LABORATORIO

MUESTRA No: 1		MUESTRA No: 2			
MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> + TARA (g):	3373.0	MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> + TARA (g):			
MASA TARA sss (g):	15.0	MASA TARA sss (g):			
MASA SATURADA, W <sub>ss</sub> (g):	3358.0	MASA SATURADA, W <sub>ss</sub> (g):			
MASA SUMERGIDA, W <sub>sum</sub> + TARA SUM (g):	2942.0	MASA SUMERGIDA, W <sub>sum</sub> + TARA SUM (g):	---		
MASA TARA SUMERGIDA (g):	848.0	MASA TARA SUMERGIDA (g):	---		
MASA SUMERGIDA NETA, W <sub>sum</sub> (g):	2094.0	MASA SUMERGIDA NETA, W <sub>sum</sub> (g):	---		
MASA SECA, W <sub>seca</sub> + TARA (g):	3522.0	MASA SECA, W <sub>seca</sub> + TARA (g):	---		
MASA TARA/seca (g):	226.4	MASA TARA/seca (g):	---		
MASA SECA, W <sub>seca</sub> (g):	3295.6	MASA SECA, W <sub>seca</sub> (g):	---		
AGUA (g):	62.4	AGUA (g):	---		
ABSORCION, (%)	1.9	ABSORCION, (%)	---		
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.61	GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	---		
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.66	GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	---		
ABSORCION, (%)	1.9	GRAVEDAD ESP. SSS:	2.66	GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.61

#### FORMULAS:

Agua: W<sub>sss</sub> (g) - W<sub>seca</sub>(g)

g

Absorcion: [(W<sub>sss</sub>(g) - W<sub>seca</sub>(g)) / W<sub>seca</sub>(g)] x 100

%

G. E. Seca: W<sub>seca</sub>(g) / [W<sub>sss</sub>(g) - W<sub>sum</sub>(g)]

G. E. SSS: W<sub>sss</sub>(g) / [W<sub>sss</sub>(g) - W<sub>sum</sub>(g)]



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El espiño y Boulevard Sur, Antiguo  
 Cuscatlan La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164



**GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DEL AGREGADOS GRUESOS**  
**ASTM C-127**

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
 PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
 UBICACION : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
 MUESTRA : MUESTRA No 2  
 F. DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
 F. DE ENSAYO: 13 DE ABRIL DE 2011  
 LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
 REVISO: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO**

MUESTRA No: 2		MUESTRA No: 3	
MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> + TARA (g):	3583.0	MASA SATURADA, W <sub>sss</sub> + TARA (g):	
MASA TARA sss (g):	15.0	MASA TARA sss (g):	
MASA SATURADA, W <sub>ss</sub> (g):	3568.0	MASA SATURADA, W <sub>ss</sub> (g):	
MASA SUMERGIDA, W <sub>sum</sub> + TARA SUM (g):	3076.0	MASA SUMERGIDA, W <sub>sum</sub> + TARA SUM (g):	
MASA TARA SUMERGIDA (g):	848.0	MASA TARA SUMERGIDA (g):	
MASA SUMERGIDA NETA, W <sub>sum</sub> (g):	2228.0	MASA SUMERGIDA NETA, W <sub>sum</sub> (g):	
MASA SECA, W <sub>seca</sub> + TARA (g):	3729.0	MASA SECA, W <sub>seca</sub> + TARA (g):	
MASA TARA/seca (g):	226.2	MASA TARA/seca (g):	
MASA SECA, W <sub>seca</sub> (g):	3506.4	MASA SECA, W <sub>seca</sub> (g):	
AGUA (g):	61.6	AGUA (g):	
ABSORCION, (%)	1.8	ABSORCION, (%)	
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.62	GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.66	GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	
ABSORCION, (%)	1.8	GRAVEDAD ESP. SSS:	2.66
		GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.62

**FORMULAS:**

Agua:  $W_{ss}(g) - W_{seca}(g)$  g  
 Absorcion:  $[(W_{ss}(g) - W_{seca}(g)) \times 100 / W_{seca}(g)]$  %  
 G. E. Seca:  $W_{seca}(g) / [W_{ss}(g) - W_{sum}(g)]$   
 G. E. SSS:  $W_{seca}(g) / [W_{sss}(g) - W_{sum}(g)]$



