

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA MADUREZ PARA LA ESTIMACIÓN  
DE TIEMPOS DE FRAGUADO Y RESISTENCIAS DE CONCRETOS  
INDUSTRIALIZADOS CON EL FIN DE CONOCER LA EDAD DE  
DESCIMBRADO.**

**MARIA CAMILA CASTRO GARRIDO  
MARIA CAMILA LÓPEZ GARZÓN**

Trabajo presentado para la obtención del título de ingeniero civil

**JESÚS ORLANDO CASTAÑO  
Ingeniero civil  
Director**

**YEZID ALEXANDER ALVARADO  
Ingeniero civil  
Co-director**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
BOGOTÁ  
2013**

## AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo de Grado, es un esfuerzo en el cual participaron varias personas, acompañándome, corrigiéndome, teniéndome paciencia, dándome ánimo, y apoyándome en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

A Dios por darme la oportunidad y el conocimiento para realizar esta carrera y permitirme seguir adelante con mis sueños.

A la Pontificia Universidad Javeriana, por darme la oportunidad de realizarme como profesional, también a mis profesores que durante todo mi tiempo de formación, han aportado un granito de arena de sus conocimientos para llegar a ser una gran profesional y un gran ser humano.

A mis padres Augusto y Euling, por su paciencia y apoyo en cada momento.

A mis hermanos, Alejandro, por el tiempo que no he compartido con él y su amor. A Juliana Castro, gracias por su apoyo, preocupación y amistad.

Mil Gracias a Andrés Caicedo por su amor, paciencia, por su apoyo, su respaldo. Muchas gracias.

También me complace agradecer al Ing. Andrés Santacruz por el apoyo, que me brindó por su gran capacidad para que mi interés creciera en la investigación de este tema, por la confianza que deposito en mí, y estuvo siempre pendiente y presente ante cualquier duda o iniciativa que tuviera.

Al Ingeniero Juan Carlos Silva por su apoyo incondicional y sus conocimientos.

De igual manera a nuestros directores de TESIS, Ing. Jesús y Ing. Yesid Alvarado, por aceptar nuestro tema de Investigación propuesto; quienes con sus conocimientos, experiencias, paciencia, motivación y por su visión crítica, hicieron posible este trabajo de grado.

A los laboratoristas de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, muchísimas gracias por ese respaldo inmenso que nos brindaron; por todo su tiempo Al Ing. Jorge Camilo Díaz, Ing. Pedro Escobar y los ingenieros de calidad les agradezco por su paciencia, experiencia, conocimientos brindados a mi propuesta y gran ayuda recibida por ustedes.

Un inmenso agradecimiento a la Empresa Cemex por poner a disposición todos sus recursos; facilitando con ellos la realización de los ensayos de nuestra TESIS.

A mi compañera, María Camila López, por su compañía, amistad, lealtad, dedicación, esfuerzo y paciencia y su gran ayuda para que este Trabajo de Grado fuera posible.

Finalmente agradezco a las personas que no alcanzo a nombrar, pero que han sido parte importante directa e indirectamente en la formación de mi carrera.

*María Camila Castro Garrido.*

## AGRADECIMIENTOS

Me invaden sentimientos de agradecimiento al culminar mi trabajo de grado, siendo este un logro importante en la culminación de mi carrera.

Quisiera empezar agradeciéndole a mis directores de tesis, a Jesús Castaño quien siempre nos acompañó con sus acertados consejos y acepto ser nuestro guía en este trabajo de grado. A Yezid Alvarado quien estuvo con nosotras en cada momento, nos aconsejó y nos enseñó, siempre estuvo dispuesto a escucharnos y apoyarnos.

Por otra parte, quiero agradecer especialmente a el personal del laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Javeriana, sin ellos no nos hubiera sido posible realizar este trabajo, gracias por tener las disposición de ayudarnos en todo momento.

Adicionalmente, quiero agradecerle a mi compañera de tesis María Camila Castro, con quien estuve a lo largo de este proyecto, quien siempre fue comprensiva y tuvo buena disposición para seguir, aun en los momentos críticos.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia que me ha acompañado en cada paso de mi vida. A mi mamá que siempre tiene una sonrisa para apoyarme, a Juli quien siempre ha tenido la capacidad de hacerme sentir bien en los momentos difíciles, a mi papá que siempre ha creído en mí incondicionalmente y por ultimo a mi hermana, que es la persona que me ha apoyado en todo, que ha sido mi mejor amiga y siempre ha tenido fe en mí.

*María Camila López Garzón.*

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO .....	4
INDICE DE FIGURAS .....	7
INDICE DE TABLAS .....	10
NOTACION .....	13
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	15
1.1    Introducción.....	15
1.2    Objetivos.....	16
CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1    Introducción.....	17
2.2    Sistemas Industrializados Y Procesos.....	17
2.2.1    Ventajas de los Sistemas Industrializados .....	18
2.2.2    Proceso Constructivo .....	18
2.3    Método de la Madurez .....	18
2.3.1    Madurez .....	18
2.3.2    Función de Madurez – Factor de Tiempo Temperatura.....	19
2.3.3    Función de Madurez - Edad Equivalente.....	19
2.3.4    Energía de Activación.....	20
2.3.5    Relación entre Índice de Madurez y Resistencia .....	23
2.3.6    Investigaciones Previas Madurez y Energía de Activación .....	24
2.4    Estimación de Plazo de Descimbrado.....	28
2.4.1    Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986).....	28
CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL .....	31
3.1    Introducción.....	31
3.2    Mezclas de Concreto en Estudio.....	31
3.2.1    Características de las Mezclas de Concreto .....	31
3.2.2    Diseños de Mezcla.....	31
3.3    Caracterización de Materias Primas .....	32
3.3.1    Cemento.....	32
3.3.2    Agregado Fino .....	32
3.3.3    Agregado Grueso .....	34
3.3.4    Aditivos .....	36
3.4    Ensayos de Laboratorio Para las Mezclas Concreto.....	37
3.4.1    Elaboración del Concreto .....	37
3.4.2    Ensayo de Asentamiento.....	39
3.4.3    Tiempos de Fraguado de Concreto .....	40
3.4.4    Fabricación de Cilindros de Concreto .....	41
3.4.5    Fabricación de Vigas de Concreto .....	42
3.4.6    Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto .....	42

3.4.7	Ensayo de Tracción Indirecta en Cilindros.....	43
3.4.8	Ensayo Flexión en Vigas .....	44
3.4.9	Módulo de Elasticidad .....	45
3.5	Determinación de Energía de Activación y Curva de Madurez .....	46
3.5.1	Diseño de Mezcla para Mortero.....	46
3.5.2	Mezclado de Mortero.....	47
3.5.3	Ensayo de Tiempos de Fraguado de Mortero .....	48
3.5.4	Resistencia a la Compresión de Cubos de Mortero .....	48
3.5.5	Instrumentación de Temperatura .....	50
3.6	Instrumentación en Campo .....	51
3.6.1	Elaboración e Instrumentación de Cilindros en Obra .....	51
3.6.2	Instrumentación del Elemento de Concreto.....	52
CAPITULO 4. RESULTADOS DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL.....		53
4.1	Introducción.....	53
4.2	Propiedades Mecánicas del Concreto .....	53
4.2.2	Resistencia a la Flexión .....	55
4.2.3	Resistencia a la Tracción Indirecta .....	58
4.2.4	Módulo de Elasticidad .....	60
4.2.5	Resumen Propiedades Físico – Mecánicas .....	62
4.2.6	Tiempos de Fraguado de Concreto .....	63
4.3	Determinación de Energía de Activación .....	66
4.3.1	Tiempos de Fraguado de Mortero.....	66
4.3.2	Resistencias de Cubos de Mortero.....	68
4.3.3	Determinación de la Constante de Velocidad $k$ .....	70
4.3.4	Determinación de la Energía de Activación .....	77
4.3.5	Edad Equivalente .....	80
4.3.6	Relación del Índice de Madurez y Resistencia – Curva de Madurez.....	81
4.3.7	Calibración de Curva de Madurez con los Cilindros en Obra .....	84
CAPITULO 5. APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO .....		88
5.1	Introducción.....	88
5.2	Determinación de la Resistencia de Descimbrado.....	88
5.2.1	Cálculo del coeficiente $\beta$ .....	89
5.2.2	Relación entre la Resistencia a Tracción y la Resistencia a Compresión .....	90
5.2.3	Ecuación en Términos de Resistencia a Compresión para Determinar la Resistencia de Descimbrado .....	91
5.3	Determinación de la Edad Equivalente del Elemento.....	92
5.3.1	Edad equivalente en los Puntos Instrumentados del Elemento.....	93
5.3.2	Determinación de Tiempos de Fraguado .....	93
5.3.3	Estimación de Edad de Descimbrado .....	94
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE NUEVAS INVESTIGACIONES		96

7.1	Conclusiones.....	96
7.2	Propuestas de Nuevas Investigaciones .....	97
	REFERENCIAS .....	98
	ANEXOS .....	101
	Anexo 1 Resistencia a la Compresión .....	101
	Anexo 2 Resistencia a Flexión .....	105
	Anexo 3 Resistencia A Tracción Indirecta.....	107
	Anexo 4 Módulo de Elasticidad .....	111
	Anexo 5 Tiempos de Fraguado Concreto.....	113
	Anexo 6 Tiempos de Fraguado Mortero .....	114
	Anexo 7 Resistencia a Compresión en Mortero .....	117

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema Industrializado Mano-Portables.....	18
Figura 2.2 Inverso del Esfuerzo Vs Inverso de la Edad desde el Tiempo Final de Fraguado (ASTM C 1074 -11). .....	21
Figura 2.3 Logaritmo Natural De $K$ Vs Inverso de la Temperatura en Grados Kelvin. (ASTM C 1074 -11) .....	23
Figura 2.4 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Factor Tiempo – Temperatura (ASTM C 1074 -11) .....	23
Figura 2.5 Relación entre la Resistencia a la Compresión y la Edad Equivalente (ASTM C 1074 -11) .....	24
Figura 2.6 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Logaritmo base diez de la Edad Equivalente (ASTM C 1074 -11).....	24
Figura 2.7 Relación entre el $\Delta T_{max}$ del perfil calorimétrico y la resistencia a compresión a diferentes edades para el concreto Outinord (Díaz, 2004).....	25
Figura 2.8 Resistencia relativa vs edad equivalente con diferentes humedades. (Liao et al. 2008).....	25
Figura 2.9 Temperatura del concreto en las cámaras de curado .....	26
Figura 2.10 Edad equivalente de tiempo de fraguado vs dosificación de aditivos retardantes (Lachemi et. la 2007).....	27
Figura 2.11 Resistencia a la compresión vs edad de falla (Voigt et. al 2006).....	27
Figura 3.1 Granulometría Agregado Fino.....	33
Figura 3.2 Granulometría Grava ½” .....	34
Figura 3.3 Granulometría Grava 1” .....	36
Figura 3.4 Mezcladora Domat 150 litros – Universidad Javeriana .....	39
Figura 3.5 Ensayo de asentamiento .....	39
Figura 3.6 Asentamiento Mezcla de Concreto Outinord muro y Outinord Placa.....	40
Figura 3.7 Ensayo de Tiempos de Fraguado.....	40
Figura 3.8 Fabricación de Cilindros de Concreto .....	41
Figura 3.9 Ensayo de Resistencia a la Compresión Cilindros de Concreto.....	43
Figura 3.10 Montaje Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta Cilindros de Concreto	43
Figura 3.11 Montaje Ensayo de Resistencia a la Flexión en Vigas de Concreto.....	44
Figura 3.12 Rotura de la Viga de Concreto .....	44
Figura 3.13 Montaje ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de concreto .....	46
Figura 3.14 Mezcladora para mortero .....	47
Figura 3.15 Cubos de mortero .....	48
Figura 3.16 Ensayo De Resistencia a la Compresión Cubos de Mortero .....	49
Figura 3.17 Instrumentación en cilindros .....	50
Figura 3.18 Montaje medición de temperatura.....	51
Figura 3.19 Montaje medición de temperatura.....	51
Figura 3.20 Instrumentación Placa – Obra Punta del Este.....	52

Figura 4.1 Resistencia a la Compresión Placa.....	54
Figura 4.2 Resistencia a la Compresión Muro.....	54
Figura 4.3 Resistencia a la Flexión Placa.....	56
Figura 4.4 Resistencia a la Flexión Muro.....	56
Figura 4.5 Falla Viga por Flexión.....	57
Figura 4.6 Resistencia a la Tracción Indirecta Placa.....	59
Figura 4.7 Resistencia a la Tracción Indirecta Muro.....	59
Figura 4.8 Falla por Tracción Indirecta.....	60
Figura 4.9 Modulo de Elasticidad Placa.....	61
Figura 4.11 Tiempo de Fraguado Concreto Muro – Método Gráfico.....	64
Figura 4.12 Tiempo de fraguado concreto muro – método logarítmico.....	64
Figura 4.13 Tiempo de Fraguado Concreto Placa – Método Gráfico.....	65
Figura 4.14 Tiempo de fraguado concreto placa – método logarítmico.....	65
Figura 4.15 Evolución del fraguado –mortero placa.....	66
Figura 4.16 Evolución del Fraguado –Mortero Muro.....	67
Figura 4.17 Evolución de la Resistencia a la Compresión Mortero – Placa.....	68
Figura 4.18 Evolución de la Resistencia a la Compresión Mortero – Muro.....	69
Figura 4.19 Primer Método – T= 6° C Placa.....	70
Figura 4.20 Primer Método – T= 13° C Placa.....	71
Figura 4.21 Primer Método – T= 23° C Placa.....	71
Figura 4.22 Primer método – T= 6° C Muro.....	72
Figura 4.23 Primer Método – T= 23° C Muro.....	72
Figura 4.24 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer método T= 6° C- Placa.....	75
Figura 4.25 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer método T= 13° c- Placa.....	75
Figura 4.26 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer método t= 23° C- Placa.....	76
Figura 4.27 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer Método T= 6° C- Muro.....	76
Figura 4.28 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer Método T= 23° C- Muro.....	77
Figura 4.29 Determinación de Q para el primer método -Placa.....	78
Figura 4.30 Determinación de Q para el segundo método – placa.....	78
Figura 4.31 Determinación de Q para el tercer método – Placa.....	78
Figura 4.32 Determinación de Q para el primer método – Muro.....	79
Figura 4.33 Determinación de Q para el segundo método – Muro.....	79
Figura 4.34 Determinación de Q para el tercer método – Muro.....	80
Figura 4.35 Perfil Térmico.....	81
Figura 4.36 Curva de madurez Placa.....	82
Figura 4.37 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Log10 de la edad equivalente Placa.....	82



Figura 4.38 Curva de madurez muro .....	83
Figura 4.39 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el log10 de la Edad Equivalente - Muro .....	83
Figura 4.40 Perfiles Térmicos Cilindros en Obra .....	84
Figura 5.1 Perfil Térmico de los Puntos Instrumentados.....	92
Figura 5.2 Comparación de Edades Equivalentes en los Puntos Instrumentados.....	93
Figura 5.3 Determinación de Edad Equivalente para Tiempo de Fraguado Inicial y Final en Placa .....	93

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Relación de resistencias en función de la resistencia a compresión del hormigón.	28
Tabla 3.1 Diseño de Mezcla Outinord Muro Cemex por m <sup>3</sup> .....	32
Tabla 3.2 Diseño de Mezcla Outinord Placa Cemex por m <sup>3</sup> .....	32
Tabla 3.3 Características del Cemento Cemex Caracolito .....	32
Tabla 3.4 Resistencia a la Compresión de Cemento Cemex Caracolito.....	32
Tabla 3.5 Granulometría Agregado Fino.....	33
Tabla 3.6 Características Agregado Fino.....	33
Tabla 3.7 Granulometría Agregado Grueso ½” .....	34
Tabla 3.8 Características Generales Agregado Grueso ½” .....	35
Tabla 3.9 Granulometría Agregado Grueso 1” .....	35
Tabla 3.10 Características Generales Agregado Grueso 1” .....	36
Tabla 3.11 Diseño de Mezcla Corregido Outinord Muro Cemex por m <sup>3</sup> .....	38
Tabla 3.12 Diseño de Mezcla Corregido Outinord Placa Cemex por m <sup>3</sup> .....	38
Tabla 3.13 Cantidad de Cilindros .....	42
Tabla 3.14 Cantidad de Vigas.....	42
Tabla 3.15 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Placa.....	47
Tabla 3.16 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Muro .....	47
Tabla 3.17 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Placa Corregido .....	47
Tabla 3.18 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Muro Corregido .....	47
Tabla 3.19 Cantidad de Cubos de Mortero – Muro .....	49
Tabla 3.20 Cantidad de Cubos de Mortero – Placa .....	49
Tabla 4.1 Resumen de Resistencias a la Compresión Placa .....	53
Tabla 4.2 Resumen de Resistencias a la Compresión Muro.....	53
Tabla 4.3 Porcentaje de Evolución de Resistencia a la Compresión – Placa.....	55
Tabla 4.4 Porcentaje de Evolución de Resistencia a la Compresión – Muro .....	55
Tabla 4.5 Resumen de Resistencias a Flexión Placa. ....	55
Tabla 4.6 Resumen de Resistencias a Flexión Muro. ....	55
Tabla 4.7 Comparación de Resistencia a la Flexión con la NSR 10 Placa.....	57
Tabla 4.8 Comparación de Resistencia a la Flexión con la NSR 10 Muro.....	58
Tabla 4.9 Resumen de Resistencias a la Tracción Indirecta Placa. ....	58
Tabla 4.10 Resumen de Resistencias a la Tracción Indirecta Muro. ....	58
Tabla 4.11 Resumen Modulo de Elasticidad Placa.....	60
Tabla 4.12 Resumen Módulo de Elasticidad Muro .....	60
Tabla 4.13 Comparación de Módulo Placa.....	62
Tabla 4.14 Comparación de Módulo Muro .....	62
Tabla 4.15 Resumen Propiedades Mecánicas Muro .....	62
Tabla 4.16 Resumen Propiedades Mecánicas Placa .....	63
Tabla 4.17 Evolución de Propiedades Mecánicas Placa.....	63

Tabla 4.18 Evolución de Propiedades Mecánicas Muro.....	63
Tabla 4.19 Tiempos de fraguado de concreto.....	66
Tabla 4.20 Tiempos de Fraguado - Mortero Placa .....	67
Tabla 4.21 Tiempos de fraguado de mortero muro .....	67
Tabla 4.22 Resistencias Mortero - Placa .....	68
Tabla 4.23 Resistencias Mortero – Muro.....	69
Tabla 4.24 Determinación de la constante de velocidad $k$ primer método – T=6°C Placa.....	70
Tabla 4.25 Determinación de la constante de velocidad $k$ primer método – T=13°C Placa...	71
Tabla 4.26 Determinación de la constante de velocidad $k$ primer método – T=23°C Placa...	71
Tabla 4.27 Determinación de la constante de velocidad $k$ primer método – T=6°C Muro ....	72
Tabla 4.28 Determinación de la constante de velocidad $k$ primer método – T=23°C Muro ..	73
Tabla 4.29 Resultados constante de velocidad $k$ segundo método – T=6°C Placa.....	73
Tabla 4.30 Resultados constante de velocidad $k$ segundo método – T=13°C Placa.....	73
Tabla 4.31 Resultados constante de velocidad $k$ segundo método – T=23°C Placa.....	74
Tabla 4.32 Resultados constante de velocidad $k$ segundo método – T=6°C Muro .....	74
Tabla 4.33 Resultados constante de velocidad $k$ segundo método – T=23°C Muro.....	74
Tabla 4.34 Resultados constante de velocidad $k$ Tercer método Placa.....	76
Tabla 4.35 Resultados constante de velocidad $k$ Tercer método Muro .....	77
Tabla 4.36 Energía de Activación Placa.....	79
Tabla 4.37 Energía de Activación Muro.....	80
Tabla 4.38 Relación del Índice de Madurez y Resistencia – Curva de Madurez Placa.....	82
Tabla 4.39 Relación del Índice de Madurez y Resistencia – Curva de Madurez Muro.....	83
Tabla 4.40 Resistencia a la Compresión Cilindros de Obra - Placa .....	85
Tabla 4.41 Resistencia a la Compresión Cilindros de Obra - Muro .....	85
Tabla 4.42 Valores de Edad Equivalente Cilindros en Obra – Placa.....	85
Tabla 4.43 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Placa – Primer Método.....	85
Tabla 4.44 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Placa – Segundo Método.....	85
Tabla 4.45 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Placa – Tercer Método.....	86
Tabla 4.46 Valores de Edad Equivalente Cilindros en Obra – Muro .....	86
Tabla 4.47 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Muro – Primer Método.....	86
Tabla 4.48 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Muro – Segundo Método.....	86
Tabla 4.49 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Muro – Tercer Método.....	86
Tabla 5.1 Relación de Resistencias en Función de la Resistencia a Compresión del Concreto .....	88
Tabla 5.2 Evaluación de Cargas de Construcción .....	89

Tabla 5.3 Evaluación de Cargas de Diseño (Titulo B NSR – 10) .....	89
Tabla 5.4 Factores de Mayoración para Cargas de Construcción.....	90
Tabla 5.5 Factores de Mayoración para Cargas de Diseño.....	90
Tabla 5.6 Determinación de Coeficientes de Correlación .....	91
Tabla 5.7 Edad Equivalente para Tiempos de Fraguado Inicial y Final en Laboratorio .....	94
Tabla 5.8 Tiempos de Fraguado Inicial y Final para Cada Punto del Elemento .....	94
Tabla 5.9 Edad de Descimbrado para Cada Punto de la Placa .....	94