RESISTENCIA AL DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO EN MAQUINA LOS ANGELES

ASTM C -

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
 PROYECTO : COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION  
 MATERIAL : PLANTEL COMALAPA  
 UBICACION : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC

Ensayo No. : 1  
 Fecha de Ens. : 14 DE ABRIL DE 2011  
 LABS. : LABORATORIO ISCYC  
 REVISO : TECNICO JULIO HERNANDEZ

Graduación : B  
 No. de Esferas : 11  
 Masa de la Carga :  
 Revoluciones : 500

MUESTRA No.	GRADUACION TIPO	MASA INICIAL Grs.	MASA FINAL Grs.	DESGASTE (%)
1	B	5005.7	4109	17.91

Observaciones : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Muestra No.	
Pasa - Retenido	Masa (g)
3" - 2 1/2"	
2 1/2" - 2"	
2" - 1 1/2"	
1 1/2" - 1"	
1" - 3/4"	
3/4" - 1/2"	2505.6
1/2" - 3/8"	2500.1
3/8" - 1/4"	
1/4" - No. 4	
No. 4 - No. 8	
<b>Total</b>	<b>5005.7</b>

Muestra No.	
Pasa - Retenido	Masa (g)
3" - 2 1/2"	
2 1/2" - 2"	
2" - 1 1/2"	
1 1/2" - 1"	
1" - 3/4"	
3/4" - 1/2"	
1/2" - 3/8"	
3/8" - 1/4"	
1/4" - No. 4	
No. 4 - No. 8	
<b>Total</b>	

% Desgaste =  $\frac{\text{MASA INI.} - \text{MASA FIN.}}{\text{MASA INICIAL}} \times 100$

## ANEXO 4

Formularios con los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas en laboratorio, en la etapa de monitoreo, ensayos no destructivos y ensayos destructivos a especímenes de concreto.



### Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

### Laboratorio de Investigaciones ISCYC

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
Cuscatlan La Libertad Tel. 505-0162 y 505-0163 Fax. 505-0164



#### RESISTENCIA A LA COMPRESION ASTM C-39

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
 PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
 UBICACIÓN : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
 F. DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
 F. DE ENSAYO: JULIO Y AGOSTO DE 2011  
 LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
 REVISO: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

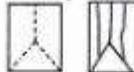
CILINDRO No.	FECHA Colado	FECHA Ruptura	EDAD (días)	REV. (pulg)	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	PESO (kg)	PES-VOL (kg/m <sup>3</sup> )	CARGA (kg)	RESIST (kg/cm <sup>2</sup> )	TIPO DE FALLA
<b>Curado de Laboratorio (Estandar) MR 45 kg/cm<sup>2</sup> ; Cemento 1157 HE</b>												
9	28/06/11	05/0/2011	7	3	15.1	30.4	179.1	12853	2361	43800	153.60	5
8	28/06/11	05/07/11	7	3	15.1	30.4	179.1	12732	2339	41850	233.70	5
5	28/06/11	05/07/11	7	3	15.1	30.4	179.1	12898	2369	45350	253.24	5
										Prom.	<b>213.51</b>	
10	28/06/11	12/07/11	14	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12938	2377	53460	298.53	5
2	28/06/11	12/07/11	14	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12950	2379	56800	317.18	5
3	28/06/11	12/07/11	14	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12891	2368	53580	299.20	5
										Prom.	<b>304.97</b>	
1	28/06/11	26/07/11	28	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12925	2374	65690	366.82	5
4	28/06/11	26/07/11	28	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12938	2377	67540	377.15	5
11	28/06/11	26/07/11	28	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12905	2371	64250	358.78	5
										Prom.	<b>367.59</b>	
6	28/06/11	23/08/11	56	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12833	2376	72750	406.25	5
7	28/06/11	23/08/11	56	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12950	2379	71510	399.32	5
12	28/06/11	23/08/11	56	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12940	2377	71440	398.93	5
										Prom.	<b>401.50</b>	

Tipo de Falla:

Tipo 1



Tipo 2



Tipo 3



Tipo 4



Tipo 5



Tipo 6



FORMULAS:

Peso Volumétrico:  $\text{Peso (kg)} / \text{Alt (cm)} \times \text{Area (cm}^2) \times 1000 =$

kg / m<sup>3</sup>

Resistencia a la Compresión:  $\text{Carga (kg)} / \text{Area (cm}^2) =$

kg / cm<sup>2</sup>

1 MPa = 9.81 kg/cm<sup>2</sup>



## Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

### Laboratorio de Investigaciones ISCYC

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
Cuscatlan La Libertad Tel. 505-0162 y 505-0163 Fax. 505-0164

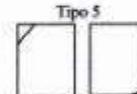
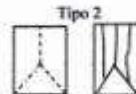


#### RESISTENCIA A LA COMPRESION ASTM C-39

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
 PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
 UBICACIÓN : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
 F. DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
 F. DE ENSAYO: 16 DE JUNIO DE 2011  
 LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
 REVISO: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

CILINDRO No.	FECHA Colado	FECHA Ruptura	EDAD (días)	REV. (pulg)	DIAM (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	PESO (g)	PES-VOL (kgm <sup>3</sup> )	CARGA (kg)	RESIST (kg/cm <sup>2</sup> )	TIPO DE FALLA
<b>Curado de Laboratorio (Estandar) MR 38 kg/cm<sup>3</sup>; Cemento 1167 HE</b>												
1	08/06/11	15/06/11	7	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12989	2386	27510	153.60	5
7	08/06/11	15/06/11	7	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12892	2368	22450	125.36	5
8	08/06/11	15/06/11	7	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12960	2381	24420	136.36	5
										Prom.	<b>138.44</b>	
2	08/06/11	22/06/11	14	2 3/4	15.1	30.4	179.1	13018	2391	32650	182.32	5
3	08/06/11	22/06/11	14	2 3/4	15.1	30.4	179.1	13040	2395	33170	185.23	5
9	08/06/11	22/06/11	14	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12969	2382	31030	173.28	5
										Prom.	<b>180.27</b>	
5	08/06/11	06/07/11	28	2 3/4	15.1	30.4	179.1	13003	2389	42550	237.61	5
4	08/06/11	06/07/11	28	2 3/4	15.1	30.4	179.1	13039	2395	42890	239.50	5
10	08/06/11	06/07/11	28	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12905	2371	37190	207.67	5
										Prom.	<b>228.26</b>	
11	08/06/11	02/08/11	56	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12930	2375	42840	239.22	5
6	08/06/11	02/08/11	56	2 3/4	15.1	30.4	179.1	13075	2402	45930	256.48	5
12	08/06/11	02/08/11	56	2 3/4	15.1	30.4	179.1	12905	2371	44950	251.01	5
										Prom.	<b>248.90</b>	

Tipo de Falla:



FORMULAS:

Peso Volumétrico:  $\text{Peso(g)} / \text{Alt(cm)} \times \text{Area(cm}^2) \times 1000 =$

kg / m<sup>3</sup>

Resistencia a la Compresión:  $\text{Carga (kg)} / \text{Area (cm}^2) =$

kg / cm<sup>2</sup>

1 MPa= 9.81 kg/cm<sup>2</sup>



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**

*Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El espino y Boulevard Sur Antiguo  
Cuscatlan, La Libertad Tel.243-7562 y 243-7563 Fax. 243-7564*



**ESFUERZO DE FLEXION EN CONCRETO**  
**(USANDO VIGA SIMPLE CON CARGA AL TERCIO)**  
**ASTM C-78**

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
UBICACIÓN : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
F. DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
F. DE ENSAYO: 15 DE JUNIO DE 2011  
LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
REVISO: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO MR =36 kg/cm<sup>2</sup>**

VIGA No.	FECHA Colado	FECHA Ruptura	EDAD (Días)	REV. (cm)	CLARO (L) (cm)	ANCHO (b) (cm)	PROFUNDIDAD (d) (cm)	MASA (g)	CARGA (P) (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
3	8/6/11	15/6/11	7	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	1970	24.97
4	8/6/11	15/6/11	7	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	2090	26.49
8	8/6/11	22/6/11	14	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	2520.0	31.95
7	8/6/11	22/6/11	14	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	2400	30.42
5	8/6/11	6/7/11	28	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	2840	36.00
6	8/6/11	6/7/11	28	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	3110.0	39.43
									<b>PROM. (28)</b>	<b>37.70</b>
1	8/6/11	2/8/11	60	2 1/2	46.0	15.3	15.3	---	3330.0	42.8
2	8/6/11	2/8/11	60	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	3520	44.62

**FORMULAS:**

Peso Volumétrico:  $Masa (g) / [Alto(cm) \times Largo(cm) \times Ancho(cm) \times 1000] = kg/m^3$   
Modulo de Ruptura:  $Carga (kg) \times Claro(cm) / Ancho(cm) \times [Profundidad(cm)]^2 = kg/cm^2$   
1 MPa= 9.81 kg/cm<sup>2</sup>

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**

*Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El espinoso y Boulevard Sur Antiguo  
 Cuscatlan, La Libertad Tel.243-7562 y 243-7563 Fax. 243-7564*



**ESFUERZO DE FLEXION EN CONCRETO**  
**(USANDO VIGA SIMPLE CON CARGA AL TERCIO)**  
**ASTM C-78**

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
 PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
 UBICACIÓN : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
 F. DE MUESTREO: \_\_\_\_\_  
 F. DE ENSAYO: 16 DE JUNIO DE 2011  
 LABORATORISTAS: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
 REVISOR: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO MR =45 kg/cm<sup>2</sup>**

VIGA No.	FECHA Colado	FECHA Ruptura	EDAD (días)	REV. (pulg)	CLARO (L) (cm)	ANCHO (B) (cm)	PROFUNDIDAD (D) (cm)	MASA (g)	CARGA (P) (kg)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
4	28/6/11	5/7/11	7	3	46.0	15.3	15.4	---	3170	40.17
3	28/6/11	5/7/11	7	3	46.0	15.3	15.3	---	2750	35.32
2	28/6/11	12/7/11	14	2 1/2	46.0	15.4	15.3	---	3550.0	45.30
7	28/6/11	12/7/11	14	2 3/4	46.0	15.4	15.4	---	3470	43.70
5	28/6/11	26/7/11	28	2 1/2	46.0	15.3	15.3	---	3790	48.36
1	28/6/11	26/7/11	28	2 1/2	46.0	15.3	15.4	---	3690.0	46.78
									<b>PROM. (28)</b>	<b>47.57</b>
5	28/6/11	23/8/11	56	2 1/2	46.0	15.4	15.4	---	4550.0	57.3
8	28/6/11	23/8/11	56	2 1/2	46.0	15.4	15.3	---	4180	53.34

**FORMULAS:**

Peso Volumétrico:  $Masa (g) / [Alto(cm) \times Largo(cm) \times Ancho(cm) \times 1000] = kg/m^3$   
 Modulo de Ruptura:  $Carga (kg) \times Claro(cm) / Ancho(cm) \times [Profundidad(cm)]^2 = kg/cm^2$   
 1 MPa= 9.81 kg/cm<sup>2</sup>

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$



## Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto Laboratorio de Investigaciones ISCYC

Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
Cuscatlan La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164



### VELOCIDAD DE PULSO A TRAVEZ DEL CONCRETO ASTM C- 597 V METER ( PULSO ULTRASONICO)

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
UBICACION : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_  
REALIZARON: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
REVISOR: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
OBSERVACION: PARA UN MR : 36 kg/cm<sup>2</sup>