## NOTACION

$A$ : Área de la superficie ( $\text{mm}^2$ ) .....	47
$a$ : Distancia Promedio entre la línea de fractura y el soporte ms cercano , medida sobre la zona de tensión de la viga (m) .....	43
$A$ : Factor de frecuencia .....	18
$abs$ : Absorción de la muestra (%) .....	35
$b$ : Ancho Promedio de la Muestra (m) .....	42
$d$ : Altura promedio de la muestra (m) .....	42
$D$ : Cargas muertas de diseño (kN).....	27
$d$ : Diámetro del Cilindro (m).....	41
$D_c$ : Cargas muertas en el proceso de construcción (kN) .....	27
$E$ : Energía de activación (kJ/mol).....	17
$E$ : Módulo de Elasticidad (MPa) .....	43
$F$ : Fuerza ejercida por la aguja (N).....	38
$F's$ : Factor de mayoración para las cargas de construcción. ....	28
$f_c'$ : Resistencia a Compresión (MPa) .....	55
$f_{ct,28}$ : Resistencia a tracción de diseño (MPa).....	27
$f_{ct,28}$ : Resistencia a tracción de diseño (MPa).....	27
$f_{ct,j}$ : Resistencia a tracción en un tiempo j (MPa).....	27
$f_m$ : Resistencia a la Compresión (MPa) .....	47
$f_r$ : Módulo de Rotura (MPa) .....	55
$F_s$ : Factor de mayoración de diseño. ....	28
$k$ : Constante de velocidad (1/h) .....	18, 19
$L$ : Cargas vivas de diseño (kN) .....	28
$L$ : Longitud del Cilindro (m) .....	41
$L$ : Longitud Libre entre Apoyos (m) .....	42
$L_c$ : Cargas vivas en el proceso de construcción (kN) .....	28
$M(t)$ : Factor de tiempo-temperatura a la edad t ( $^{\circ}\text{C h}$ ) .....	17
$P$ : Carga Máxima (kN) .....	41
$P$ : Carga total de diseño (kN) .....	27
$Q$ : Carga actuante al descimbrar (kN).....	27
$Q$ : está dada por la ecuación (2.4) .....	18
$R$ : Constante universal de los gases (8.3144 J/K mol).....	18
$R$ : Módulo de Rotura (MPa).....	42
$r$ : Radio de la aguja (mm).....	38
$R$ : Resistencia a la penetración (MPa).....	38
$S$ : Promedio de las resistencias a compresión de los cubos a la edad t (MPa) .....	19
$S_1$ : Resistencia correspondiente a una deformación de 0,00005 (MPa) .....	43
$S_2$ : Resistencia correspondiente al 40% de la resistencia ultima (MPa) .....	43
$S_u$ : Esfuerzo limite (MPa).....	19
$t$ : Edad de los cubos de mortero (días) .....	19
$T$ : Esfuerzo de Tracción Indirecta (MPa) .....	41
$T$ : Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	18
$t_0$ : Edad supuesta donde se empieza a desarrollar la resistencia (días).....	19
$T_0$ : Temperatura de referencia ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	17
$T_a$ : Media de la temperatura durante el intervalo $\Delta t$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	17
$T_a$ : Media de la temperatura durante el intervalo $\Delta t$ (K).....	18
$t_R$ : Edad equivalente a la temperatura de referencia (h).....	17
$T_r$ : Temperatura de referencia ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	17
$T_s$ : Temperatura de referencia (K) .....	18
$w$ : Humedad de la muestra (%) .....	35
$W_j$ : Masa del recipiente y del espécimen húmedo (g).....	35

$W_2$ : Masa del recipiente y del espécimen seco (g).....	35
$w_a$ : Peso del agregado (g) .....	35
$W_c$ : Masa del recipiente .....	35
$\alpha$ : Factor de reducción .....	27
$\Delta t$ : Intervalo de tiempo .....	18
$\Delta t$ : Intervalo de tiempo (h).....	17
$\epsilon_2$ : Deformación longitudinal correspondiente a $S_2$ .....	43
$\lambda$ : Factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión.....	55

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El sistema de construcción en concreto industrializado, se basa en un sistema estructural conformado únicamente por muros y placas de concreto. Este sistema se utiliza con mayor frecuencia en Colombia, ya que permite acelerar los procesos constructivos de forma económica y práctica. Lo anterior permite crear una producción en serie modulada por medio del uso de formaleta metálica, por lo que es muy popular en la construcción de viviendas de interés social (Díaz et al. 2004). Para mejorar el tiempo de construcción y lograr mayor economía, se deben optimizar los tiempos de uso de la formaleta mediante el descimbrado de la estructura en el menor tiempo posible, esto, se debe realizar teniendo en cuenta la edad en la que el concreto alcanza la resistencia para soportar las cargas que se generan durante el proceso constructivo (Alvarado, 2009).

Teniendo en cuenta que la rotación de la formaleta en el sistema constructivo industrializado permite disminuir los plazos de construcción con respecto a sistemas que emplean concretos convencionales, el concreto para sistemas industrializados debe tener características especiales, refiriéndose principalmente a resistencias a edades tempranas ya que los entresijos y muros estarán sometidos a cargas en edades jóvenes (Díaz et al. 2004).

La medición de la resistencia es importante dado que determina los plazos del descimbrado, para este fin, se debe contar con equipos calibrados. Esto es factible en sistemas constructivos con concretos convencionales; ya que los tiempos de retiro de formaleta son aproximadamente a los 14 días y desapuntalamiento a los 28 días, por esta razón, los cilindros tomados en obra pueden ser enviados al laboratorio y de esta forma tener control sobre la resistencia.

Contrario a esto; en sistemas constructivos en los cuales se utilizan concretos industrializados, los tiempos de retiro de formaleta no van más allá de las 24 horas incluso 12 horas, haciendo que el método para medir las resistencias sea inviable; pues se debería contar con los equipos en la obra. Por esta razón, la decisión de quitar las formaletas se hace con base en la experiencia del constructor, esto ocurre debido a que las normas técnicas no dan parámetros explícitos en cuanto a los plazos para descimbrar la estructura (Alvarado, 2009). Para esto el constructor se basa en su experiencia y en la ficha técnica del concreto la cual contiene los tiempos de fraguado final, que es la edad que recomiendan los productores de concreto para descimbrar. (Castelli, 2012).

Por lo anterior; surge la necesidad de implementar un método que con menor incertidumbre, que permita a los constructores tener herramientas técnicas para tomar decisiones en cuanto al desencofre y a la programación de las obras, teniendo en cuenta que la rotación de la formaleta se podría hacer de una forma más eficiente. Esto, se puede lograr mediante la implementación del método de la madurez; el cual, se ha utilizado en las últimas décadas de forma exitosa, para la estimación de la resistencia in situ del concreto, basándose en su comportamiento térmico (Lachemi et al. 2007). Este método, tiene menor incertidumbre ya que la determinación de la curva de madurez para el concreto que se utiliza se realiza en condiciones controladas de laboratorio, por lo que en obra solo es necesario medir el desarrollo de la temperatura de la mezcla en el elemento. Esto hace que el uso de este método resulte más fiable, dado que hay menos parámetros que afecten los resultados; además es sencillo, porque no toma mucho tiempo y no requiere personal especializado y resulta ser económico ya que el equipo de medición de temperatura es de fácil acceso para los constructores.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general de este trabajo de grado, es determinar tiempos de fraguado y resistencias a edades tempranas de concretos industrializados por medio del método de la madurez con el fin de conocer la edad de descimbrado.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar las propiedades físico – mecánicas de las mezclas de concreto industrializado para muros y placas en el laboratorio.
- Determinar tiempos de fraguado y resistencias a edades tempranas de concretos industrializados mediante el método de madurez.
- Estimar la resistencia y los tiempos de fraguado de concretos industrializados a través de mediciones técnicas en obra.



## CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

Los sistemas constructivos industrializados, consisten en construcción en serie, lo que permite acortar tiempo y costo. En dichos sistemas constructivos los tiempos de retiro de formaleta no van más allá de las 24 horas, por lo que surge la necesidad de implementar un método que permita dar herramientas técnicas para tomar decisiones en cuanto al tiempo de desencofrado, lo cual se puede lograr por medio de la implementación del método de la madurez.

Diferentes autores han estudiado el método de la madurez, el cual permite la estimación de las resistencias del concreto in situ basándose en su comportamiento térmico, esto se hace mediante la estimación de la edad equivalente a una temperatura específica. Este método ha sido utilizado con éxito en la última década, sin embargo el estudio de la función de madurez en edades tempranas ha sido escaso (Lachemi, 2006).

En este capítulo se pretende establecer los antecedentes y estado actual de conocimiento que motivan el desarrollo del presente trabajo de grado. En la primera parte, se describirán los sistemas industrializados y sus procesos, seguidamente se hace una evaluación de la evolución de las propiedades del concreto y el método de la madurez, y por último se realiza una descripción del método generalmente empleado para la determinación del plazo de descimbrado.

### 2.2 Sistemas Industrializados Y Procesos

El sistema de construcción en concreto industrializado se basa en un sistema estructural, conformado únicamente por muros y placas de concreto, este sistema se empezó a implementar en Colombia por el Instituto de Crédito Territorial y el Banco Central Hipotecario en la década de los ochenta con el fin de producir vivienda de forma masiva en corto tiempo, para dar respuesta al déficit habitacional, desde entonces, este sistema ha sido usado con mayor frecuencia en nuestro país (Caro, 2012). (Véase Figura 2.1).

Un sistema de construcción industrializada consiste en un esquema de construcción basado en una adecuada planeación de tareas, presupuesto, utilización de equipos y de materiales que permiten obtener elevados rendimientos en obra. Esto permite optimizar los recursos, sin afectar las condiciones económicas y la generación de empleo.



### **2.2.1 Ventajas de los Sistemas Industrializados**

En las últimas décadas se han realizado grandes esfuerzos para el desarrollo de los sistemas industrializados modulares, debido a las enormes ventajas que se han observado alrededor dichos sistemas.

Los sistemas industrializados tienen las siguientes ventajas sobre los sistemas convencionales (Huang et al. 2004):

- El tiempo de montaje se acorta considerablemente
- Las formaletas pueden ser reutilizadas gran cantidad de veces lo que se ve reflejado en menos pérdida de material y aumento de la rentabilidad.
- Las formaletas pueden ser utilizadas en diferentes proyectos debido a que la mayoría de veces el diseño arquitectónico es con medidas estandarizadas.
- El acabado liso del concreto reduce las horas de mano de obra en cuanto a los acabados.
- La formaleta usada en sistemas industrializados resulta más segura debido a su resistencia.

### **2.2.2 Proceso Constructivo**

Existen dos tipos de sistemas constructivos industrializados, el primero consiste en elementos de concreto prefabricado que son ensamblados, el segundo se refiere a concreto vaciado in situ. Este último, se puede dividir en seis etapas constructivas básicas:

- Colocación de formaleta
- Vaciado de la placa
- Retirada de formaletas y desapuntado
- Reapuntado
- Vaciado de placa nivel superior
- Desapuntado o descimbrado final

La etapa más crítica de este proceso, es el momento en el que las formaletas son retiradas transcurrido un día, la placa está sometida a una carga importante debido al vaciado de la planta superior (Alvarado et al. 2009).

## **2.3 Método de la Madurez**

El método de la madurez se desarrolló en el año de 1950, introduciendo el concepto de madurez, el cual, describe el proceso de hidratación del concreto, este depende del tiempo y la temperatura desarrollada (Waller, 2004). A lo largo de los últimos años este método ha sido utilizado con éxito en la determinación de la resistencia del concreto in situ por medio del historial de temperatura.

### **2.3.1 Madurez**

La madurez se refiere al grado y la velocidad de hidratación del cemento presente en una mezcla de concreto, la cual es una función del historial de temperatura y el tiempo en el periodo de curado (ASTMC1074, 2011).

### 2.3.2 Función de Madurez – Factor de Tiempo Temperatura

La función de madurez, se refiere a la expresión matemática que relaciona el historial de temperatura de una mezcla de concreto en un periodo de tiempo determinado para calcular un índice de madurez del concreto. Para la función de madurez de Nurse – Saul (NS), se tiene en cuenta una temperatura de referencia  $T_0$  por debajo de la cual el fraguado es poco probable. La función de madurez de Nurse – Saul (NS) está dada por la siguiente expresión:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \quad (2.1)$$

Donde:

$M(t)$ : Factor de tiempo-temperatura a la edad  $t$  ( $^{\circ}\text{C h}$ )

$T_a$ : Media de la temperatura durante el intervalo  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$ : Temperatura de referencia ( $^{\circ}\text{C}$ )

Saul (1951) propuso una temperatura de referencia de  $-10.5^{\circ}\text{C}$ . Este valor ha sido usado por décadas como el valor de temperatura al cual el cemento deja de hidratarse, sin embargo, la ASTM C1074-11 recomienda que la temperatura de referencia sea determinada experimentalmente o sea tomada como  $0^{\circ}\text{C}$  para cementos Tipo I, cuya temperatura de curado este entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $40^{\circ}\text{C}$  (Lachemi, 2007).

### 2.3.3 Función de Madurez - Edad Equivalente

McIntosh (1956) concluyó que la ecuación (2.1) no estima con precisión el efecto de la temperatura en el desarrollo de la resistencia del concreto, debido a que la ganancia de resistencia no es una función lineal de la temperatura de curado.

Rastrup (1954) introduce la edad equivalente como un método alternativo de aproximación. La edad equivalente se refiere al tiempo en el que un concreto debe ser curado a una temperatura constante  $T_r$  (temperatura de referencia) para tener la misma madurez que un concreto curado en condiciones no controladas (Lachemi, 2007). La ecuación propuesta por Rastrup es:

$$t_R = \sum 2^{\frac{T-T_r}{10}} * \Delta t \quad (2.2)$$

Donde:

$t_R$ : Edad equivalente a la temperatura de referencia (h)

$T_r$ : Temperatura de referencia ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo (h)

En este método la temperatura de referencia  $T_r$  es considerada como  $20^{\circ}\text{C}$ .

A través de los años diferentes autores han modificado la ecuación de la edad equivalente. No obstante la ecuación más utilizada y la referenciada en la ASTM C1074-11 es la propuesta por Freiesleben Hansen y Pederson (1997), esta ecuación está basada en la ecuación de Arrhenius. La ecuación propuesta es:

$$t = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} \Delta t \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{E}{R} \quad (2.4)$$

Donde:

$E$ : Energía de activación (kJ/mol)

$R$ : Constante universal de los gases (8.3144 J/K mol)

$T_a$ : Media de la temperatura durante el intervalo  $\Delta t$  (K)

$T_s$ : Temperatura de referencia (K)

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo (h)

### 2.3.4 Energía de Activación

La energía de activación fue propuesta por Arrhenius en 1888, ésta es descrita como la energía mínima requerida para que se inicie una reacción; con esta teoría se comprobó que la velocidad de reacción incrementa cuando la temperatura es mayor y se propuso la siguiente ecuación conocida como la Ley de Arrhenius (Freiesleben Hansen y Pederson, 1997):

$$k = A * e^{\frac{-Q}{273+T}} \quad (2.5)$$

Donde:

$k$ : Constante de velocidad (1/h)

$A$ : Factor de frecuencia

$Q$ : está dada por la ecuación (2.4)

$T$ : Temperatura (°C)

Con base en la ecuación (2.5) se puede inferir que una energía de activación alta corresponde a una velocidad de reacción muy sensible a la temperatura.

La energía de activación definida por Arrhenius es para sistemas homogéneos sometidos a una sola reacción. El concreto no es químicamente homogéneo por lo que la energía de activación de este no es la real; debido a esto se introduce el término de “energía de activación aparente”. En investigaciones anteriores acerca del tema, se ha demostrado que la energía de activación es única para cada mezcla de concreto (Carino, 2001), sin embargo la ASTM C 1074 – 11 sugiere un rango

de valor de energía de activación entre 40000 a 45000 J/mol para concretos elaborados con cemento tipo I sin aditivos y/o adiciones, para otras condiciones se sugiere determinar el valor de  $Q$  experimentalmente.

En la norma ASTM C 1074 – 11 en el Anexo 1, se describen tres métodos para determinar la tasa de velocidad del desarrollo de la resistencia ( $k$ ) que permite calcular la energía de activación aparente, estos serán descritos a continuación. Para la aplicación de los tres métodos, se usan especímenes de un mortero equivalente a la mezcla de concreto los cuales son curados a tres temperaturas diferentes: máxima, media y mínima del sitio de colocación del concreto. Se determinará la resistencia a la compresión de los cubos de mortero a diferentes edades.

El primer método descrito en la ASTM C 1074 – 11, consiste en medir los tiempos de fraguado final del mortero; para las tres temperaturas de curado, y determinar la resistencia a la compresión de los cubos de mortero; comenzando a la edad del doble del tiempo de fraguado final, y duplicando sucesivamente este tiempo hasta llegar a 32 días. Se construye una gráfica del inverso de la resistencia a compresión vs el inverso de la edad de falla para cada una de las temperaturas de curado, como se muestra en la Figura 2.1.

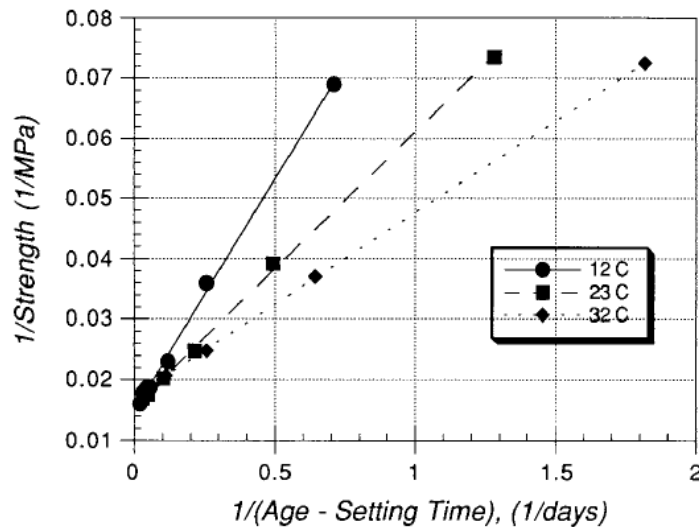


Figura 2.2 Inverso del Esfuerzo Vs Inverso de la Edad desde el Tiempo Final de Fraguado (ASTM C 1074 -11).

Se determina la línea de mejor ajuste para cada una de las temperaturas y el intercepto con el eje “y”, el cual se divide en la pendiente de cada línea para determinar el valor de  $k$  para cada temperatura.

En el segundo método, no es necesario determinar los tiempos de fraguado por lo que la primera edad de falla será cuando los especímenes adquieran una resistencia aproximada de 4 MPa y duplicando sucesivamente este tiempo hasta llegar a 32 días. Después de la obtención de los datos se deben calcular mediante métodos numéricos los valores que mejor se ajusten de  $S_u$ ,  $T_o$  y  $k$ , de la ecuación (2.6).

$$S = S_u * \frac{k(t-t_0)}{1+k(t-t_0)} \quad (2.6)$$

Donde:

$S$ : Promedio de las resistencias a compresión de los cubos a la edad  $t$  (MPa)

$t$ : Edad de los cubos de mortero (días)

$S_u$ : Esfuerzo limite (MPa)

$t_0$ : Edad supuesta donde se empieza a desarrollar la resistencia (días)

$k$ : Constante de velocidad (1/h)

Para el tercer método, tampoco es necesario determinar los tiempos de fraguado; por lo que la primera edad de falla será cuando los especímenes adquieran una resistencia aproximada de 4 MPa y duplicando sucesivamente este tiempo hasta llegar a 32 días. Con los datos obtenidos de resistencia de las cuatro últimas edades, se construye una gráfica del inverso de la resistencia a compresión vs el inverso de la edad de falla para cada una de las temperaturas de curado y se determina el intercepto con eje "y". El inverso de este intercepto es el límite de resistencia  $S_u$ ; este procedimiento se debe hacer para cada temperatura de curado. Usando los datos de resistencia de las cuatro edades más tempranas y el valor de  $S_u$  se calcula por medio de la ecuación (2.7) el valor de  $A$  para cada resistencia.

$$A = \frac{S}{S_u - S} \quad (2.7)$$

Donde:

$S$ : Promedio de las resistencias a compresión de los cubos a la edad  $t$  (MPa)

$S_u$ : Esfuerzo limite (MPa)

Para cada temperatura de curado se debe graficar  $A$  vs la edad y determinar la línea de mejor ajuste donde la pendiente de cada línea corresponde al valor de  $k$ .

Una vez determinado el valor de la constante de velocidad  $k$  se procede a calcular el valor de  $Q$  para conocer la energía de activación. Se deben graficar los valores del logaritmo natural de  $k$  vs los inversos de los valores de la temperatura de curado en grados kelvin, como se muestra en la Figura 2.3.

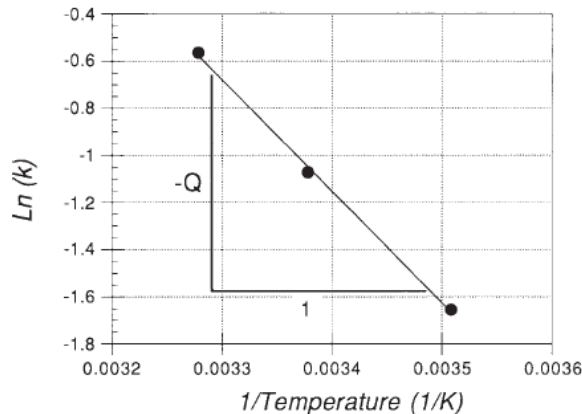


Figura 2.3 Logaritmo Natural De  $K$  Vs Inverso de la Temperatura en Grados Kelvin.  
(ASTM C 1074 -11)

Se determina la mejor línea de los tres puntos. El negativo de la pendiente de esta línea es el valor de la energía de activación dividida en la constante de los gases,  $Q$ , que es usada para calcular la edad equivalente por medio de la ecuación (2.3).