Especimen No	Masa(lb)	volumen(pie <sup>3</sup> )	Peso Volumetrico(lb/ pie <sup>3</sup> )	DISTANCIA		TIEMPO (Micro seg)	Velocidad (m/s)	Velocidad (ft/s)	poisson Dinámico (μ)	Módulo de Elasticidad Dinámico psi (10 <sup>6</sup> )
				pulg	m					
7 dias										
1	28.58	0.19	148.64	11.970	0.305	71.1		12970	0.5	5.41 x 10 <sup>6</sup>
7	28.36	0.19	147.53	11.970		75.9		13175	0.5	5.55 x 10 <sup>6</sup>
8	28.51	0.19	148.31	11.970		75.2		13298	0.5	5.65 x 10 <sup>6</sup>
14 dias										
2	28.64	0.19	148.96	11.970	0.305	71.9		13908	0.5	6.22 x 10 <sup>6</sup>
3	28.67	0.19	149.22	11.970		72.4		13812	0.5	6.14 x 10 <sup>6</sup>
9	28.53	0.19	148.41	11.970		71.9		13908		6.18 x 10 <sup>6</sup>
28 dias										
5	28.53	0.19	148.79	11.970	0.305	73.0		13699		6.03 x 10 <sup>6</sup>
4	28.53	0.19	149.20	11.970		69.2		14451		6.67 x 10 <sup>6</sup>
10	28.53	0.19	147.68	11.970		69.9		14306		6.58 x 10 <sup>6</sup>
56 dias										
11	28.53	0.19	147.96	11.970	0.305	69.0		14493		6.71 x 10 <sup>6</sup>
6	28.53	0.19	149.62	11.970		68.8		14535		6.84 x 10 <sup>6</sup>
12	28.53	0.19	147.67	11.970		69.0		14493		6.71 x 10 <sup>6</sup>



**Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto**  
**Laboratorio de Investigaciones ISCYC**

*Urb. Madre Selva, 3<sup>ra</sup> etapa Av. El Espino y Boulevard Sur, Antiguo  
 Cuscatlan La Libertad Tel. 2505-0162 y 2505-0163 Fax. 2505-0164*



**VELOCIDAD DE PULSO A TRAVEZ DEL CONCRETO**  
**ASTM C- 597**  
**V METER ( PULSO ULTRASONICO)**

SOLICITANTE : GRUPO DE TESIS  
 PROYECTO : ESTUDIO DE COEFICIENTES DE EXPANSION Y CONTRACCION DEL CONCRETO HIDRAULICO  
 UBICACION : LABORATORIO DE INVESTIGACIONES ISCYC  
 FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_  
 REALIZARON: PERSONAL LABORATORIO ISCYC  
 REVISO: TECNICO JULIO HERNANDEZ  
 OBSERVACION: PARA UN MR : 45 kg/cm2

Especimen No	Masa(lb)	volumen(pie3)	Peso Volumetrico(lb/ pie3)	DISTANCIA		TIEMPO (Micro seg)	Velocidad (m/s)	Velocidad (ft/s)	Módulo de Elasticidad Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad Dinámico psi (10 <sup>6</sup> )
				pulg	m					
7 dias										
9			147.08	11.970	0.305	73.9		13532		5.0 x 10 <sup>6</sup>
5			147.60	11.970		71.8		13928		6.2 x 10 <sup>6</sup>
8			145.70	11.970		71.8		13928		6.11 x 10 <sup>6</sup>
14 dias										
10			148.05	11.970	0.305	70-9		14104		6.35 x 10 <sup>6</sup>
2			148.19	11.970		69.3		14430		6.65 x 10 <sup>6</sup>
3			147.52	11.970		70.4		14205		6.45 x 10 <sup>6</sup>
28 dias										
1			147.90	11.970	0.305	69.0		14493		6.71 x 10 <sup>6</sup>
4			148.05	11.970		68.6		14577		6.79 x 10 <sup>6</sup>
11			147.68	11.970		68.8		14535		6.75 x 10 <sup>6</sup>
56 dias										
6			148.00	11.970	0.305	68.4		14620		6.83 x 10 <sup>6</sup>
7			148.19	11.970		68.2		14653		6.87 x 10 <sup>6</sup>
12			148.07	11.970		68.4		14620		6.83 x 10 <sup>6</sup>

## ANEXO 5

Tabla de relación empírica entre el modulo de elasticidad estático, módulo de elasticidad dinámico y velocidad de pulso del concreto hidráulico.

Figure 17 shows the curves which may be used to determine both static and dynamic elastic modulus from pulse velocity measurements.

Table 3. Empirical relationship between static and dynamic moduli of elasticity and pulse velocity		
Pulse velocity	Modulus of elasticity	
	Dynamic	Static
ft/sec	psi	psi
11808	$3.48 \times 10^6$	$1.89 \times 10^6$
12464	3.77	2.18
13120	4.21	2.61
13776	4.64	3.19
14432	5.22	3.92
15088	6.09	4.93
15744	7.11	6.24
16400	8.41	7.54

#### 6.14 DETERMINATION OF THE DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY AND DYNAMIC POISSON'S RATIO

The relationship between elastic constants and the velocity of an ultrasonic compressional wave pulse in an isotropic elastic medium of infinite dimension is given by:

$$E_d = pV^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (1)$$

where

- $E_d$  = the dynamic elastic modulus (psi).
- $\mu$  = The dynamic Poisson's ratio.
- $p$  = the density (lbs/cu ft).
- $V$  = the compressional pulse velocity (ft/sec).

Also, the dynamic modulus of elasticity  $E_d$ , found from the longitudinal resonant frequency test (see ASTM C 215), is given by:

$$E_d = 4f_L^2 L^2 p \quad (2)$$

## ANEXO 6

Curva de relación entre velocidad de pulso con el módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto hidráulico.

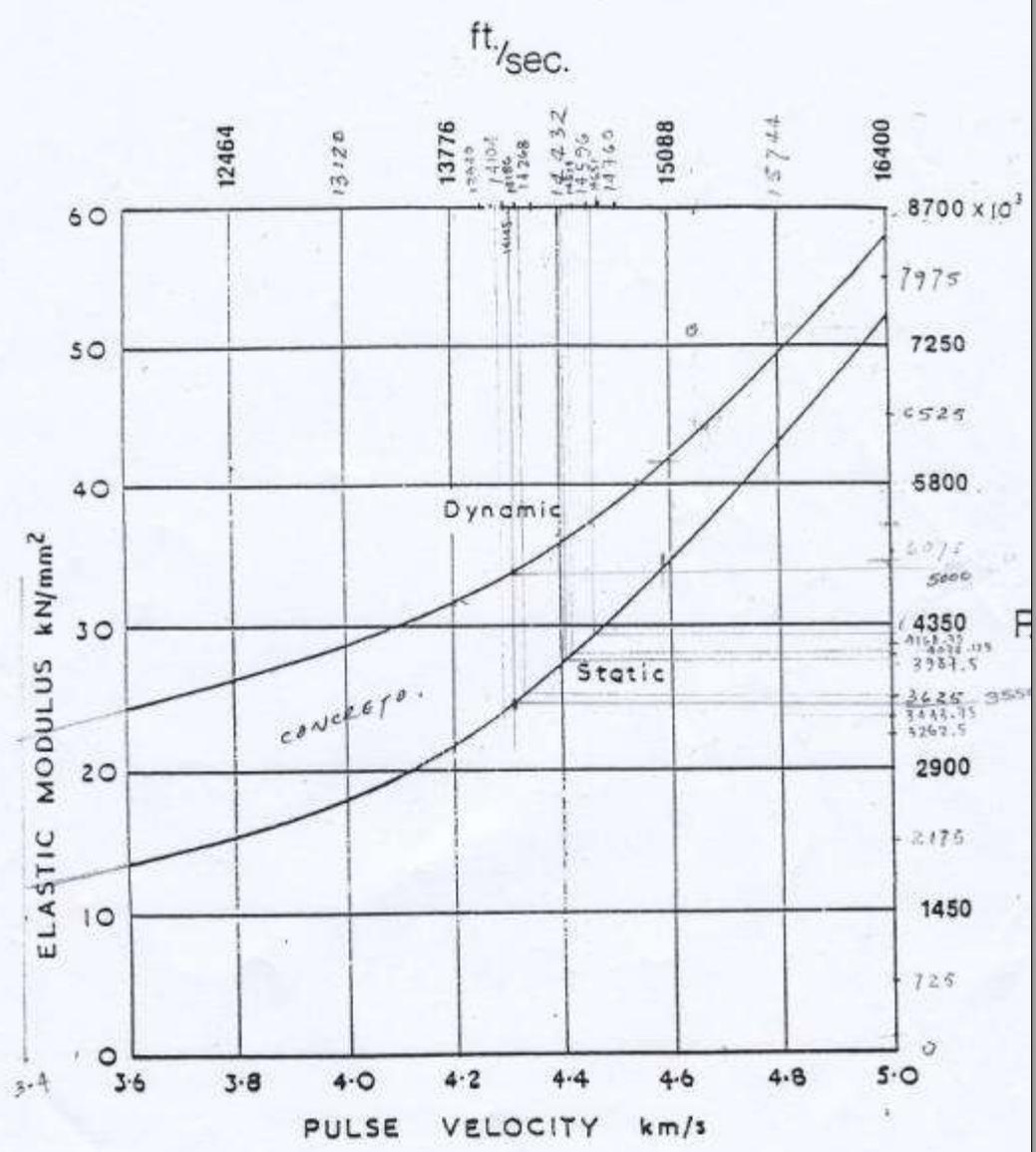


Fig. 17 Curves relating Pulse Velocity with Static and Dynamic Elastic Modulus

## ANEXO 7

Tabla de coeficientes de expansión térmica obtenidos de tesis  
Determinación del Coeficiente de Expansión Térmica del  
Concreto Hidráulico para Espaciamiento entre Juntas en  
Pavimentos de Concreto en El Salvador.

$$MR = 35 \text{ kg/cm}^2$$

Cantera	Resultados de coef. ( x 10-6 / °C )		Espaciamiento entre juntas L(m)
	Coef. Expans.	Coef. Contrac.	
La Pedrera	5.517	6.989	4.6
Aramuaca	7.047	5.147	4.6
El Carmen	5.14	6.486	4.8

Resultados de espaciamiento entre juntas para  $MR = 40 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días.

Cantera	Resultados de coef. ( x 10-6 / °C )		Espaciamiento entre juntas L(m)
	Coef. Expans.	Coef. Contrac.	
La pedrera	6.629	6.384	4.8
Aramuaca	3.787	7.635	4.4
El Carmen	3.679	6.377	4.9

**Nota 1:** Durante el desarrollo de la prueba, como se había mencionado en las limitantes, solo contamos con un micrómetro (deformímetro) y un montaje de acero inoxidable, esto no nos permitió desarrollar la prueba de modo que se lograra probar los dos cilindros que la norma exige como mínimo para determinar el coeficiente de expansión/contracción térmico promedio.

**Nota 2:** no se tomaron en cuenta los valores de los coeficientes de expansión térmica determinados a los siete y catorce días debido a que se encontró demasiada incongruencia con el valor teórico esperado en los siguientes aspectos:

- Algunos valores resultaron negativos

## ANEXO 8

Hojas de resultados de ejemplos de cálculos de diseño de juntas, utilizando el programa para diseño de pavimentos DARWin Pavement Design and Analysis System Versión 3.01.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**

A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product

**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 36 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 3.25 m y gradiente de 46°F

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	6 (10 <sup>-6</sup> in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	46 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.00045 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

	Calculated Results
Calculated Joint Opening	0.06 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.12 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.06 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	9.096226	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.69	-

\*Note: These values are not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

ANEXO 8.1: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, para  $M_R=36 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
 Rigid Structural Design Module

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 36 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de  $3.25\text{m} \times 3.25 \text{ m}$  y gradiente de  $66.2^\circ\text{F}$

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	6 (10 <sup>-6</sup> in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.00045 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.07 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.14 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.07 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	9.0966226	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.69	-

\*Note: These values are not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

ANEXO 8.2: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, para  $M_R=36 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 36 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 4.5 m y gradiente de 66.2°F

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	6 (10 <sup>-6</sup> in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.00045 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.10 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.20 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.10 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	9.0966226	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.69	-

\*Note: These values are not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

ANEXO 8.3: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, para  $M_R=36 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**

A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product

**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 45 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 3.25m y gradiente de 46°F

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	6 ( $10^{-6}$ in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	46 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.0002 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

	Calculated Results
Calculated Joint Opening	0.04 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.08 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.04 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	7.9545418	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.69	-