### 2.3.5 Relación entre Índice de Madurez y Resistencia

A lo largo de las últimas décadas el método de madurez se ha utilizado de forma exitosa para estimar la resistencia del concreto. En la norma ASTM C 1074-11 se describe el procedimiento para relacionar el índice de madurez con la resistencia a la compresión de la siguiente forma.

Se deben fabricar 15 cilindros de concreto con proporciones iguales a las del concreto en estudio y curarlos en una temperatura controlada. Se debe introducir un sensor de temperatura en el centro de al menos dos especímenes y medir la evolución de temperaturas, los cilindros restantes se deben fallar a compresión a 1, 3, 7, 14 y 28 días, para cada una de estas edades se debe registrar la temperatura.

Con base en los datos tomados se evalúa el índice madurez con la ecuación 2.1 o 2.3. Se construye una gráfica de resistencia vs el índice de madurez, como se muestra en la Figura 2.4 para factor tiempo – temperatura y en la Figura 2.5 para edad equivalente.

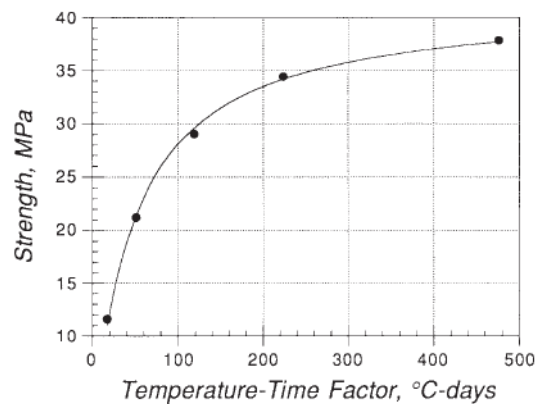


Figura 2.4 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Factor Tiempo – Temperatura  
(ASTM C 1074 -11)

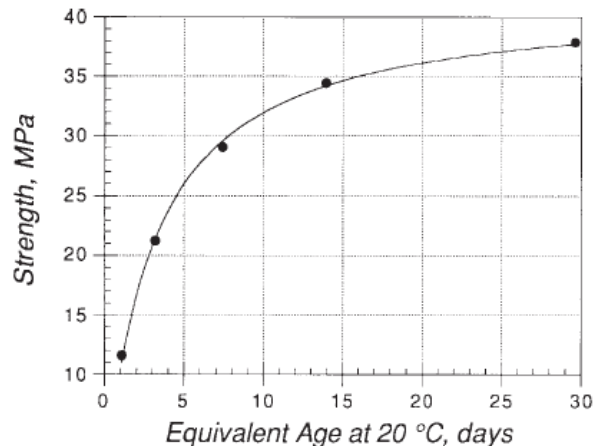


Figura 2.5 Relación entre la Resistencia a la Compresión y la Edad Equivalente (ASTM C 1074 -11)

La curva resultante se utilizará para estimar la resistencia a la compresión de la mezcla de concreto curado bajo otras condiciones.

Los valores del logaritmo en base diez de la edad equivalen vs la resistencia a la compresión se grafican para hallar la línea de mejor ajuste, como se muestra en la Figura 2.6.

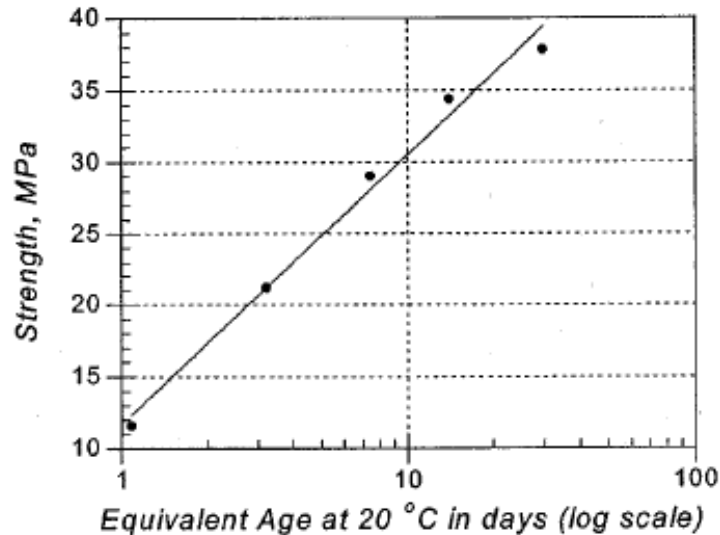


Figura 2.6 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Logaritmo base diez de la Edad Equivalente (ASTM C 1074 -11)

Para la estimación de resistencia in situ se debe medir la temperatura del concreto y determinar la edad equivalente. Con base en la línea de tendencia de la Figura 2.5 obtenida en condiciones controladas se estima el valor de la resistencia conociendo la edad equivalente del concreto en estudio.

### 2.3.6 Investigaciones Previas Madurez y Energía de Activación

A lo largo de los últimos años se han desarrollado investigaciones alrededor de la función de madurez y la energía de activación del concreto. A continuación, se describirán estudios previos que tienen relación con el presente Trabajo de Grado.

#### ✓ Caracterización de Mezclas de Concreto Utilizadas en Sistemas Industrializados. Díaz et. al (2004)

En esta investigación previa se llevó a cabo una caracterización físico – mecánica de los concretos que se utilizan en sistemas industrializados para la construcción de placas en edificaciones. Comparando dichas propiedades con las de concretos convencionales

Adicionalmente, se realizaron ensayos de calorimetría sobre los concretos con el fin de relacionar el diferencial máximo de temperatura con la resistencia esperada de la mezcla. (Véase Figura 2.7).



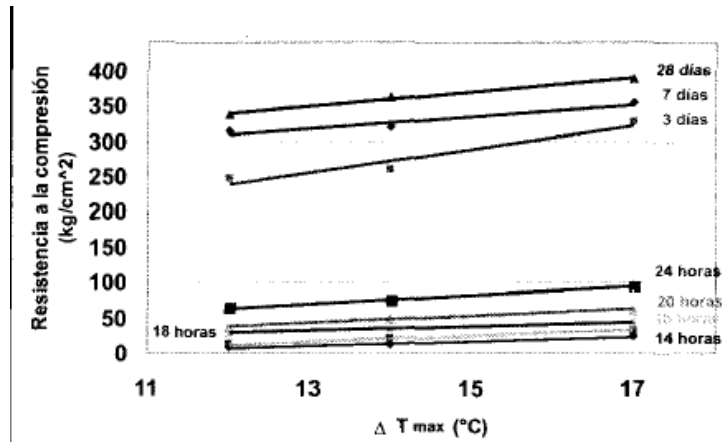


Figura 2.7 Relación entre el  $\Delta T_{max}$  del perfil calorimétrico y la resistencia a compresión a diferentes edades para el concreto Outinord (Díaz, 2004)

El ensayo de calorimetría es un ensayo que solo dura 24 horas, sin embargo puede ser utilizado para estimar el valor de la resistencia a la compresión a cualquier edad sin usar ensayos destructivos, teniendo en cuenta que el modelo debe ser calibrado con ensayos destructivos en laboratorio.

✓ **A humidity-adjusted maturity function for the early age strength prediction of concrete.**  
Liao et. al (2008)

En el estudio realizado por Liao en 2008 se introduce la humedad como una nueva variable al método de la madurez. Esto se hace mediante la constante de velocidad  $k$ , de forma que los especímenes son curados a diferentes temperaturas y humedades. Adicionalmente, se midió la temperatura en cilindros de concreto bajo estas mismas condiciones, esto con el fin de aplicar el método de la madurez.

Una vez implementado el método se determinó la curva de madurez para cada condición de humedad, y se concluyó que la diferencia en cuanto a la estimación de la resistencia a la compresión no es mayor al 10%, como se muestra en la Figura 2.8.

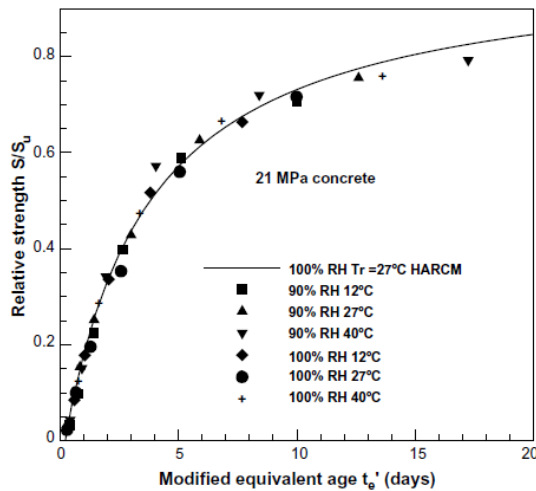


Figura 2.8 Resistencia relativa vs edad equivalente con diferentes humedades. (Liao et al. 2008)

✓ **New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications. Zhang et. al (2008)**

En esta investigación se estudió la madurez, para su aplicación en concretos de alto desempeño, con el fin de predecir las propiedades mecánicas del concreto en el tiempo. En este caso la energía de activación se determina en forma matemática, para reducir el error de las predicciones y datos experimentales.

Un aporte importante de este estudio, es que se establece que la medición de temperaturas en un ambiente controlado se estabiliza después de un periodo de tiempo de aproximadamente 15 horas y toma la temperatura ambiente. (Véase Figura 2.9)

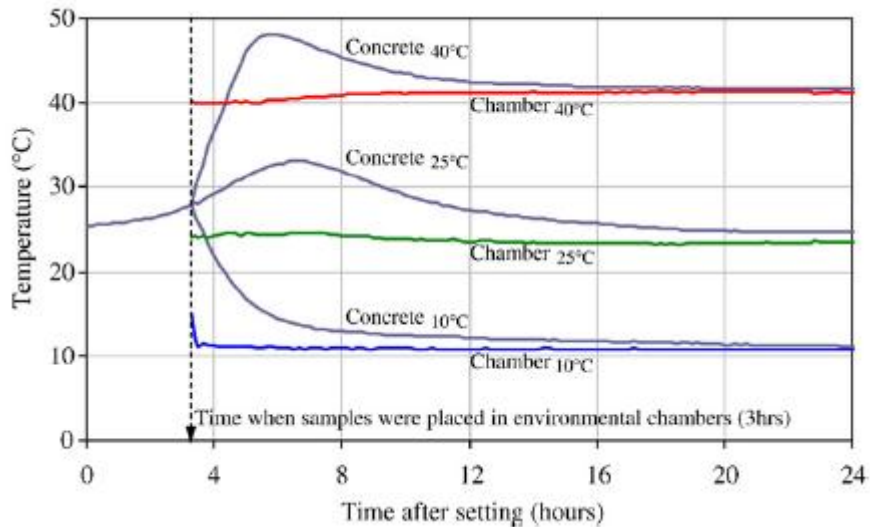


Figura 2.9 Temperatura del concreto en las cámaras de curado

A partir de este estudio se concluyó que la energía de activación no es un valor único para predecir todas las propiedades mecánicas del concreto, por lo que recomiendan determinar numéricamente la energía de activación que mejor se adapte a cada una de las propiedades mecánicas del concreto en estudio.

✓ **Application of maturity method to slipforming operations: Performance validation. Lachemi et. al (2007)**

En esta investigación se comparó el desempeño de diferentes funciones de madurez para el cálculo de tiempos de fraguado, esto se hizo en laboratorio y en obra. Se realizó para mezclas de concreto con diferente dosificación de aditivo retardante.

Se determina que la ecuación de Freiesleben Hansen y Pederson (Ecuación 2.3) fue la más aproximada en el cálculo de tiempos de fraguado en el laboratorio y en la obra.

Adicionalmente, se evidenció la influencia de los aditivos retardantes en la determinación de los tiempos de fraguado, lo anterior llevó a implementar una ecuación que relaciona la dosificación del aditivo retardante vs la edad equivalente para el tiempo de fraguado inicial. (Véase Figura 2.10)

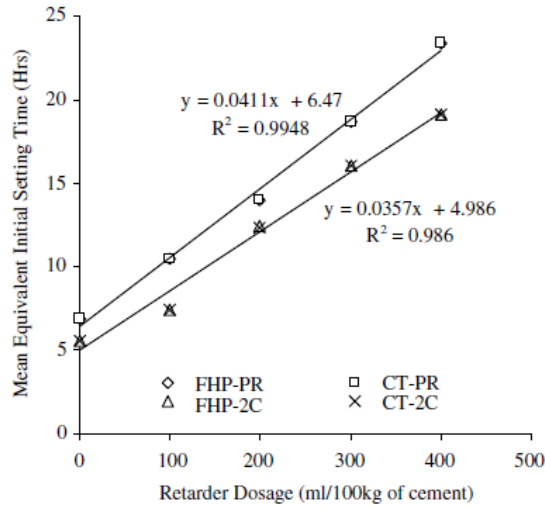


Figura 2.10 Edad equivalente de tiempo de fraguado vs dosificación de aditivos retardantes (Lachemi et. la 2007)

Se concluyó que cuando la dosificación de aditivo retardante es mayor, la energía de activación aumenta.

✓ **Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. Voigt et. al (2006).**

Esta investigación se centra en la comparación del método de la reflexión de onda ultrasónica con el método de la madurez. La aproximación para estos dos métodos se hizo en laboratorio bajo diferentes condiciones de curado.

Para la aplicación del método de la madurez se evaluó la resistencia a la compresión en cubos de mortero y se evidenció que a edades tempranas y temperaturas de curado altas las resistencias son mayores, mientras que en edades finales las resistencias a temperaturas bajas superan las obtenidas a temperaturas de curado altas. (Véase Figura 2.11).

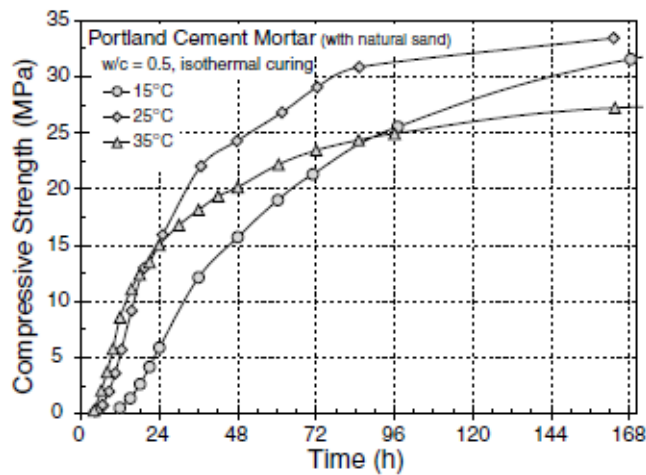


Figura 2.11 Resistencia a la compresión vs edad de falla (Voigt et. al 2006)

Los resultados muestran que para aplicar el método de la madurez se deben conocer las resistencias a compresión en condiciones específicas de curado, mientras que en el método de reflexión de onda la resistencia es independiente de las condiciones de curado.

✓ **Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete. De Schutter (2004)**

En este estudio se compara el método de la madurez con el grado de hidratación, los dos métodos se aplican en edades tempranas con el fin de evaluar el comportamiento elástico del concreto.

Los dos métodos se aplican en un caso de concreto masivo, una presa, donde las fisuras a edades tempranas son críticas. Se simuló por medio de elementos finitos, y se llegó a la conclusión que ambos métodos producen resultados similares.

## 2.4 Estimación de Plazo de Descimbrado

La determinación del plazo de descimbrado depende de la edad a la cual el concreto puede resistir los esfuerzos a los cuales va a estar sometido en el proceso de construcción. El desarrollo de resistencias mecánicas a edades tempranas depende fundamentalmente del diseño de mezcla y la temperatura (Alvarado, 2009).

A continuación se describirá el método propuesto por Calavera (1981) para la estimación del plazo de descimbrado que resulta ser un método de una amplia aceptación gracias a su fácil aplicación y verificación experimental (Alvarado 2009, Gasch 2012).

### 2.4.1 Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986)

El método propuesto por Calavera fue publicado por primera vez en 1981, como fruto de un extenso estudio que posteriormente sería validado experimentalmente por Fernández Gómez (1986) en el desarrollo de su Tesis Doctoral.

En la Tabla 2.1 se relacionan en función de la relación  $\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$  del concreto a compresión, la evolución de las resistencias a corte y punzonamiento, tracción y flexión, según las leyes teóricas establecidas por la Instrucción del Hormigón Estructural – EHE (Ministerio de Fomento, 2008).

Relación a Compresión $\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$	Tracción, Adherencia y Rasante $\sqrt[3]{\left(\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}\right)^2}$	Corte y Punzonamiento $\left(\sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}}\right)^{\frac{1}{3}}$	Flexión		Deformaciones $\left(\frac{f_{c,j} + 8}{f_{c,28} + 8}\right)^{\frac{1}{3}}$
			Cuantía Baja	Cuantía Alta	
0	0	0	0	0	-
0.25	0.40	0.63	0.81	-	0.75
0.50	0.63	0.79	0.94	0.85	0.85
0.75	0.83	0.91	0.99	0.88	0.93
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 2.1 Relación de resistencias en función de la resistencia a compresión del hormigón.

En la Tabla 2.1 se consideran los esfuerzos a los cuales va a estar sometida una placa de concreto. En la etapa de construcción la resistencia a la compresión no resulta ser la más importante a

considerar para determinar los plazos de descimbrado. Por lo anterior se ha evaluado cuál de los demás esfuerzos resulta ser el más crítico en cuanto a su evolución.

De la Tabla 2.1 se concluye que la evolución de resistencia que resulta crítica es la de la resistencia a tracción del concreto, que en realidad no es directamente la única resistencia que interviene en el comportamiento de una placa, sin embargo es aquella que resulta condicionante, dado que de ella dependen entre otras cosas, la resistencia a flexión, anclaje y adherencia. etc. (Calavera 2002, Alvarado 2009).

De igual forma también se observa como la evolución del módulo de elasticidad, es más rápida que la resistencia a tracción, por lo cual, este último criterio resulta ser más restrictivo. Por este motivo, la mayoría de autores adoptan la resistencia a tracción como condicionante del proceso de descimbrado (Alvarado, 2009).

De esta forma, si consideramos que la carga actuante sobre una placa al descimbrar es una fracción de la carga total de diseño, se tiene la siguiente expresión:

$$Q = \alpha P \quad (2.8)$$

Donde

$Q$ : Carga actuante al descimbrar (kN)

$P$ : Carga total de diseño (kN)

$\alpha$ : Factor de reducción

Por lo anterior se puede afirmar que:

$$f_{ct,j} \geq \alpha * f_{ct,28} \quad (2.9)$$

Donde

$f_{ct,j}$ : Resistencia a tracción en un tiempo  $j$  (MPa)

$f_{ct,28}$ : Resistencia a tracción de diseño (MPa)

$\alpha$ : Factor de reducción

Considerando los factores de mayoración de carga podemos reescribir la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$f_{ct,j} \geq \frac{Dc * Fs'_1 + Lc * Fs'_2}{D * Fs_1 + L * Fs_2} * f_{ct,28} \quad (2.10)$$

Donde

$f_{ct,j}$ : Resistencia a tracción en un tiempo  $j$  (MPa)

$f_{ct,28}$ : Resistencia a tracción de diseño (MPa)

$D_c$ : Cargas muertas en el proceso de construcción (kN)

$D$ : Cargas muertas de diseño (kN)

$L_c$ : Cargas vivas en el proceso de construcción (kN)

$L$ : Cargas vivas de diseño (kN)

$F_s$ : Factor de mayoración de diseño.

$F'_s$ : Factor de mayoración para las cargas de construcción.

Si decimos que  $\beta$  corresponde a la ecuación 2.10.

$$\beta = \frac{D_c * F_{S'_1} + L_c * F_{S'_2}}{D * F_{S_1} + L * F_{S_2}} \quad (2.11)$$

Entonces,

$$f_{ct,j} \geq \beta * f_{ct,28} \quad (2.12)$$

La expresión 2.12 condiciona el plazo de descimbrado para cada uno de los entresijos de una edificación. Solo quedaría por establecer a qué edad el concreto alcanza el valor de resistencia necesario para realizar el proceso de descimbrado, y es allí donde el método de la madurez, expuesto en el apartado 2.3.5, es de aplicación. Alvarado et. al (2005)

## **CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Introducción**

Con el objeto de aplicar el método de la madurez para la estimación de resistencias a edades tempranas en concretos industrializados, se planteó un estudio experimental en el que se realizaron pruebas de laboratorio y pruebas en obra.

A continuación se hará una descripción de la metodología que se empleó para evaluar las propiedades físico –mecánicas de las mezclas de concreto industrializado, después, se documentará el proceso y estrategias para estimar la energía de activación y la curva de madurez para cada una de las mezclas de concreto. Finalmente se describirá el procedimiento en obra para la implementación del método.

### **3.2 Mezclas de Concreto en Estudio**

Para el presente estudio se utilizaron dos tipos de mezclas de concretos industrializados, una mezcla para muro y otra para placa. Estos concretos son:

- ✓ Outinord Muro Cemex – 28 MPa.
- ✓ Outinord Placa Cemex – 21 MPa.

#### **3.2.1 Características de las Mezclas de Concreto**

Las características del concreto Outinord Muro Cemex – 28 MPa son:

- Relación Agua Cemento : 0,51
- Asentamiento: 18 cm
- Tiempo de manejabilidad: Clima frio 1.5 horas
- Agregado de origen aluvial
- Tamaño máximo del agregado ½”

Las características del concreto Outinord Placa Cemex - 21 MPa son:

- Relación Agua Cemento : 0,67
- Asentamiento: 10 cm
- Tiempo de manejabilidad: Clima frio 1.5 horas
- Agregado de origen aluvial
- Tamaño máximo del agregado 1”

#### **3.2.2 Diseños de Mezcla**

Los diseños de mezcla para los concretos en estudio fueron suministrados por Cemex Colombia. En la Tabla 3.1 y 3.2 se muestran los diseños de mezcla por m<sup>3</sup> de concreto que fueron utilizados

- ✓ Outinord Muro Cemex - 28 MPa.

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Grava 1/2"</b> <b>(kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
385	195	818	882	5073	944

Tabla 3.1 Diseño de Mezcla Outinord Muro Cemex por m3

- ✓ Outinord Placa Cemex – 21 MPa.

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Grava 1"</b> <b>(kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
270	180	870.33	960.71	3377	717

Tabla 3.2 Diseño de Mezcla Outinord Placa Cemex por m3

### 3.3 Caracterización de Materias Primas

#### 3.3.1 Cemento

El cemento usado para las dos mezclas es cemento Tipo I, producido por Cemex en la planta Caracolito de Ibagué. A continuación se describe la caracterización de este cemento.

- ✓ Características Generales (Véase tabla 3.3).

<b>Ensayo</b>	<b>Resultados Obtenidos</b>
Consistencia Normal	0,35
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,15
Tiempo de Fraguado (h)	3,73
Finura (cm <sup>2</sup> /g)	3698

Tabla 3.3 Características del Cemento Cemex Caracolito

- ✓ Resistencia a la Compresión (Véase tabla 3.4).

<b>Resistencia a la Compresión</b>	
<b>Edad</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>
1	9.90
3	14.85
7	33.11
14	43.05
28	49.51

Tabla 3.4 Resistencia a la Compresión de Cemento Cemex Caracolito

#### 3.3.2 Agregado Fino

El agregado fino tiene origen aluvial y es extraído en el Apulo Cundinamarca. A continuación se describe la caracterización de este agregado fino.



- ✓ Granulometría (Véase tabla 3.5 y Figura 3.1).

ABERTURA DEL TAMIZ	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulad	Porcentaje Pasa
(mm)	(g)	(%)	o (%)	(%)
(Denom. Estándar)				
12.5	1/2"	0.0	0.0%	100.0%
9.5	3/8"	0.0	0.0%	100.0%
4.76	N° 4	21.0	2.3%	97.7%
2.38	N° 8	295.0	32.6%	65.1%
1.19	N° 16	139.0	15.3%	49.8%
0.6	N° 30	102.0	11.3%	38.5%
0.3	N° 50	86.0	9.5%	29.0%
0.15	N° 100	161.0	17.8%	11.3%
0.075	N° 200	74.0	8.2%	3.1%
Fondo		28.0	3.1%	0.0%

Tabla 3.5 Granulometría Agregado Fino

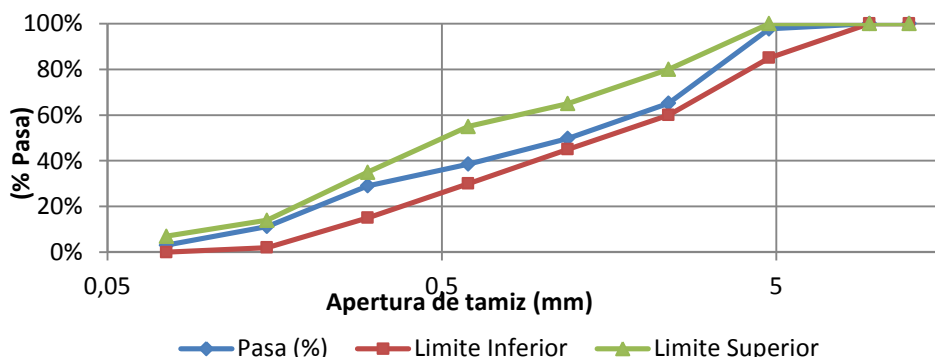


Figura 3.1 Granulometría Agregado Fino

- ✓ Características Agregado Fino (Véase tabla 3.6).

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO	RESULTADOS OBTENIDOS
Caract. Básicas	Densidad	2.56%
	Absorción	1.63%
Contenido de Materia Orgánica	Color más oscuro permisible	2
Masas Unitarias	Masa Unitaria Suelta Kg /m <sup>3</sup>	1610.3
	Masa Unitaria Suelta Kg /m <sup>3</sup>	1691.6

Tabla 3.6 Características Agregado Fino

### 3.3.3 Agregado Grueso

El agregado fino tiene origen aluvial y es extraído en Anapoima. A continuación se describe la caracterización de este agregado grueso.

Tamaño Máximo (1/2")

- ✓ Granulometría (Véase tabla 3.7 y Figura 3.2).

ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	(Denom. Estándar)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)
19.00	3/4"	0	0.0%	0.0%	100.0%
12.50	1/2"	394	20.0%	20.0%	80.0%
9.50	3/8"	548	27.8%	47.8%	52.2%
4.76	N° 4	868	44.0%	91.8%	8.2%
2.36	N° 8	146	7.4%	99.2%	0.8%
0.08	N° 200	8	0.4%	99.6%	0.4%
Fondo		7.0	0.4%	100.0%	0.0%

Tabla 3.7 Granulometría Agregado Grueso 1/2"

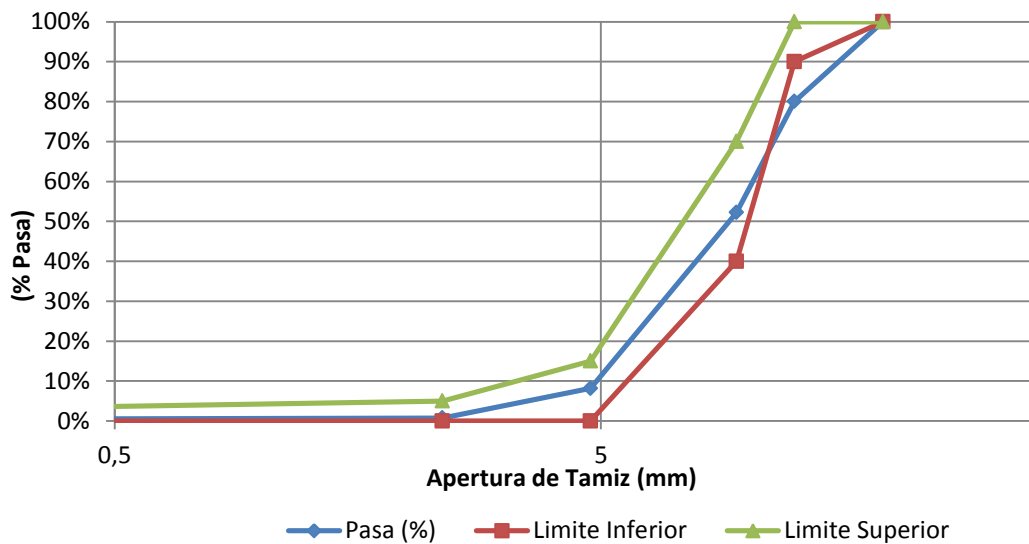


Figura 3.2 Granulometría Grava 1/2"

✓ Características de Agregado de ½" (Véase tabla 3.8).

ENSAYO		NORMA DE ENSAYO	RESULTADOS OBTENIDOS
Caract. Básicas	Densidad		2.38
	Absorción, % máximo.	NTC 176	3.65%
Geometría de Partículas	Partículas fracturadas, %	1 cara	89.5%
	mínimo.	2 caras	88.2%
	Índices de aplanamiento, % máximo.		22.9%
	Índices de alargamiento, % máximo.	INV E-230	16.4%
	Masas unitarias Sueltas (Kg/m <sup>3</sup> )		1292.6
	Masas unitarias Compactas (Kg/m <sup>3</sup> )	NTC 92	1400.8

Tabla 3.8 Características Generales Agregado Grueso ½"

Tamaño Máximo (1")

✓ Granulometría (Véase tabla 3.9 y Figura 3.3).

ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	(Denom. Estándar)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)
38	1 1/2"	0	0.0%	0.0%	100.0%
25	1"	112	3.8%	3.8%	96.2%
19	3/4"	989	33.9%	37.7%	62.3%
12.5	1/2"	967	33.1%	70.9%	29.1%
9.5	3/8"	311	10.7%	81.5%	18.5%
4.76	N° 4	444	15.2%	96.7%	3.3%
2.38	N° 8	66	2.3%	99.0%	1.0%
0.075	N° 200	10	0.3%	99.3%	0.7%
Fondo		19.0	0.7%	100.0%	0.0%

Tabla 3.9 Granulometría Agregado Grueso 1"

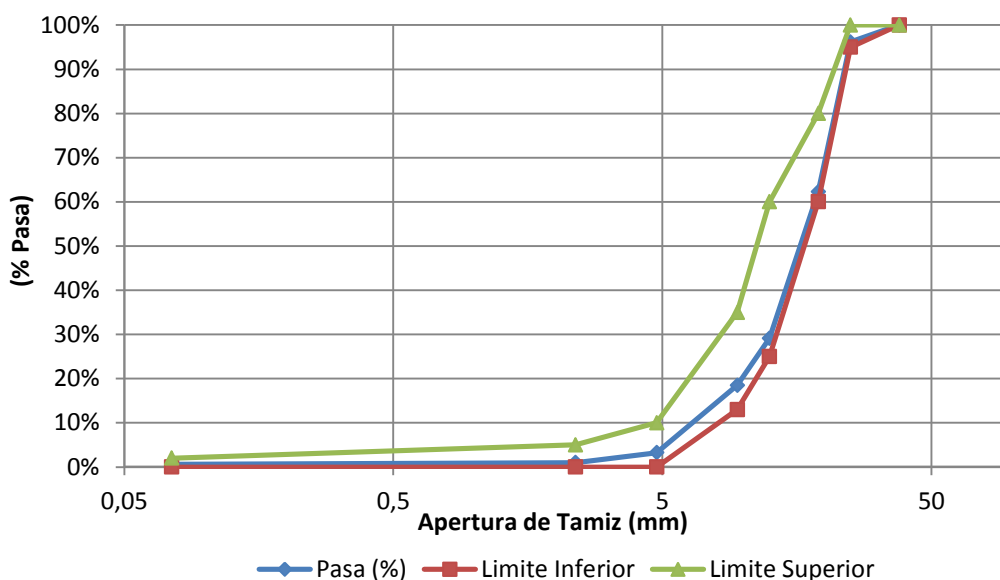


Figura 3.3 Granulometría Grava 1''

✓ Características de Agregado de 1''

ENSAYO		NORMA DE ENSAYO	RESULTADOS OBTENIDOS
Caract. Básicas	Densidad	NTC 176	2.37%
	Absorción, % máximo.		3.48%
Geometría de Partículas	Partículas fracturadas, % mínimo.	INV E-227	74.7%
	Partículas fracturadas, % máximo.		67.8%
	Índices de aplanamiento, % máximo.	INV E-230	17.7%
	Índices de alargamiento, % máximo.		23.7%

Tabla 3.10 Características Generales Agregado Grueso 1''

### 3.3.4 Aditivos

✓ Eucon AC 1054

Este aditivo es producido por la casa de aditivos Toxement. Es un aditivo líquido, cuya función es acelerar las resistencias a edades tempranas dependiendo de su dosificación con respecto al peso del cemento.

✓ Eucon MR 5000

Este aditivo es producido por la casa de aditivos Toxement. Es un aditivo líquido, cuya función es acelerar reducir el agua y/o retardarte de fraguado dependiendo de su dosificación con respecto al peso del cemento.

Para el caso de los concretos en estudio Outinord Muro y Placa actúa como reductor de agua, dándole alta manejabilidad y el terminado de las mezclas.

### 3.4 Ensayos de Laboratorio Para las Mezclas Concreto

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se plantearon diferentes ensayos para el concreto. Se dividió principalmente en dos componentes: ensayos en estado fresco y ensayos en estado endurecido.

#### 3.4.1 Elaboración del Concreto

Para la elaboración del concreto se tuvieron en cuenta las dosificaciones de la Tabla 3.1 y Tabla 3.2, relajando las correcciones por humedad y absorción de los agregados.

Para la determinación de la humedad de los agregados se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM D 2216 - 10, el cual consiste en tomar una muestra de 500 g del material e introducirla en un recipiente previamente pesado, el cual se coloca en un horno a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  hasta que el peso permanezca constante. Al retirar la muestra del horno se vuelve a pesar junto con el recipiente. La humedad se determina según la ecuación 3.1.

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} * 100\% \quad (3.1)$$

Donde

$w$ : Humedad de la muestra (%)

$W_1$ : Masa del recipiente y del espécimen húmedo (g)

$W_2$ : Masa del recipiente y del espécimen seco (g)

$W_c$ : Masa del recipiente

Una vez determinadas las humedades y con los datos de absorción obtenidos anteriormente se procede a hacer la corrección en las dosificaciones a partir de las siguientes formulas:

$$\text{Corrección de agua} = w_a * (w \pm abs) \quad (3.2)$$

Donde

$w_a$ : Peso del agregado (g)

$w$ : Humedad de la muestra (%)

$abs$ : Absorción de la muestra (%)

$$\text{Corrección peso agregado} = w_a * (w + 1) \quad (3.3)$$

$w_a$ : Peso del agregado (g)

$w$ : Humedad de la muestra (%)

Las dosificaciones finales después de hacer las correcciones se muestran en la Tabla 3.11 y la Tabla 3.12.

<b>AGREGADO FINO</b>		<b>AGREGADO GRUESO</b>			
Absorción	1.9%	Absorción	1.0%		
Humedad	6.3%	Humedad	3.5%		
Corrección Agua	38.81	Corrección Agua	20.45		
Corrección Peso	937.57	Corrección Peso	846.63		

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Grava 1/2" (kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
385	135.74	846.63	937.57	3377	717

Tabla 3.11 Diseño de Mezcla Corregido Outinord Muro Cemex por m<sup>3</sup>

<b>AGREGADO FINO</b>		<b>AGREGADO GRUESO</b>			
Absorción	1.9%	Absorción	1.0%		
Humedad	6.3%	Humedad	2.3%		
Corrección Agua	42.27	Corrección Agua	11.31		
Corrección Peso	1021.23	Corrección Peso	890.35		

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Grava 1" (kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
270	126.41	890.35	1021.23	3377.45	717

Tabla 3.12 Diseño de Mezcla Corregido Outinord Placa Cemex por m<sup>3</sup>

Con base en estos diseños se calculó el volumen para la elaboración de cilindros, vigas y hacer el ensayo de tiempos de fraguado. Para la elaboración del concreto se cuenta con una maquina Domat con capacidad de 150 litros, la cual se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Mezcladora Domat 150 litros – Universidad Javeriana

Para el proceso de mezclado se introdujeron los materiales secos (cemento, agregado fino, agregado grueso) y se mezclaron durante 45 segundos aproximadamente. A continuación con la máquina encendida se adicionó el agua y se mezcló durante un minuto y medio, se incorporaron los aditivos y se continuó el proceso de mezclado durante un minuto.

Una vez terminado el proceso de mezclado se extrae el concreto de la mezcladora y se dispone en moldes no absorbentes previamente humedecidos para realizar los ensayos.

### 3.4.2 Ensayo de Asentamiento

Para el ensayo de asentamiento de concreto se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C 143 – 12. Se tiene un molde con las dimensiones establecidas en la norma, se humedeció el molde y se dispuso sobre una bandeja metálica plana. Se sujetó firmemente el molde con los pies llenándolo con concreto en tres capas, cada una de ellas a un tercio del volumen. Se compactó cada capa con 25 golpes de una varilla. Después de la última se alisó la superficie de concreto (Véase Figura 3.5).



Figura 3.5 Ensayo de asentamiento

Inmediatamente se retiró el molde en dirección vertical, midiendo la diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro original del espécimen para determinar el asentamiento. Este procedimiento se realizó para cada una de las mezclas de concreto (Outinord muro y outinord placa) (Véase Figura 3.6).



Figura 3.6 Asentamiento Mezcla de Concreto Outinord muro y Outinord Placa

### 3.4.3 Tiempos de Fraguado de Concreto

Una vez realizada la mezcla se pasa por el tamiz No. 4 para remover la grava, esto con el fin de medir la resistencia a la penetración según procedimiento descrito por la norma ASTM C403 - 08. Una vez tamizado el concreto se lleva a la cámara de curado con temperatura controlada de 23° y humedad relativa del 100%.

Se dejó reposar por dos horas. Una vez transcurrido este tiempo se retiró el molde de la cámara y se quitó el exceso de agua, el molde se pone en el penetrómetro como se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Ensayo de Tiempos de Fraguado



Se disponía de un penetrómetro que cumplía con las especificaciones de la norma. Este procedimiento consiste en penetrar el mortero con una aguja de diámetro conocido y registrar la carga. Este procedimiento se repitió en promedio cada media hora hasta que la resistencia a la penetración fuera mayor a 27,6 Mpa, el cual corresponde al esfuerzo de penetración para el tiempo de fraguado final de la mezcla.

La resistencia a la penetración se calcula por medio de la ecuación 3.4:

$$R = \frac{F}{(\pi * r^2)} \quad (3.4)$$

Donde

*R*: Resistencia a la penetración (MPa)

*F*: Fuerza ejercida por la aguja (N)

*r*: Radio de la aguja (mm)

Se graficó la resistencia a la penetración contra el tiempo en minutos para determinar el tiempo de fraguado inicial y final, determinando los valores del tiempo en el eje “x” para 3.5 MPa y 27,6 MPa respectivamente.

El otro método descrito por la ASTM C 403 consiste en graficar los logaritmos en base 10 de la resistencia a la penetración y el tiempo, se determinó una línea de ajuste. Con la ecuación de esta línea se determinó el valor de tiempo de fraguado inicial y final.

#### 3.4.4 Fabricación de Cilindros de Concreto

Siguiendo el procedimiento descrito en la ASTM C 192 – 13 se fabricaron cilindros de concreto usando moldes de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto aproximadamente que cumplen con las especificaciones de la norma.

Se colocó el concreto con ayuda de un palustre en el molde en dos capas de aproximadamente el mismo volumen, se apisonó cada capa con la parte redondeada de la varilla con 25 golpes. La distribución de golpes para cada capa fue en forma de espiral. Una vez apisonado se dieron golpes laterales con un martillo de caucho en el molde para eliminar los vacíos. Se aliso la superficie de la última capa (Véase Figura 3.8).



Figura 3.8 Fabricación de Cilindros de Concreto

Se llevaron los cilindros inmediatamente a una cámara de curado con temperatura controlada de 23°C y humedad relativa del 100%. A las 24 horas se procedió a retirar los moldes y se introdujeron los cilindros en agua, en la cámara de curado hasta su edad de falla. La cantidad de cilindros fabricados se muestra en la Tabla 3.13.

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>No. De Cilindros</b>
Outinord Muro	22
Outinord Placa	22

Tabla 3.13 Cantidad de Cilindros

### **3.4.5 Fabricación de Vigas de Concreto**

Siguiendo el procedimiento descrito en la ASTM C 192 – 13<sup>a</sup>, para la fabricación de las vigas se usaron moldes rectangulares con un largo de 350 mm y un alto de 100 mm aproximadamente que cumplen con las especificaciones de la norma.

Se colocó el concreto con ayuda de un palustre en el molde en dos capas de aproximadamente el mismo volumen, se apisonó cada capa con la parte redondeada de la varilla con 25 golpes. La distribución de golpes para cada capa fue uniforme a lo largo de toda la superficie. Una vez apisonado se dieron golpes laterales con un martillo de caucho en el molde para eliminar los vacíos. Se aliso la superficie de la última capa.

Se llevaron las vigas inmediatamente a una cámara de curado con temperatura controlada de 23°C y humedad relativa del 100%. A las 24 horas se procedió a retirar los moldes y se introdujeron las vigas en agua, en la cámara de curado hasta su edad de falla. La cantidad de vigas fabricados se muestra en la Tabla 3.14.

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>No. de Vigas</b>
Outinord Muro	9
Outinord Placa	10

Tabla 3.14 Cantidad de Vigas

### **3.4.6 Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto**

Con el fin de determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto, se retiraron del baño de agua en la cámara de curado y fueron ensayados en condición húmeda. Se ensayaron dos cilindros por cada edad. Las edades de falla fueron: 1, 3, 7, 14 y 28 días.

Se colocó el espécimen de concreto entre el bloque inferior y superior dispuesto en la maquina universal, verificando que este alineado con el eje. En el momento de empezar el ensayo el indicador de carga se puso en cero y se procedió a cargar el cilindro hasta el momento en el que el indicador de carga mostró que esta empezó a decrecer. Se registró la carga máxima soportada por el cilindro (Véase Figura 3.9).



Figura 3.9 Ensayo de Resistencia a la Compresión Cilindros de Concreto

### 3.4.7 Ensayo de Tracción Indirecta en Cilindros

Se sometieron al ensayo de tracción indirecta cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto aproximadamente. Siguiendo el procedimiento de la ASTM C 496 -11, se colocó el cilindro de la forma que se muestra en la Figura 3.10 para la aplicación de la carga. Se ensayaron dos cilindros por cada edad. Las edades de falla fueron: 1, 3, 7, 14 y 28 días (Véase Figura 3.10).