ANEXO 8.4: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, para  $M_R=45 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando datos de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**

A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product

**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 45 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de  $3.25\text{m} \times 3.25\text{m}$  y gradiente de  $66.2^\circ\text{F}$

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	6 ( $10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$ )
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.0002 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.05 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.10 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.05 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	7.9545418	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.69	-

ANEXO 8.5: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto cuadradas de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de  $66.2^\circ\text{F}$ , para  $M_R=45 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando datos de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 45 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 4.5 m y gradiente de 66.2°F

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	6 (10 <sup>-6</sup> in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.0002 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.07 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.14 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.07 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	7.9605834	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.70	-

ANEXO 8.6: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, para  $M_R=45 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando datos de contracción por secado y coeficientes de contracción térmica del concreto propuestos por AASHTO.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
 Rigid Structural Design Module

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 36 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 3.25 m y gradiente de 46°F (utilizando datos de la Investigación)

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	9.95 ( $10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$ )
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	46 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.000051 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.04 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.08 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.04 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	8.8057938	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.70	-

\*Note: These values are not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

ANEXO 8.7: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 46 °F, utilizando basálticos andecíticos como agregado; para  $M_R=36 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
 Rigid Structural Design Module

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 36 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 3.25 m y gradiente de 66.2°F (utilizando datos de la Investigación)

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	9.95 ( $10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$ )
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.000051 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.06 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.12 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.06 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	8.8034292	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	24.54	-

ANEXO 8.8: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado; para  $M_R=36 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 36 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 4.5 m y gradiente de 66.2°F (utilizando datos de la Investigación)

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	9.95 ( $10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$ )
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.000051 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.08 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.16 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.08 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	8.8034292	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	24.54	-

ANEXO 8.9: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado; para  $MR=36 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
 Rigid Structural Design Module

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 45 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de  $3.25\text{m} \times 3.25 \text{ m}$  y gradiente de  $46^\circ\text{F}$  (utilizando datos de la Investigación)

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	11.95 ( $10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$ )
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	46 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.000026 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.05 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.10 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.05 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	7.9605834	10.66
2	Base reciclado (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.70	-

ANEXO 8.10: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de  $46^\circ\text{F}$ , utilizando basaltos andecíticos como agregado; para  $M_R=45 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
 Rigid Structural Design Module

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 45 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de  $3.25\text{m} \times 3.25 \text{ m}$  y gradiente de  $66.2^\circ\text{F}$  (utilizando datos de la Investigación)

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	11.95 ( $10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$ )
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.000026 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.07 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.14 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.07 in

**Layer Information**

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	7.9605834	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.70	-

ANEXO 8.11: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 3.25 mts, gradiente térmico de  $66.2^\circ\text{F}$ , utilizando basaltos andecíticos como agregado; para  $M_R=45 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**  
 A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product  
 Rigid Structural Design Module

Ejemplo de Cálculo de Diseño de Juntas, considerando un concreto con  $M_r = 45 \text{ kg/cm}^2$   
 Losas de 3.25m x 4.5 m y gradiente de 66.2°F (utilizando datos de la Investigación)

**Joint Reservoir and Sealant Design**

PCC Coefficient of Thermal Contraction	11.95 ( $10^{-6}$ in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	66.2 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.000026 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.65
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5

Calculated Results

Calculated Joint Opening	0.09 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.19 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.09 in

**Layer Information**

<u>Layer</u>	<u>Material Description</u>	<u>Thickness</u> (in)	<u>One Dir</u> <u>Width</u> (ft)
1	JPCP	7.9605834	10.66
2	Base reciclada (pavimento flex. reciclado con cemento)	9.84	10.66
3	Base existente, remanente de 5.9 in en promedio	5.9	10.66
Total	-	23.70	-

ANEXO 8.12: Ejemplo de cálculo de diseño de juntas para losas de concreto de 3.25 mts. x 4.5 mts, gradiente térmico de 66.2 °F, utilizando basaltos andecíticos como agregado; para  $M_R=45 \text{ kg/cm}^2$ , utilizando coeficientes de contracción del concreto y coeficientes de expansión térmica del concreto determinados en El Salvador