Figura 3.10 Montaje Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta Cilindros de Concreto

En el momento de empezar el ensayo el indicador de carga se puso en cero y se procedió a cargar el cilindro hasta el momento en el que el indicador de carga mostró que esta empezó a decrecer. Se registró la carga máxima soportada por el cilindro. Para determinar la resistencia a la tracción indirecta se usa la ecuación 3.5.

$$T = \frac{2P}{\pi * L * d} \quad (3.5)$$

Donde

$T$ : Esfuerzo de Tracción Indirecta (MPa)

$P$ : Carga Máxima (kN)

$L$ : Longitud del Cilindro (m)

$d$ : Diámetro del Cilindro (m)

### 3.4.8 Ensayo Flexión en Vigas

Para determinar la resistencia a la flexión del concreto se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C 78 -10, se utilizaron vigas de 350 mm de largo por 100 mm de alto. Se colocó la viga en la forma que se muestra en la Figura 3.11. Se ensayaron dos vigas por cada edad en la máquina de ensayo Instron de 50 kN. Las edades de falla fueron: 1, 3, 7, 14 y 28 días.



Figura 3.11 Montaje Ensayo de Resistencia a la Flexión en Vigas de Concreto

Se aplicó la carga de forma constante en los tercios de la luz de la viga, esto se hizo hasta el momento que ocurrió la rotura de la viga, como se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12 Rotura de la Viga de Concreto

El módulo de rotura se calcula de acuerdo a la ecuación 3.6 si la falla se da en el tercio medio de la luz libre (ASTM C 78 -10)

$$R = \frac{P * l}{b * d^2} \quad (3.6)$$

Donde

*R*: Módulo de Rotura (MPa)

*P*: Carga Máxima (kN)

*L*: Longitud Libre entre Apoyos (m)

*b*: Ancho Promedio de la Muestra (m)

*d*: Altura promedio de la muestra (m)

El módulo de rotura se calcula de acuerdo a la ecuación 3.7 si la falla se da fuera del tercio medio de la luz, a una distancia no mayor del 5% de la luz libre. (ASTM C 78 -10)

$$R = \frac{3 * P * a}{b * d^2} \quad (3.7)$$

Donde

*P*: Módulo de Rotura (MPa)

*P*: Carga Máxima (kN)

*a*: Distancia Promedio entre la línea de fractura y el soporte ms cercano , medida sobre la zona de tensión de la viga (m)

*b*: Ancho Promedio de la Muestra (m)

*d*: Altura promedio de la muestra (m)

### **3.4.9 Módulo de Elasticidad**

Con el fin de determinar el módulo de elasticidad se sometieron a ensayo dos cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura por edad, de acuerdo con la norma ASTM C469 – 10.

El ensayo consistió en conectar un dispositivo que mide la deformación del cilindro a medida que este está sometido a carga como se muestra en la figura 3.13. El cilindro se cargó hasta el 40% de su resistencia a la compresión en dos ocasiones, con el fin de determinar el comportamiento del concreto en su zona elástica.



Figura 3.13 Montaje ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de concreto

Una vez obtenidos los resultados se estima la resistencia a la compresión con base en la carga. El módulo de elasticidad se determina con la ecuación (3.8).

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\varepsilon_2 - 0,00005)} \quad (3.8)$$

Donde

$E$ : Módulo de Elasticidad (MPa)

$S_2$ : Resistencia correspondiente al 40% de la resistencia ultima (MPa)

$S_1$ : Resistencia correspondiente a una deformación de 0,00005 (MPa)

$\varepsilon_2$ : Deformación longitudinal correspondiente a  $S_2$

### 3.5 Determinación de Energía de Activación y Curva de Madurez

Con el objetivo de aplicar el método de la madurez planteado en la ASTM C 1074 – 11 se desarrolló un procedimiento experimental que está dividido en dos partes. La primera se refiere a la determinación de la energía de activación, empleada en la ecuación 2.3, donde se hicieron ensayos de resistencia a compresión en cubos de mortero equivalente y se midieron los tiempos de fraguado de dichos morteros. En la segunda parte del planteamiento experimental, se midió el historial de temperatura en cilindros de concreto para construir la curva de madurez. Estos dos apartes se describen con detalle a continuación.

#### 3.5.1 Diseño de Mezcla para Mortero

Se dosificó una mezcla de mortero equivalente que tuviera una relación agregado fino-cemento (en masa) igual a la relación agregado grueso- cemento de las mezclas de concreto en investigación. Se

conservó la misma relación agua-cemento y la misma cantidad de aditivos de la mezcla de concreto (ASTM C1074-11)

Los diseños de mezcla para Muro y Placa se muestran en la Tabla 3.15 y Tabla 3.16.

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
270	180	1831	3377	717

Tabla 3.15 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Placa

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
385	195	1700	5073	944

Tabla 3.16 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Muro

A estos diseños de mezcla se les hizo la corrección de agua de acuerdo a la ecuación 3.2 y corrección de la masa del agregado fino según la ecuación 3.3. Los diseños corregidos se muestran en la Tabla 3.17 y 3.18.

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
270	150	1895	3377	717

Tabla 3.17 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Placa Corregido

<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Agua (lt)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>AC1054 (ml)</b>	<b>MR5000 (ml)</b>
385	169	1759	5073	944

Tabla 3.18 Diseño de Mezcla Mortero Equivalente Muro Corregido

### 3.5.2 Mezclado de Mortero

Para la fabricación del mortero que se utilizó en el ensayo de tiempos de fraguado y para la elaboración de los cubos para el ensayo de compresión se utilizaron las dosificaciones de la Tabla 3.17 y Tabla 3.18.

Las mezclas de mortero se hicieron de acuerdo a la NTC 112. Se utilizó una mezcladora mecánica que cumple con las especificaciones de la norma (Véase Figura 3.14).



Figura 3.14 Mezcladora para mortero



Para el mezclado se introdujo el cemento con el agua y se dejó hidratar durante 30 segundos. Seguidamente se incorporó la totalidad de la arena con la batidora encendida en velocidad 1 y se dejó mezclar durante 30 segundos. Se apagó la máquina y se rasparon las paredes con ayuda de un raspador. Se encendió nuevamente la batidora en velocidad 2, se agregaron los aditivos y se dejó mezclar durante un tiempo total de cinco minutos. Esto con el fin que los aditivos tuvieran el efecto esperado.

### 3.5.3 Ensayo de Tiempos de Fraguado de Mortero

Con el fin de aplicar el primer método para determinar el valor de la constante de velocidad  $k$  descrito en la sección 2.3.4 se realizó el ensayo de tiempos de fraguado de acuerdo a la norma ASTM C 403 – 08. Este ensayo se realizó para las tres temperaturas que se escogieron para el método: 23°, 13° y 6°. Estas temperaturas se seleccionaron con base en la temperatura promedio mínima, media y máxima de Bogotá (IDEAM, 2012)

Se fabricó el mortero como se describe en la sección 3.5.2 y se vertió en un molde circular. Inmediatamente se llevó el molde a la temperatura en la cual se estimó el tiempo de fraguado.

El procedimiento para determinar la resistencia a la penetración y los tiempos de fraguado es el mismo descrito en la sección 3.4.3.

### 3.5.4 Resistencia a la Compresión de Cubos de Mortero

Para la aplicación de los tres métodos para determinar el valor de la constante de velocidad  $k$  descrito en la sección 2.3.4 se realizó el ensayo de compresión en cubos de mortero de acuerdo a la norma ASTM C 109. Para esto se fabricó el mortero usando el procedimiento descrito en el numeral 3.5.2. Se fabricaron cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm, en dos capas de aproximadamente de la mitad del volumen apisonando cada capa con 32 golpes (Véase Figura 3.15).



Figura 3.15 Cubos de mortero

Se llevaron los cubos de mortero inmediatamente a cada una de las cámaras de las tres temperaturas. A las 24 horas se procedió a retirar los moldes y se introdujeron los cubos en baños



de agua a cada una de las temperaturas su edad de falla. La cantidad de cubos de mortero fabricados se muestra en la Tabla 3.19 y Tabla 3.20.

<b>Mortero Equivalente Muro</b>	
<b>Temperatura</b>	<b>No. Cubos</b>
23°	21
13°	21
18°	18

Tabla 3.19 Cantidad de Cubos de Mortero – Muro

<b>Mortero Equivalente Placa</b>	
<b>Temperatura</b>	<b>No. Cubos</b>
23°	21
13°	21
18°	18

Tabla 3.20 Cantidad de Cubos de Mortero – Placa

Con el fin de determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de cubos de mortero, se retiraron del agua y fueron ensayados en condición húmeda. Se ensayaron tres cubos por cada edad. Las edades de falla fueron: doble tiempo de fraguado final, 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días.

Se colocó el espécimen de mortero entre el bloque inferior y superior dispuesto en la maquina universal, verificando que este alineado con el eje. En el momento de empezar el ensayo el indicador de carga se puso en cero y se procedió a cargar el cubo de mortero hasta el momento en el que el indicador de carga mostró que esta empezó a decrecer. Se registró la carga máxima soportada por el cubo. (Véase Figura 3.16).

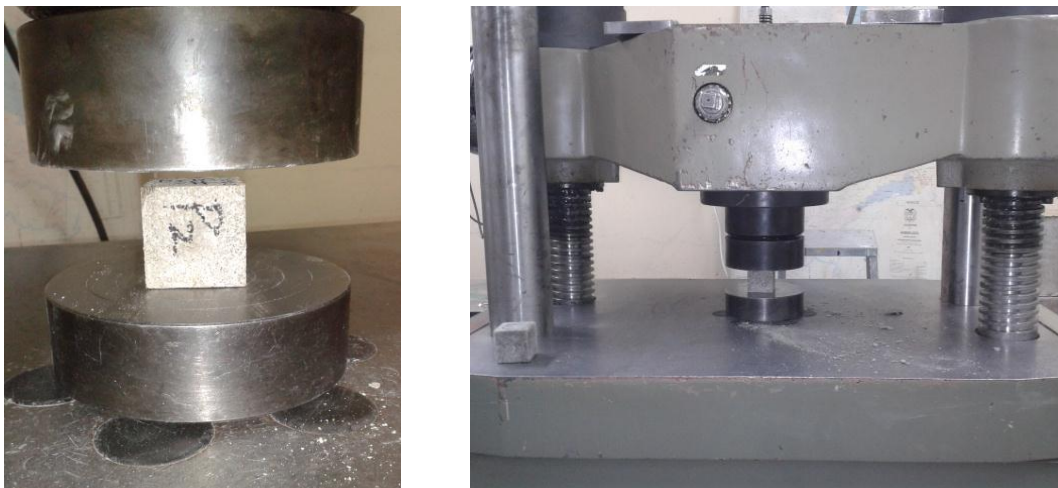


Figura 3.16 Ensayo De Resistencia a la Compresión Cubos de Mortero

Se calcula la compresión del mortero de acuerdo a la ecuación 3.9.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (3.9)$$

Donde

$f_m$ : Resistencia a la Compresión (MPa)

$P$ : Carga máxima (N)

$A$ : Área de la superficie (mm<sup>2</sup>)

### 3.5.5 Instrumentación de Temperatura

Con el fin de construir la curva de madurez de los concretos en estudio, se midió la temperatura en cilindros de concreto, los cuales fueron fabricados con base en el procedimiento enunciado en la sección 3.4.4. Estos cilindros se elaboraron en el mismo bache de concreto de los cilindros usados para los ensayos de resistencia a la compresión, tracción y módulo.

Inmediatamente fundidos los cilindros, se llevaron a la cámara de curado con temperatura controlada de 23° C y humedad relativa de 100%. Se insertaron termopares tipo K en el centro de los cilindros, para medir la temperatura de forma continua (Véase Figura 3.17).



Figura 3.17 Instrumentación en cilindros

Los termopares estaban conectados a un sistema de adquisición de datos que registraba temperaturas cada 10 segundos, de cada uno de los cilindros. Adicionalmente se dispuso un termopar que registraba la temperatura ambiente de la cámara húmeda.

Se decidió dejar el montaje por 72 horas debido a que en el estudio hecho por Zhang en el 2008 se demostró que después de un tiempo de aproximadamente 24 horas la temperatura del concreto bajo una condición controlada se estabiliza, y toma el valor de la temperatura ambiente (Véase Figura 3.18).

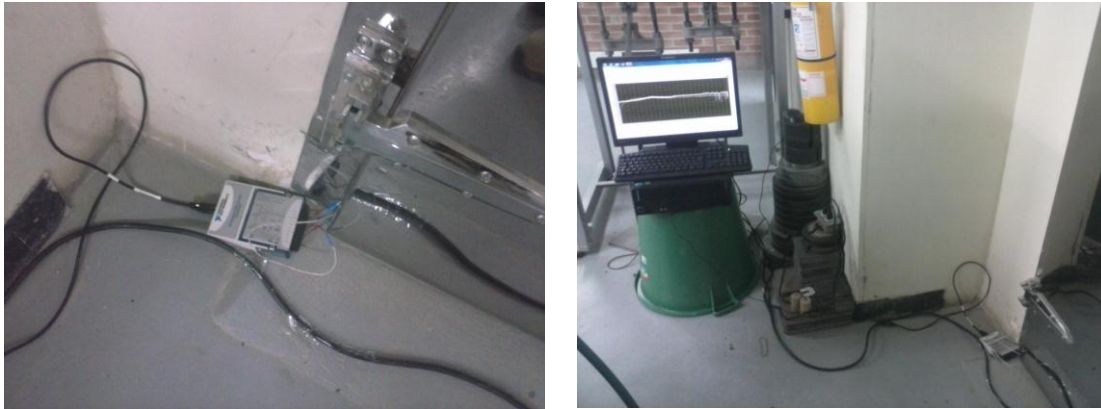


Figura 3.18 Montaje medición de temperatura

### 3.6 Instrumentación en Campo

Con el fin de validar el método de la madurez implementado en el laboratorio, se realizaron mediciones en concreto puesto en obra bajo condiciones no controladas. Para este objetivo se desarrolló un procedimiento experimental que está dividido en dos partes. La primera consiste en la elaboración de cilindros con concreto hecho por Cemex en planta y la instrumentación para medición temperaturas de los mismos. La segunda parte consiste en instrumentar para medir temperaturas directamente sobre el elemento.

#### 3.6.1 Elaboración e Instrumentación de Cilindros en Obra

Para la calibración y validación del método se elaboraron cilindros con el concreto que es fabricado en la planta de Cemex en su obra, en la obra Punta del Este, donde se construye con concretos con la misma dosificación que los del caso de estudio en el laboratorio. Se elaboraron 7 cilindros para cada mezcla. De los cuales 6 fueron fallados a compresión a las edades de 1, 3 y 7 días.

El cilindro restante fue usado para determinar el historial de temperaturas. Esto se hizo introduciendo un termopar en el centro del cilindro, el cual estaba conectado a un sistema de adquisición de datos, que registraba valores de temperatura cada 10 segundos. El registro de temperaturas se hizo por un periodo de 7 días con el montaje que se muestra en la figura 3.19.



Figura 3.19 Montaje medición de temperatura

Se decidió llevar a cabo la instrumentación para validar el método de laboratorio en cilindros de obra para evitar la extracción núcleos de la placa. Esto con el fin de tener las mismas condiciones de los elementos que son ensayados a compresión y los elementos a los que se les registra la temperatura.

### 3.6.2 Instrumentación del Elemento de Concreto

La instrumentación para la medición de temperatura sobre el elemento de concreto se llevó a cabo en la obra Punta del Este de la constructora INGENAL, en la cual el concreto es suministrado por Cemex Colombia y tiene el mismo diseño de mezcla que el concreto estudiado en el laboratorio. Para el presente Trabajo de Grado solo fue posible la instrumentación sobre una placa de concreto. El muro no se instrumentó debido a que no se pudo lograr el permiso para la medición de dos elementos en la obra, por lo que se decidió instrumentar la placa pues esta tiene mayor incidencia en el momento del descimbrado ya que el concreto estará sometido a esfuerzos de flexión.

Para la instrumentación de la placa se llegó antes de su vaciado, y se verificó que el asentamiento del concreto estuviera en los rangos de especificación. Una vez vibrado y enrasado se procedió a la instrumentación en diferentes puntos y profundidades de la placa (Véase Figura 3.20)



Figura 3.20 Instrumentación Placa – Obra Punta del Este

La instrumentación se hizo en siete puntos de la placa. Esta se llevó a cabo con dos instrumentos diferentes de adquisición de datos de temperatura: un madurimetro y un datalogger. Los cuales estaban conectados a termocuplas tipo K, que a su vez estaban embebidas en el concreto por medio de un pitillo, que evita la pérdida del termopar. Los equipos midieron la evolución de temperaturas por un periodo de 20 horas aproximadamente, periodo en el cual se considera que el concreto adquiere la resistencia para retirar las formaletas.

# CAPITULO 4. RESULTADOS DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

## 4.1 Introducción

En el presente trabajo de grado se realizaron diferentes medidas para lograr los objetivos. Los resultados se dividen en tres partes generales, las cuales van a ser descritas y analizadas detalladamente a lo largo de este capítulo.

La primera parte consiste en las mediciones realizadas con el fin de determinar las propiedades mecánicas del concreto. En esta etapa se usaron 20 cilindros por mezcla y 10 vigas. Se realizaron ensayos de compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad en cilindros y se realizaron ensayos de resistencia a flexión en vigas. Los ensayos anteriores se realizaron con el fin de corroborar la teoría propuesta por Calavera en 1981, en cuanto a la evolución de estas propiedades.

La segunda parte se compone de los resultados que llevaron a la estimación de la energía de activación. Los resultados consisten en la resistencia a compresión de cubos de mortero y tiempos de fraguado. Seguidamente el desarrollo de los tres métodos para determinar el valor de la constante de velocidad  $k$ . Por último se evalúa la edad equivalente con base en las mediciones de temperatura.

Finalmente, se construye la curva de madurez con los resultados obtenidos anteriormente. La cual fue calibrada con los resultados obtenidos de las resistencias de cilindros en obra y la medición de temperatura de los mismos.

## 4.2 Propiedades Mecánicas del Concreto

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los ensayos practicados al concreto en estado endurecido, con el fin de determinar la evolución de sus propiedades mecánicas.

### 4.2.1 Resistencia a la Compresión

Se realizó el ensayo a compresión en el concreto con el fin de evaluar la evolución de esta propiedad en el tiempo. Los resultados obtenidos se muestran de forma resumida en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2. Los resultados detallados de este ensayo se encuentran en el Anexo 1.

Edad	Resistencia Compresión (MPa)
28	29.9
14	26.1
7	23.0
3	18.7
1	11.5

Tabla 4.1 Resumen de Resistencias a la Compresión Placa

Edad	Resistencia Compresión (MPa)
28	38.8
14	33.7
7	29.1
3	23.2
1	15.3

Tabla 4.2 Resumen de Resistencias a la Compresión Muro



Con base en la Figura 4.1 y la Figura 4.2 se concluye que el comportamiento de la resistencia del concreto con respecto a la edad de falla de los cilindros de las dos mezclas es el esperado, pues presenta una curva de evolución típica de resistencia a compresión del concreto.

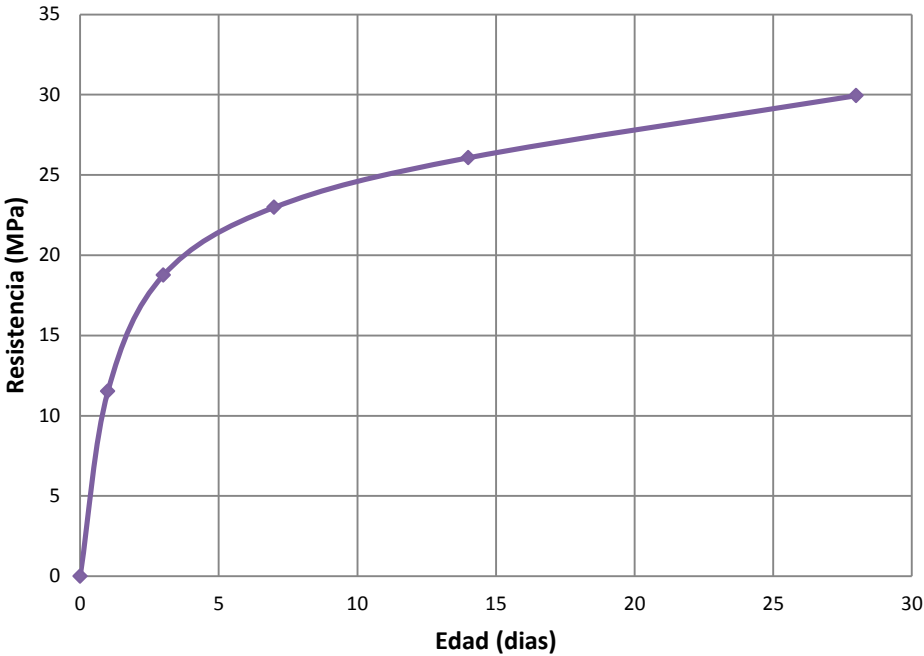


Figura 4.1 Resistencia a la Compresión Placa.

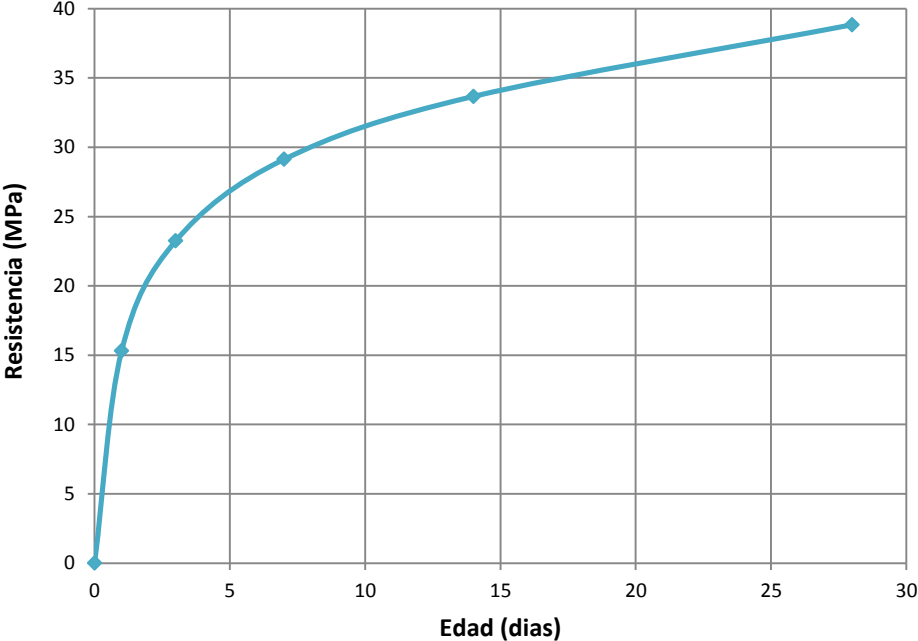


Figura 4.2 Resistencia a la Compresión Muro

En la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se analiza la evolución de las resistencias obtenidas para cada mezcla con respecto a las resistencias de diseño.

<b>Edad</b>	<b>Resistencia Compresión (% Evolución)</b>
28	142.6
14	124.1
7	109.4
3	89.3
1	54.8

Tabla 4.3 Porcentaje de Evolución de Resistencia a la Compresión – Placa

<b>Edad</b>	<b>Resistencia Compresión (% Evolución)</b>
28	138.7
14	120.2
7	104.0
3	83.0
1	54.7

Tabla 4.4 Porcentaje de Evolución de Resistencia a la Compresión – Muro

En la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se observa que para las dos mezclas se supera la resistencia de diseño a la edad de especificación de 28 días, con un porcentaje de 138% para muro y 142% para placa. Adicionalmente a la edad de un día en ambos casos el concreto ha desarrollado más de un 50% de la resistencia de diseño, esto es de suma importancia para estos concretos en particular debido a la necesidad de altas resistencias iniciales en sistemas industrializados.

#### 4.2.2 Resistencia a la Flexión

Se realizó el ensayo a flexión en el concreto con el fin de evaluar la evolución de esta propiedad en el tiempo. Los resultados obtenidos se muestran de forma resumida en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6. Los resultados detallados de este ensayo se encuentran en el Anexo 2.

<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la Flexión (MPa)</b>
28	4.1
14	3.9
7	3.6
3	3.3
1	2.3

Tabla 4.5 Resumen de Resistencias a Flexión Placa.

<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la Flexión (MPa)</b>
28	5.1
14	5.0
7	4.4
3	3.8
1	3.4

Tabla 4.6 Resumen de Resistencias a Flexión Muro.

En la Figura 4.3 y Figura 4.4 se relaciona la resistencia a flexión vs su edad de falla, se puede observar que en las edades tempranas la evolución del módulo de rotura es mayor que en las últimas edades. Los resultados son los esperados en cuanto a que la resistencia a la flexión evoluciona con el tiempo.

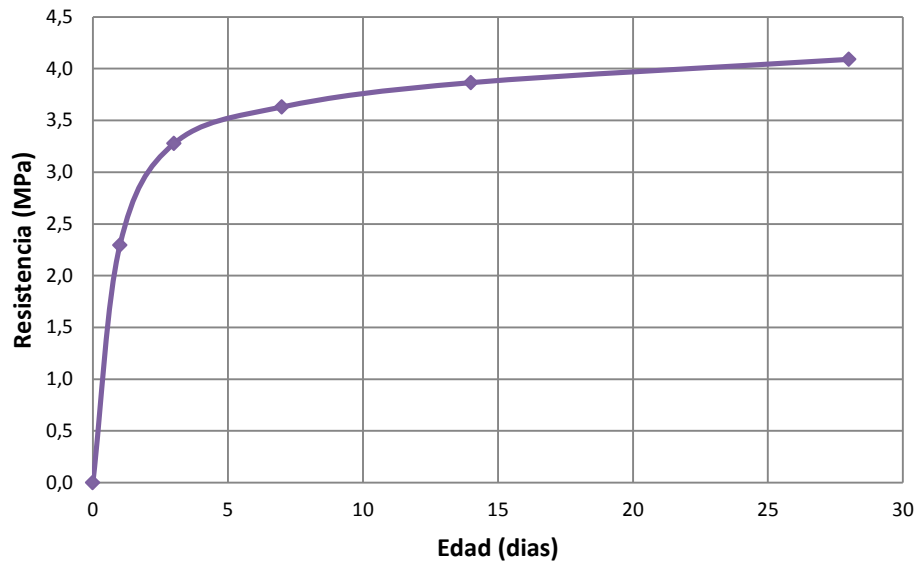


Figura 4.3 Resistencia a la Flexión Placa.

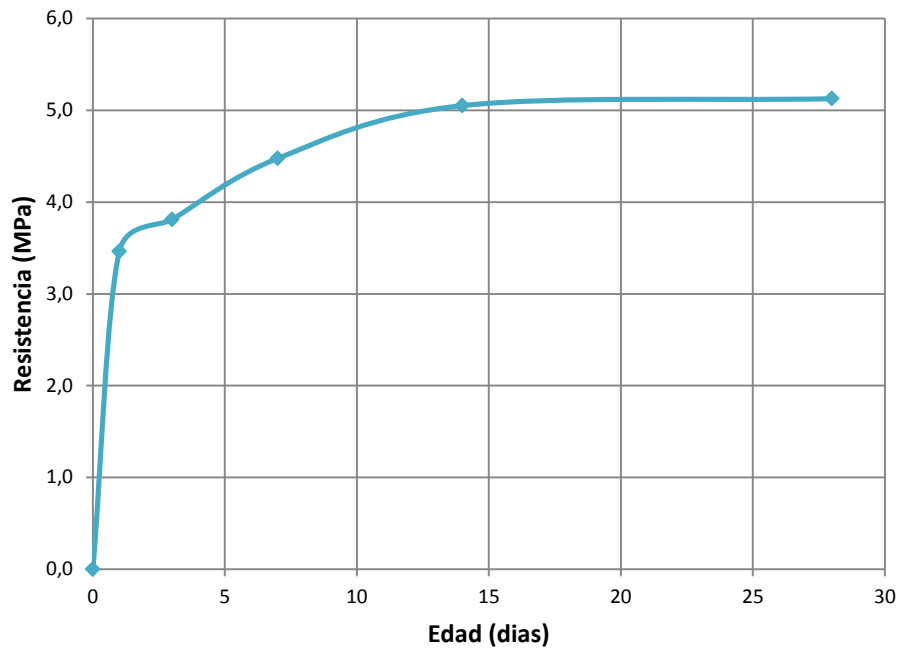


Figura 4.4 Resistencia a la Flexión Muro.

En la Figura 4.5 se puede apreciar el tipo de falla que se presentó en todas las vigas ensayadas para las dos mezclas. Las fallas ocurrieron en el tercio medio de la luz de forma vertical, como se esperaba. Esto es debido a que las vigas no tenían acero de refuerzo haciendo que la falla se diera únicamente por flexión.





Figura 4.5 Falla Viga por Flexión.

En los resultados obtenidos se concluye que la resistencia a la flexión tanto en muro como en placa se encuentra en el rango teórico del 10% al 20% de la resistencia a la compresión, teniendo un valor de 13% para las dos mezclas.

Adicionalmente se calculó el módulo de rotura con la expresión propuesta por la NSR – 10 en el Título C sección 9.5.2.3, con respecto a la resistencia a compresión, para realizar una comparación con los resultados obtenidos en el laboratorio, como se muestra en la Tabla 4.7 y la Tabla 4 8.

$$f_r = 0,62 * \lambda * \sqrt{f_c'} \quad (4.1)$$

$f_r$ : Módulo de Rotura (MPa)

$\lambda$ : Factor de modificación que tiene en cuenta las propiedades mecánicas reducidas del concreto de peso liviano, relativa a los concretos de peso normal de igual resistencia a la compresión

$f_c'$ : Resistencia a Compresión (MPa)

Edad	Resistencia Flexión (MPa)	Resistencia a la Flexión NSR - 10 (MPa)
28	4,1	2,5
14	3,9	2,4
7	3,6	2,2
3	3,3	2,0
1	2,3	1,6

Tabla 4.7 Comparación de Resistencia a la Flexión con la NSR 10 Placa.

<b>Edad</b>	<b>Resistencia Flexión (MPa)</b>	<b>Resistencia a la Flexión NSR - 10 (MPa)</b>
28	5,1	2,9
14	5,1	2,7
7	4,5	2,5
3	3,8	2,2
1	3,5	1,8

Tabla 4.8 Comparación de Resistencia a la Flexión con la NSR 10 Muro.

En la Tabla 4.7 y Tabla 4.8 se evidencia que la resistencia a flexión obtenida en laboratorio es mayor al calculado con la norma.

### 4.2.3 Resistencia a la Tracción Indirecta

Se realizó el ensayo a la tracción indirecta en el concreto con el fin de evaluar la evolución de esta propiedad en el tiempo. Se determinó la tracción de forma indirecta debido a que en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana no se cuenta con el equipo necesario para determinar tracción directa en el concreto. Los resultados obtenidos se muestran de forma resumida en la Tabla 4.9 y Tabla 4.10. Los resultados detallados de este ensayo se encuentran en el Anexo 3.

<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la tracción indirecta (MPa)</b>
28	2.6
14	2.3
7	2.0
3	1.7
1	1.3

Tabla 4.9 Resumen de Resistencias a la Tracción Indirecta Placa.

<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la tracción indirecta (MPa)</b>
28	3.2
14	2.7
7	2.3
3	1.9
1	1.5

Tabla 4.10 Resumen de Resistencias a la Tracción Indirecta Muro.

En la Figura 4.6 y Figura 4.7 se relaciona la resistencia a tracción vs su edad de falla, se puede observar que en las edades tempranas la evolución es mayor que en las últimas edades. Los resultados son los esperados en cuanto a que la resistencia a la tracción evoluciona con el tiempo.

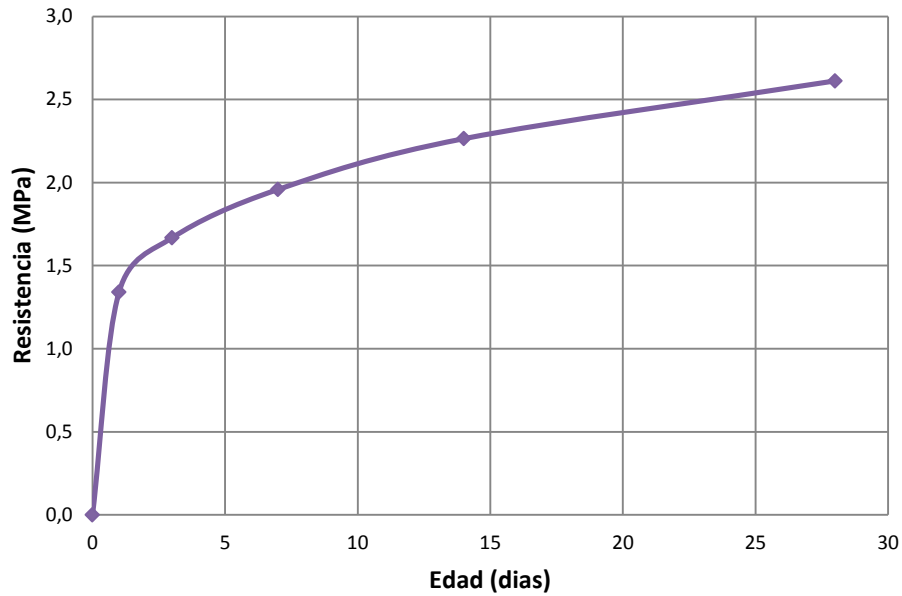


Figura 4.6 Resistencia a la Tracción Indirecta Placa.

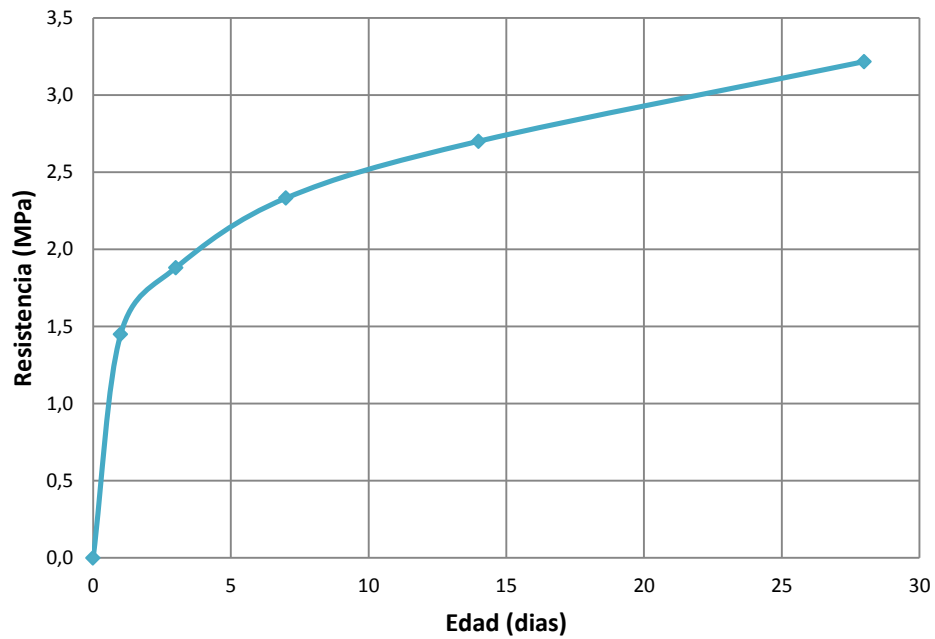


Figura 4.7 Resistencia a la Tracción Indirecta Muro.

En la Figura 4.8 se observa la falla típica de los cilindros ensayado a tracción indirecta, en la cual se puede apreciar que falla la pasta de cemento y no los agregados.



Figura 4.8 Falla por Tracción Indirecta.

#### 4.2.4 Módulo de Elasticidad

Se realizó el ensayo de módulo de elasticidad en el concreto con el fin de evaluar la evolución de esta propiedad en el tiempo. Los resultados obtenidos se muestran de forma resumida en la Tabla 4.11 y Tabla 4.12. Los resultados detallados de este ensayo se encuentran en el Anexo 4.

<b>Edad</b>	<b>Módulo Elasticidad MPa</b>
28	22208,4
14	18561,8
7	17406,0
3	15601,6
1	12845,9

Tabla 4.11 Resumen Modulo de Elasticidad Placa

<b>Edad</b>	<b>Módulo Elasticidad MPa</b>
28	25035,5
14	23592,4
7	21490,1
3	15946,2
1	15340,7

Tabla 4.12 Resumen Módulo de Elasticidad Muro

Como se puede apreciar en la Figura 4.9 y Figura 4.10 el módulo de elasticidad evoluciona con la edad para las dos mezclas.

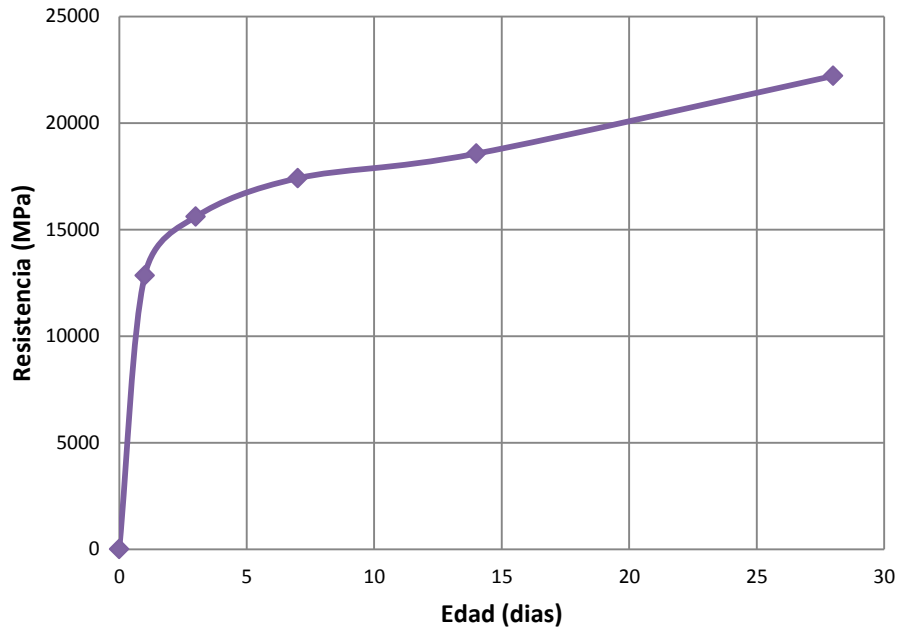


Figura 4.9 Módulo de Elasticidad Placa

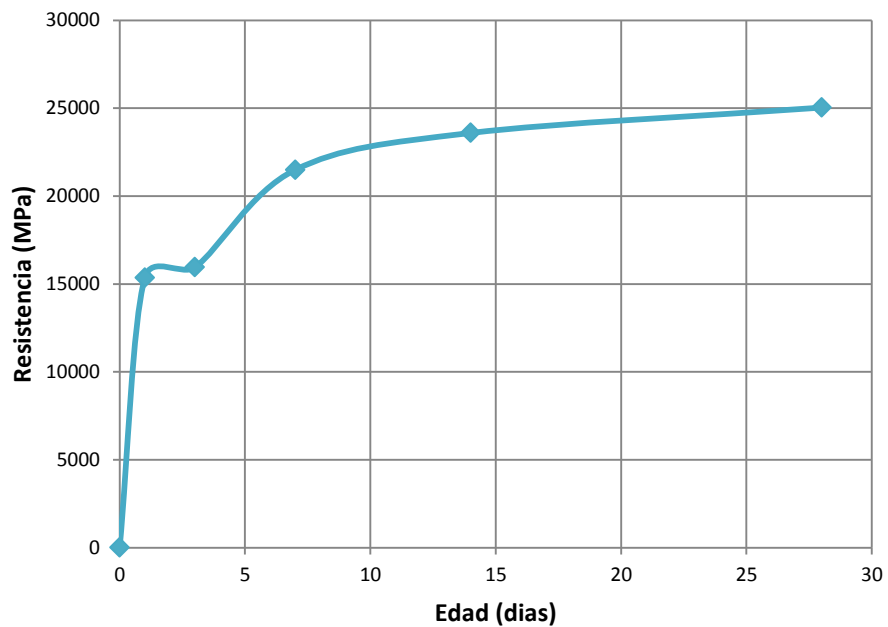


Figura 4.10 Módulo de elasticidad muro

Adicionalmente se calculó el módulo de elasticidad con la expresión propuesta por la NSR – 10 en el Titulo C sección 8.5.1, con respecto a la resistencia a compresión, para realizar una comparación con los resultados obtenidos en el laboratorio, como se muestra en la Tabla 4.11 y la Tabla 4.12. El módulo de elasticidad se calcula por medio de la siguiente ecuación.

$$E_c = 5500 * \sqrt{f'_c} \tag{4.2}$$

Donde

$E_c$ : Módulo de Elasticidad (MPa)

$f_c'$ : Resistencia a la compresión (MPa)

Edad	Módulo de Elasticidad (Mpa)	Módulo de Elasticidad Calculado (Mpa)
28	22208,4	30094,6
14	18561,8	28081,8
7	17406,0	26365,3
3	15601,6	23814,1
1	12845,9	18662,6

Tabla 4.13 Comparación de Módulo Placa

Edad	Módulo de Elasticidad (Mpa)	Módulo de Elasticidad Calculado (Mpa)
28	25035,6	34274,7
14	23592,4	31911,6
7	21490,2	29680,3
3	15946,2	26516,4
1	15340,7	21515,4

Tabla 4.14 Comparación de Módulo Muro

En la Tabla 4.13 y Tabla 4.14 se muestra que el módulo de elasticidad obtenido en laboratorio es menor al calculado con la norma. Esto evidencia que la norma NSR – 10 sobre valora los valores de módulo de elasticidad para el concreto, lo cual es contraproducente debido a que se diseñan concretos con módulos mayores a los que tiene el concreto puesto en obra.

#### 4.2.5 Resumen Propiedades Físico – Mecánicas

La información obtenida de los ensayos anteriores se consolida en la Tablas 4.15 y Tabla 4.16.

Cuadro Resumen				
Edad	Resistencia Compresión (MPa)	Resistencia Tracción Indirecta (MPa)	Resistencia Flexo Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
28	29,9	2,6	4,1	22208,4
14	26,1	2,3	3,9	18561,8
7	23,0	2,0	3,6	17406,0
3	18,7	1,7	3,3	15601,6
1	11,5	1,3	2,3	12845,9

Tabla 4.15 Resumen Propiedades Mecánicas Muro

Cuadro Resumen				
Edad	Resistencia Compresión (MPa)	Resistencia Tracción Indirecta (MPa)	Resistencia Flexo Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
28	38,8	3,2	5,13	25035,6
14	33,7	2,7	5,05	23592,4
7	29,1	2,3	4,48	21490,2
3	23,2	1,9	3,81	15946,2
1	15,3	1,5	3,46	15340,7

Tabla 4.16 Resumen Propiedades Mecánicas Placa

En la Tabla 4.17 y Tabla 4.18 se muestra los porcentajes de evolución de las propiedades mecánicas de los concretos en estudio.

Cuadro Resumen				
Edad	Resistencia Compresión % Evolución	Resistencia Tracción Indirecta % Evolución	Resistencia Flexo Tracción % Evolución	Módulo de Elasticidad % Evolución
28	100	100	100	100
14	87	87	94	84
7	77	75	89	78
3	63	64	80	70
1	38	51	56	58

Tabla 4.17 Evolución de Propiedades Mecánicas Placa

Cuadro Resumen				
Edad	Resistencia Compresión % Evolución	Resistencia Tracción Indirecta % Evolución	Resistencia Flexo Tracción % Evolución	Módulo de Elasticidad % Evolución
28	100	100	100	100
14	87	84	99	94
7	75	72	87	86
3	60	58	74	64
1	39	45	68	61

Tabla 4.18 Evolución de Propiedades Mecánicas Muro

#### 4.2.6 Tiempos de Fraguado de Concreto

Los tiempos de fraguado para el concreto se hacen tomando mediciones en la cámara de curado a 23° C. Se construye la gráfica de resistencia a la penetración vs el tiempo, para cada una de las mezclas. Los resultados detallados se encuentran en el Anexo 5.

✓ Tiempo de Fraguado Muro

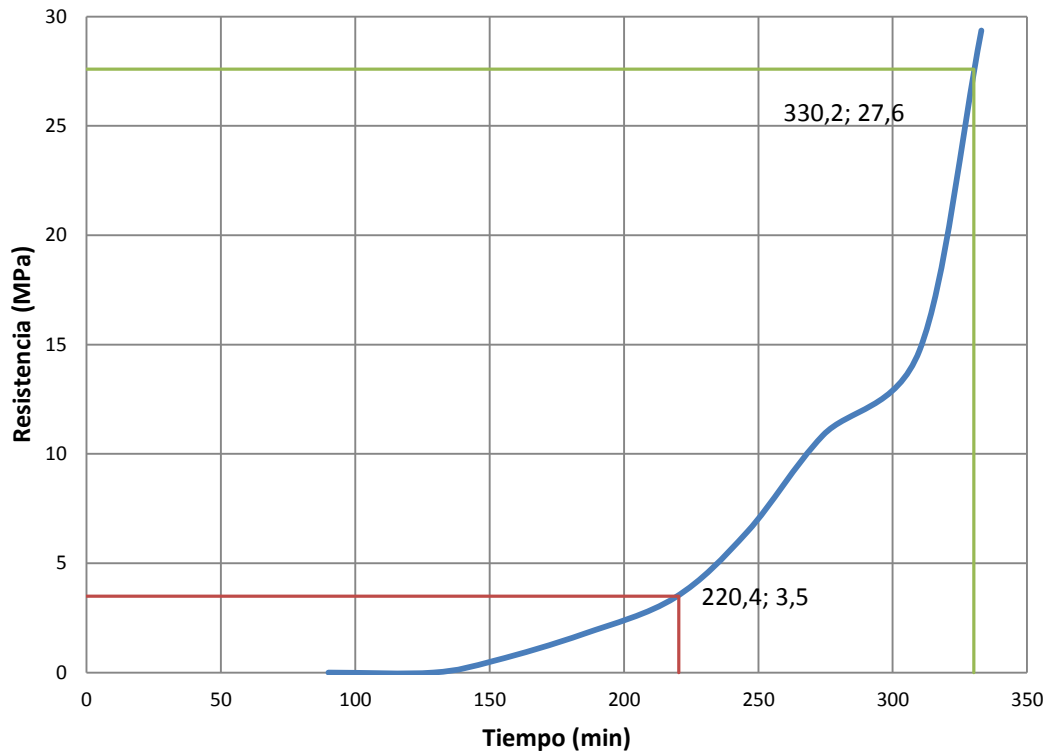


Figura 4.11 Tiempo de Fraguado Concreto Muro – Método Gráfico

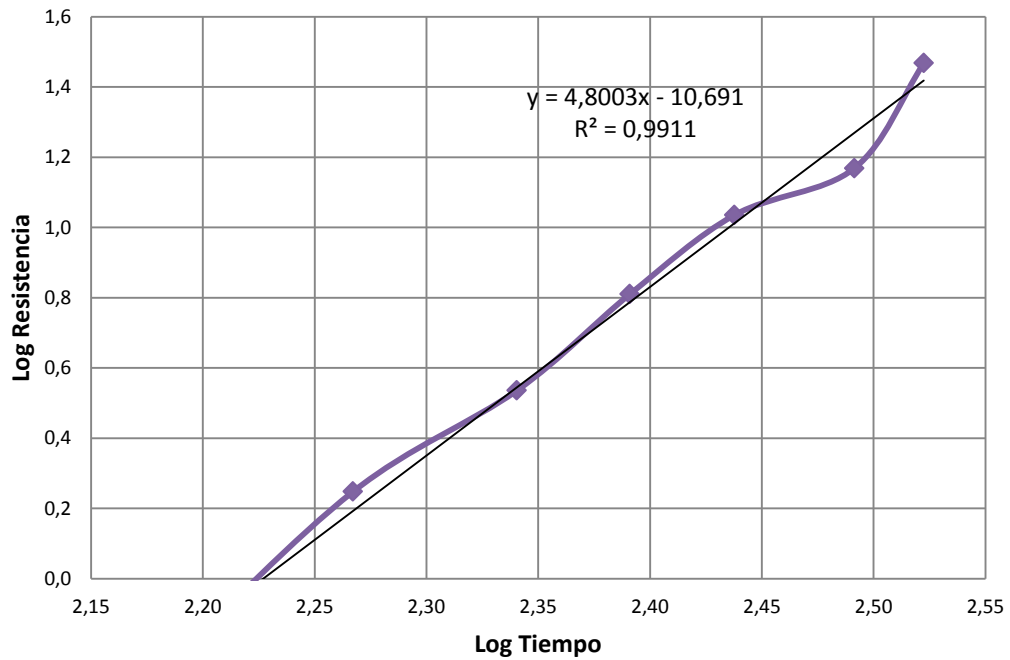


Figura 4.12 Tiempo de fraguado concreto muro – método logarítmico



✓ Tiempo de Fraguado Placa

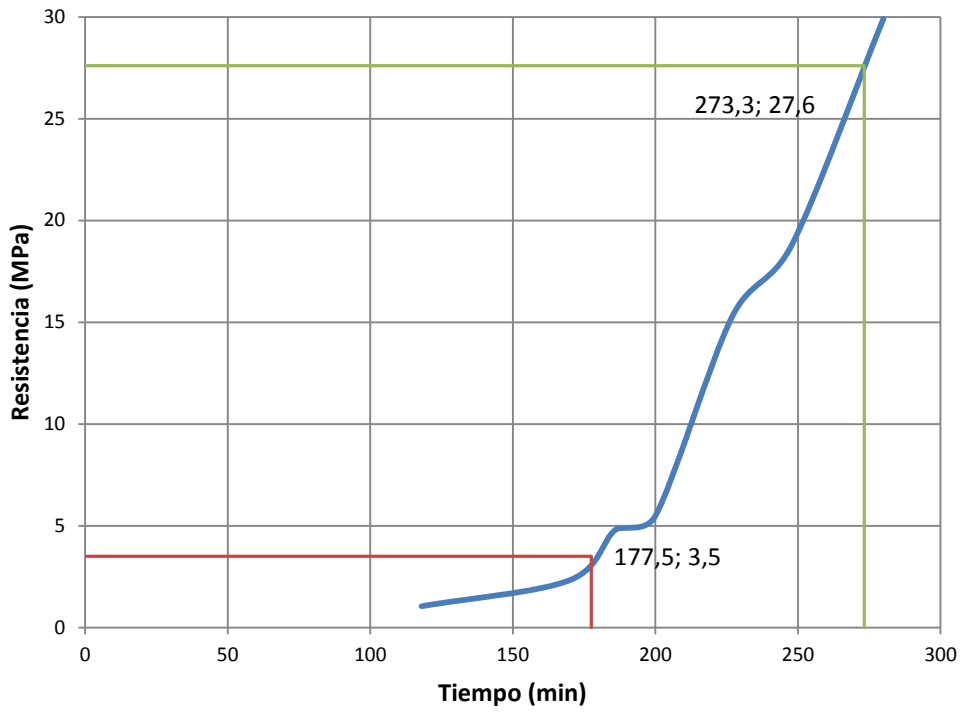


Figura 4.13 Tiempo de Fraguado Concreto Placa – Método Gráfico

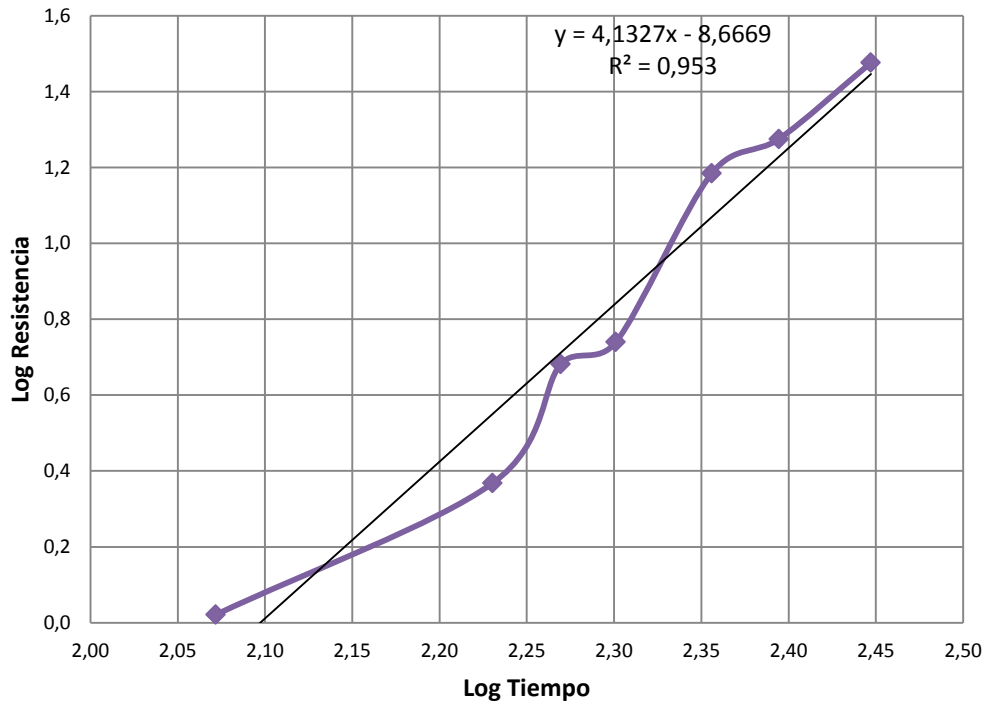


Figura 4.14 Tiempo de fraguado concreto placa – método logarítmico

En la Tabla 4.19 se muestran los resultados de los tiempos de fraguado de forma resumida.

Tiempos de Fraguado Muro		Método Grafico	Método Logarítmico
<b>Muro</b>	Fraguado Inicial (Hr)	3.67	3.65
	Fraguado Final (Hr)	5.50	5.61
<b>Placa</b>	Fraguado Inicial (Hr)	2.96	2.82
	Fraguado Final (Hr)	4.56	4.65

Tabla 4.19 Tiempos de fraguado de concreto

Para los dos concretos de estudio los valores de tiempos de fragua inicial y final arrojados por los dos métodos son similares. Por lo tanto, en este caso se decidió usar los resultados de tiempos de fraguado del método gráfico.

### 4.3 Determinación de Energía de Activación

Los resultados que llevaron a la estimación de la energía de activación por cada uno de los métodos descritos en el numeral 2.3.4 se exponen con detalle a continuación.

#### 4.3.1 Tiempos de Fraguado de Mortero

A continuación se muestran los resultados de tiempos de fraguado para muro y placa en cada una de las temperaturas. Esto se desarrolló por los dos métodos descritos en el numeral 3.4.3. Ver Anexo 6.

##### ✓ Tiempos de Fraguado Mortero Placa

A continuación se muestran los tiempos de fraguado consolidados para las tres temperaturas de curado.

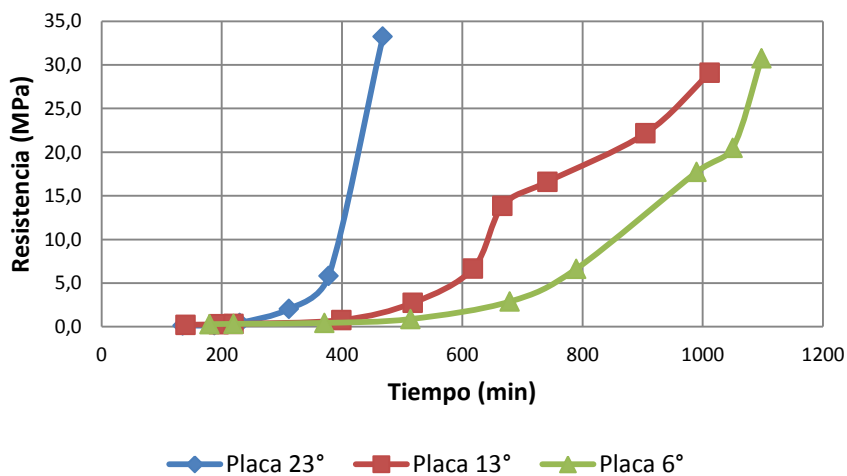


Figura 4.15 Evolución del fraguado –mortero placa

Tiempos de Fraguado Placa		Método Gráfico	Método Logarítmico
T (23°C)	Fraguado Inicial (Hr)	5,88	5,46
	Fraguado Final (Hr)	7,49	8,63
T (13°C)	Fraguado Inicial (Hr)	9,98	5,02
	Fraguado Final (Hr)	16,48	12,02
T (6°C)	Fraguado Inicial (Hr)	11,32	10,09
	Fraguado Final (Hr)	17,51	22,19

Tabla 4.20 Tiempos de Fraguado - Mortero Placa

✓ Tiempos de Fraguado Mortero Muro

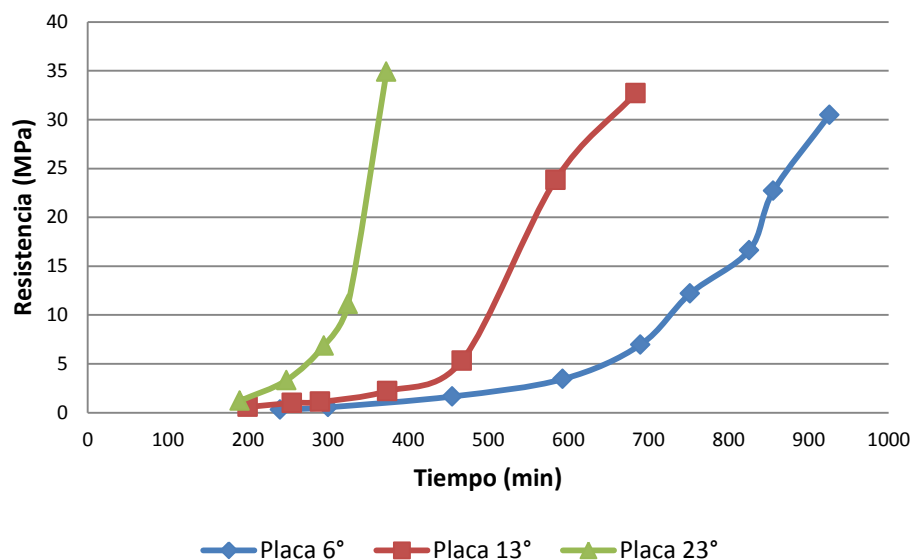


Figura 4.16 Evolución del Fraguado –Mortero Muro

Tiempos de Fraguado Muro		Método Gráfico	Método Logarítmico
T (6°C)	Fraguado Inicial (Hr)	9.91	8.80
	Fraguado Final (Hr)	15.00	16.18
T (13°C)	Fraguado Inicial (Hr)	7.26	6.27
	Fraguado Final (Hr)	10.44	11.40
T (23°C)	Fraguado Inicial (Hr)	4.17	3.52
	Fraguado Final (Hr)	5.97	6.35

Tabla 4.21 Tiempos de fraguado de mortero muro

De acuerdo a la Figura 4.15 y la Figura 4.16 se puede concluir que la evolución de los tiempos de fraguado es más lenta cuando la temperatura es menor. Esto se debe a que la reacción de hidratación es directamente proporcional a la temperatura, es decir que a temperaturas altas los tiempos de fraguado van a ser menores que a temperaturas bajas.

Para cada una de las mezclas y temperaturas se calcularon los tiempos de fraguado inicial y final por los dos métodos descritos con anterioridad, estos resultados se muestran en la Tabla 4.14 y

Tabla 4.15. Para el presente estudio se decidió adoptar los valores del método gráfico debido a que las líneas de ajuste del método logarítmico tenían un coeficiente de correlación relativamente bajo.

### 4.3.2 Resistencias de Cubos de Mortero

Una vez realizados los ensayos de resistencia a la compresión se procedió a analizar los resultados obtenidos para cada una de las mezclas. En la Tabla 4.17 y 4.18 se exponen los resultados obtenidos de forma resumida. En el Anexo 7 se encuentran los resultados detallados.

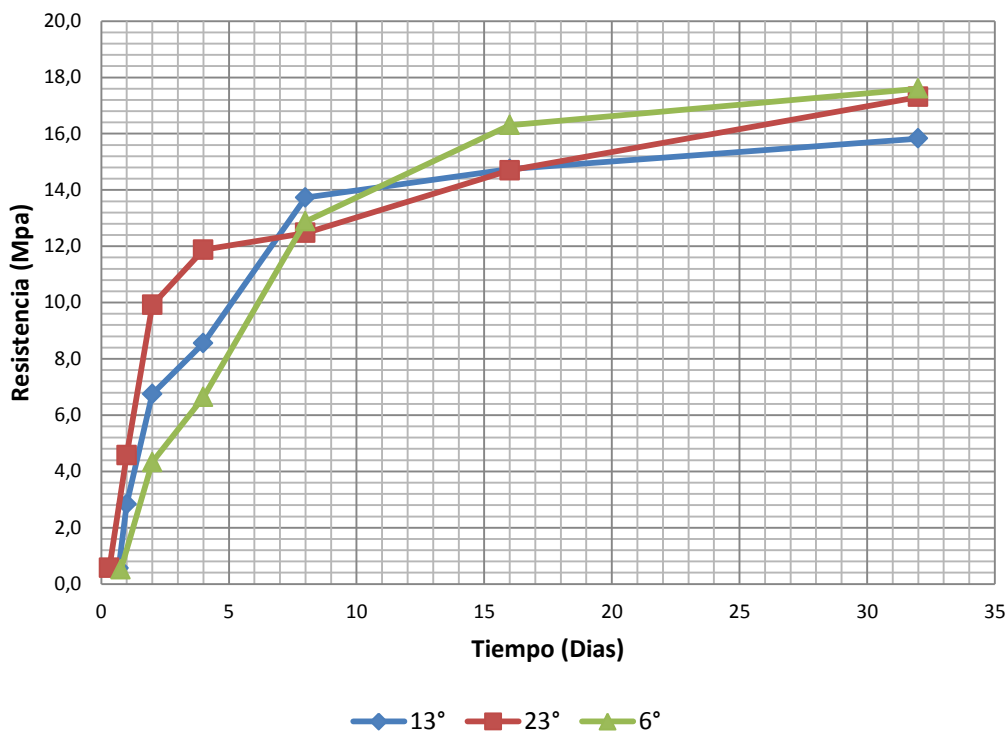


Figura 4.17 Evolución de la Resistencia a la Compresión Mortero – Placa

RESUMEN PLACA					
TEMPERATURA 6°		TEMPERATURA 13°		TEMPERATURA 23°	
Edad	Resistencia MPa	Edad	Resistencia MPa	Edad	Resistencia MPa
32	17.60	32	15.83	32	17.31
16	16.30	16	14.74	16	14.70
8	12.88	8	13.73	8	12.47
4	6.64	4	8.55	4	11.87
2	4.32	2	6.75	2	9.91
0.76	0.52	1	2.84	1	4.57
		0.69	0.55	0.31	0.57

Tabla 4.22 Resistencias Mortero - Placa

La Figura 4.17 corresponde a la gráfica de los datos consignados en la Tabla 4.22. Se puede observar que la evolución de las resistencias a edades tempranas es más rápida cuando la temperatura de curado es mayor, sin embargo, a medida que la edad aumenta la ganancia de resistencia a compresión es mayor cuando las temperaturas de curado son más bajas. Una posible razón para este comportamiento, es que la reacción de hidratación en temperaturas de curado bajas se desarrolla en un tiempo mayor que en temperaturas altas.

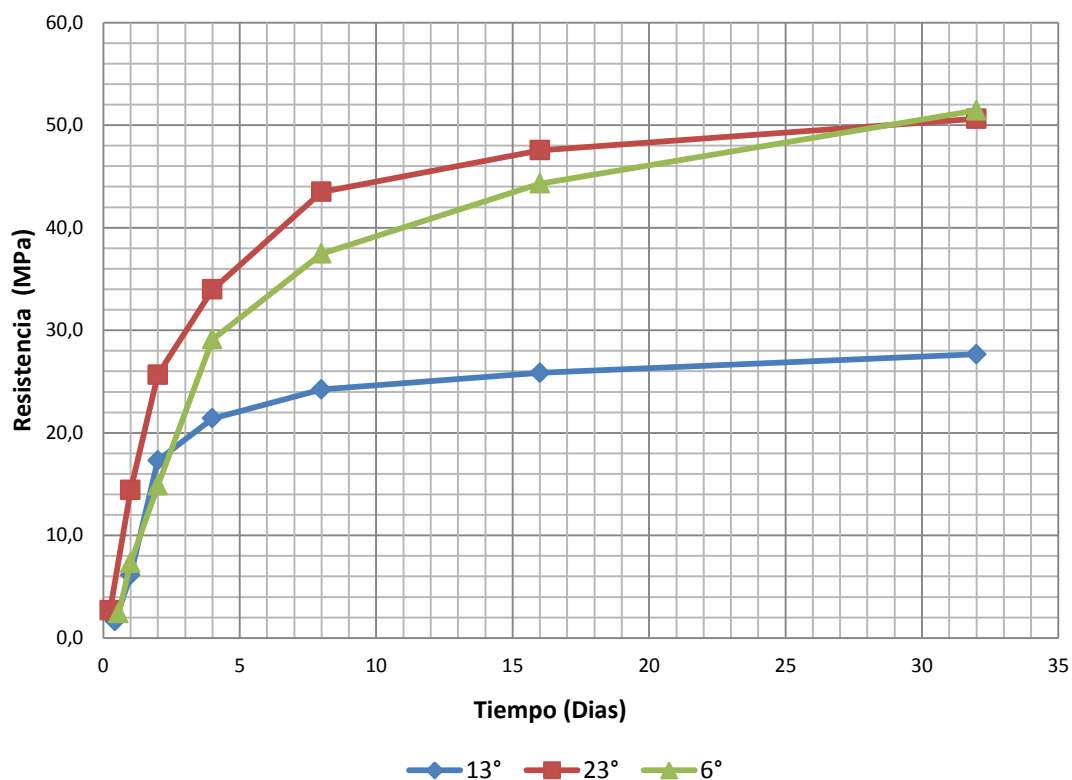


Figura 4.18 Evolución de la Resistencia a la Compresión Mortero – Muro

<b>RESUMEN MURO</b>					
<b>TEMPERATURA 6°</b>		<b>TEMPERATURA 13°</b>		<b>TEMPERATURA 23°</b>	
<b>Edad</b>	<b>Resistencia MPa</b>	<b>Edad</b>	<b>Resistencia MPa</b>	<b>Edad</b>	<b>Resistencia MPa</b>
32	51.44	32	27.65	32	50.62
16	44.31	16	25.84	16	47.56
8	37.48	8	24.22	8	43.50
4	29.11	4	21.40	4	33.97
2	14.85	2	17.30	2	25.67
1	7.32	1	6.12	1	14.41
0.563	2.41	0.44	1.64	0.25	2.70

Tabla 4.23 Resistencias Mortero – Muro

La Figura 4.18 corresponde a la gráfica de los datos consignados en la Tabla 4.23. Se puede observar que el desarrollo de resistencias de la temperatura de 13 °C de curado, no tuvo el comportamiento esperado comparado con las temperaturas de 6 °C y 23 °C. Por la tanto, se decidió repetir el ensayo de compresión en cubos de mortero, obteniendo resultados similares. Una posible causa de las bajas resistencias a compresión en la temperatura de 13 °C, es que la cámara donde se mantenían los cubos, llega a esta temperatura por medio de ráfagas de viento, lo que pudo provocar el secado de los cubos de mortero e influir en la hidratación del cemento. Debido a esto, se resolvió omitir esta temperatura para los futuros cálculos de energía de activación, teniendo en cuenta únicamente los resultados de 6 °C y 23 °C.

### 4.3.3 Determinación de la Constante de Velocidad $k$

#### ✓ Primer Método – Placa

Se presentan los resultados del primer método, descrito en la sección 2.3.4. En la Figura 4.18, Figura 4.20 y Figura 4.21 se muestran las gráficas del inverso de la resistencia vs el inverso del tiempo. Adicionalmente en la Tabla 4.24, Tabla 4.25 y Tabla 4.26 se muestran los resultados de la constante de velocidad  $k$  para placa por el primer método.

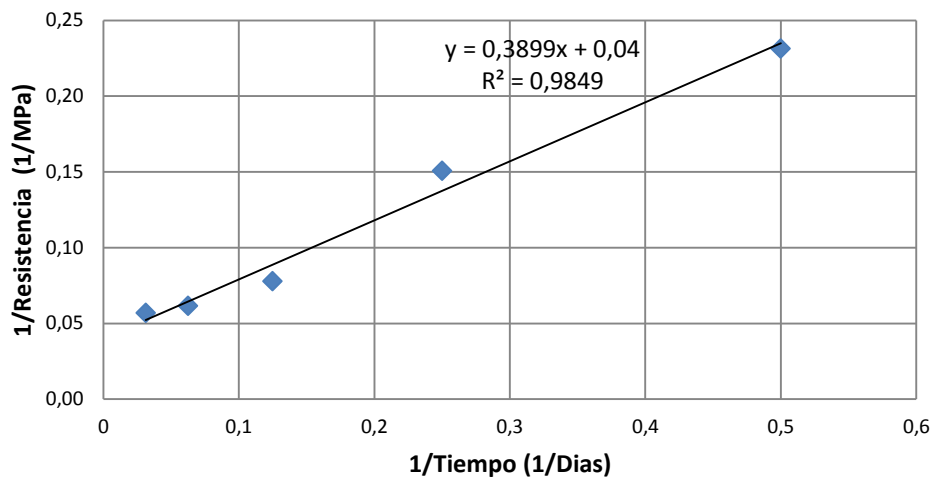


Figura 4.19 Primer Método – T= 6° C Placa

<b>T (°C)</b>	6
<b>T (K)</b>	279
<b>Pendiente</b>	0.399
<b>Intercepto</b>	0.05
<b>K</b>	0.125

Tabla 4.24 Determinación de la constante de velocidad  $k$  primer método – T=6°C Placa

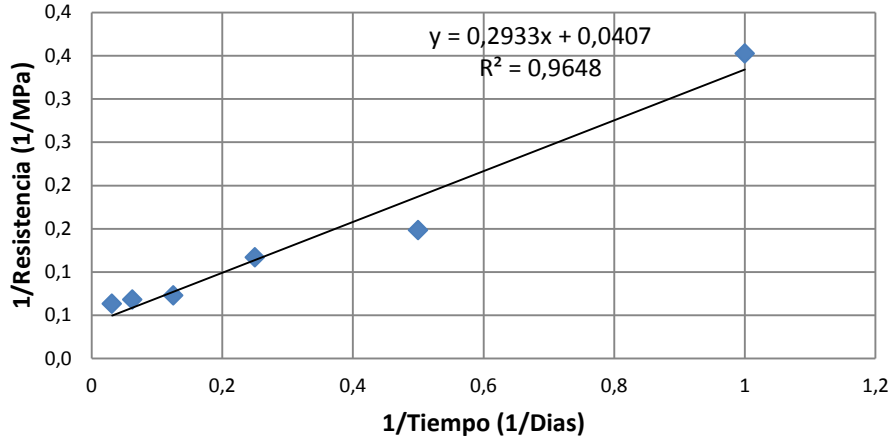


Figura 4.20 Primer Método – T= 13° C Placa

<b>T (°C)</b>	13
<b>T (K)</b>	286
<b>Pendiente</b>	0.293
<b>Intercepto</b>	0.05
<b>K</b>	0.170

Tabla 4.25 Determinación de la constante de velocidad  $k$  primer método – T=13°C Placa

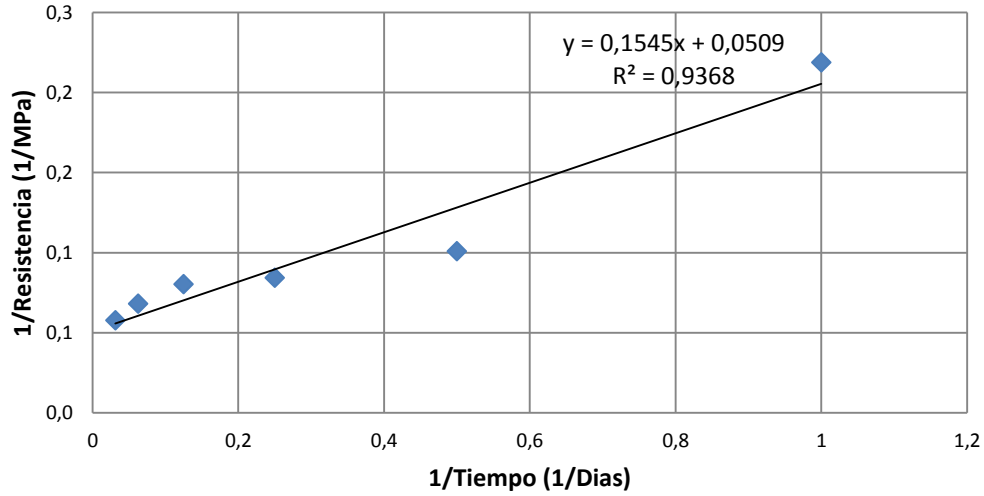


Figura 4.21 Primer Método – T= 23° C Placa

<b>T (°C)</b>	23
<b>T (K)</b>	296
<b>Pendiente</b>	0.155
<b>Intercepto</b>	0.05
<b>K</b>	0.324

Tabla 4.26 Determinación de la constante de velocidad  $k$  primer método – T=23°C Placa

✓ Primer Método – Muro

Se presentan los resultados del primer método. Para lo anterior se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.3.4. En la Figura 4.22 y Figura 4.23 se muestran las gráficas del inverso de la resistencia vs el inverso del tiempo. Adicionalmente en la Tabla 4.27 y Tabla 4.28 se muestran los resultados de la constante de velocidad  $k$  para muro por el primer método.

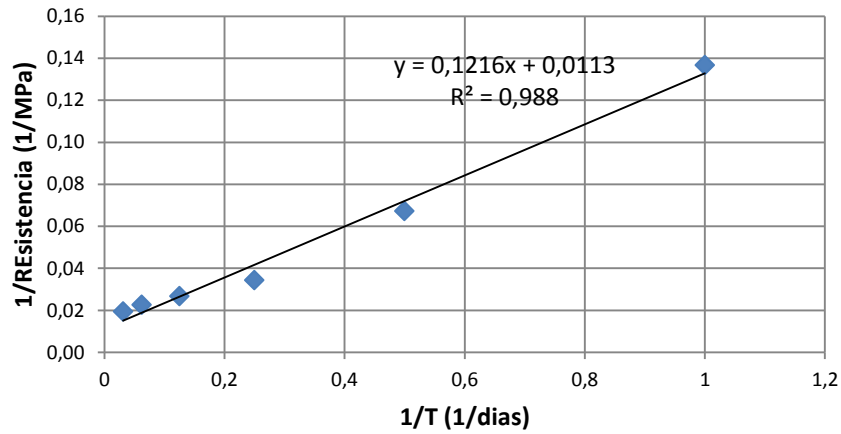


Figura 4.22 Primer método – T= 6° C Muro

<b>T (°C)</b>	6
<b>T (K)</b>	279
<b>Pendiente</b>	0.122
<b>Intercepto</b>	0.02
<b>K</b>	0.164

Tabla 4.27 Determinación de la constante de velocidad  $k$  primer método – T=6°C Muro

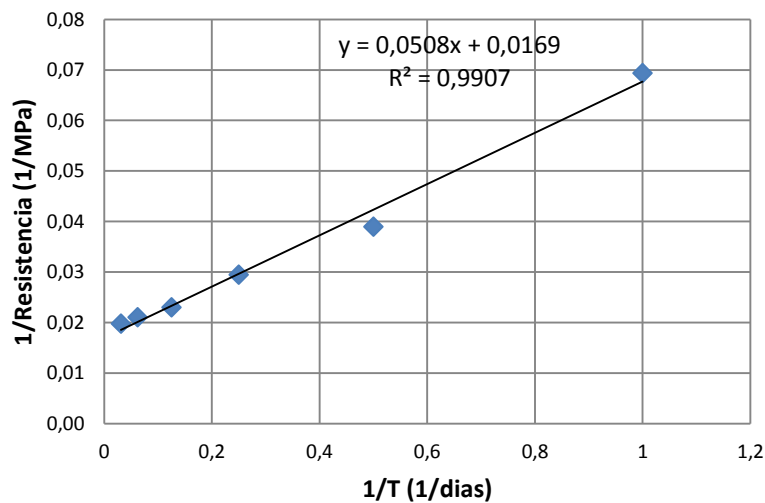


Figura 4.23 Primer Método – T= 23° C Muro



<b>T (°C)</b>	23
<b>T (K)</b>	296
<b>Pendiente</b>	0.051
<b>Intercepto</b>	0.02
<b>K</b>	0.394

Tabla 4.28 Determinación de la constante de velocidad  $k$  primer método – T=23°C Muro

En el primer método se consideran los inversos de la resistencia a la compresión y de la edad de falla. Por lo tanto, la primera edad de falla condicionada por el tiempo de fraguado, es el último punto de la gráfica, que resulta ser el más influyente en el comportamiento de la línea de ajuste de la serie de datos. Es de suma importancia determinar con precisión la pendiente y el intercepto, ya que el valor de la constante de velocidad  $k$  es muy sensible a cualquier cambio de estos parámetros.

✓ Segundo Método – Placa

Se presentan los resultados del segundo método, estos se obtuvieron mediante el uso del complemento de Microsoft Excel – Solver. Para lo anterior se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.3.4. En la Tabla 4.29, Tabla 4.30 y Tabla 4.31 se muestran los resultados de la constante de velocidad  $k$  para placa por el segundo método.

		<b>Temperatura 6°C</b>				
		<b>Edad</b>	<b>Resistencia</b>	<b>S</b>	<b>Error</b>	<b>Error^2</b>
		32	17.60	18.58	-0.98	0.97
<b>Resultados</b>		16	16.30	16.30	0.00	0.00
<b>k</b>	0.21	8	12.88	12.88	0.00	0.00
<b>to</b>	0.79	4	6.64	8.60	-1.96	3.84
<b>Su</b>	21.44	2	4.32	4.32	0.00	0.00
		SUMA				5.40

Tabla 4.29 Resultados constante de velocidad  $k$  segundo método – T=6°C Placa

		<b>Temperatura 13°C</b>				
		<b>Edad</b>	<b>Resistencia</b>	<b>S</b>	<b>Error</b>	<b>Error^2</b>
		32	15.83	15.83	0.00	0.00
<b>Resultados</b>		16	14.74	14.18	0.56	0.31
<b>k</b>	0.24	8	13.73	11.69	2.04	4.16
<b>to</b>	0.22	4	8.55	8.55	0.00	0.00
<b>Su</b>	17.88	2	6.75	5.39	1.36	1.85
		1	2.84	2.84	0.00	0.00
		SUMA				6.76

Tabla 4.30 Resultados constante de velocidad  $k$  segundo método – T=13°C Placa

		Temperatura 23°C				
		Edad	Resistencia	S	Error	Error^2
		32	17.31	15.30	-2.01	4.02
<b>Resultados</b>		16	14.70	14.22	-0.47	0.22
<b>k</b>	0.38	8	12.47	12.47	0.00	0.00
<b>to</b>	0.00	4	11.87	10.00	-1.87	3.50
<b>Su</b>	16.55	2	9.91	7.17	-2.75	7.54
		1	4.57	4.57	0.00	0.00
					SUMA	15.28

Tabla 4.31 Resultados constante de velocidad  $k$  segundo método – T=23°C Placa

✓ Segundo Método – Muro

Se presentan los resultados del segundo método, estos se obtuvieron mediante el uso del complemento de Microsoft Excel – Solver. Para lo anterior se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.3.4. En la Tabla 4.32 y Tabla 4.33 se muestran los resultados de la constante de velocidad  $k$  para muro por el segundo método.

		Temperatura 6°C				
		Edad	Resistencia	S	Error	Error^2
		32	51.44	50.54	0.90	0.81
<b>Resultados</b>		16	44.31	44.31	0.00	0.00
<b>k</b>	0.20	8	37.48	35.36	2.11	4.46
<b>to</b>	0.28	4	29.11	24.80	4.32	18.63
<b>Su</b>	58.64	2	14.85	14.85	0.00	0.00
		1	7.32	7.32	0.00	0.00
					SUMA	14.43

Tabla 4.32 Resultados constante de velocidad  $k$  segundo método – T=6°C Muro

		Temperatura 23°C				
		Edad	Resistencia	S	Error	Error^2
		32	50.62	50.62	0.00	0.00
<b>Resultados</b>		16	47.56	47.41	-0.15	0.02
<b>k</b>	0.44	8	43.50	42.00	-1.50	2.25
<b>to</b>	0.17	4	33.97	33.97	0.00	0.00
<b>Su</b>	54.25	2	25.67	24.11	-1.56	2.44
		1	14.41	14.41	0.00	0.00
					SUMA	3.00

Tabla 4.33 Resultados constante de velocidad  $k$  segundo método – T=23°C Muro

En el segundo método se presenta una incertidumbre en cuanto al programa computacional que se tenga para la determinación de las variables  $k$ ,  $t_0$  y  $S_u$ . El error está condicionado por el número de iteraciones que se hagan y la precisión del programa.

✓ Tercer Método – Placa

Se presentan los resultados del tercer método. Para lo anterior se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.3.4. En la Figura 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.26 se muestran las gráficas de determinación de A, para el tercer método.

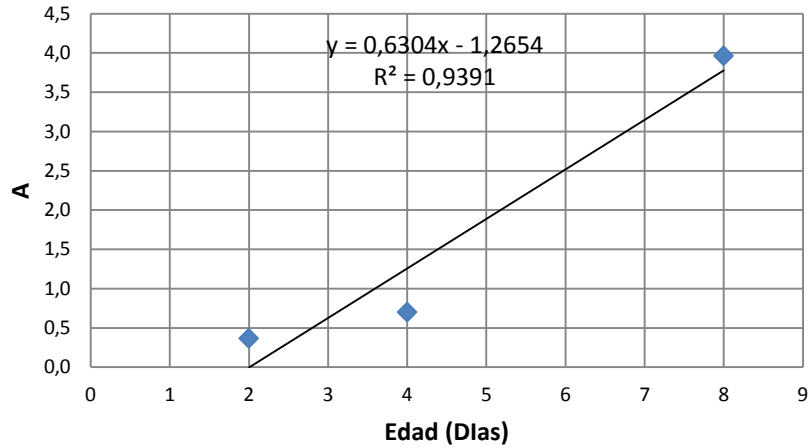


Figura 4.24 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer método T= 6° C- Placa

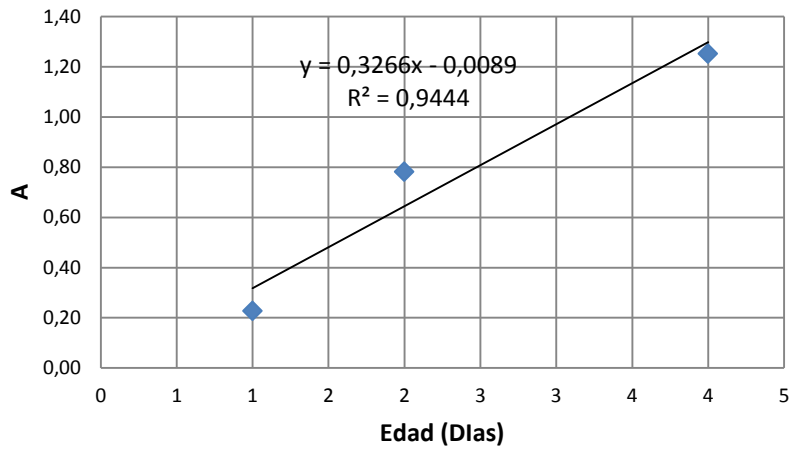


Figura 4.25 Determinación de la Constante de Velocidad k, Tercer método T= 13° c- Placa

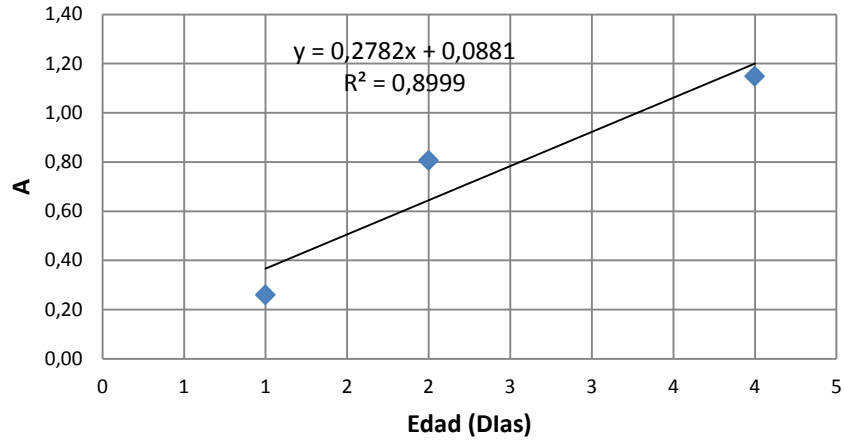


Figura 4.26 Determinación de la Constante de Velocidad  $k$ , Tercer método  $t= 23^{\circ}\text{C}$ - Placa

En la Tabla 4.34 se muestran los resultados de la contante de velocidad  $k$  para cada una de las temperaturas, determinadas por el tercer método.

T (K)	K
23	0.28
13	0.33
6	0.63

Tabla 4.34 Resultados constante de velocidad  $k$  Tercer método Placa

✓ Tercer Método – Muro

Se presentan los resultados del tercer método. Para lo anterior se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.3.4. En la Figura 4.27 y Figura 4.28 se muestran las gráficas de determinación de  $A$ , para el tercer método.

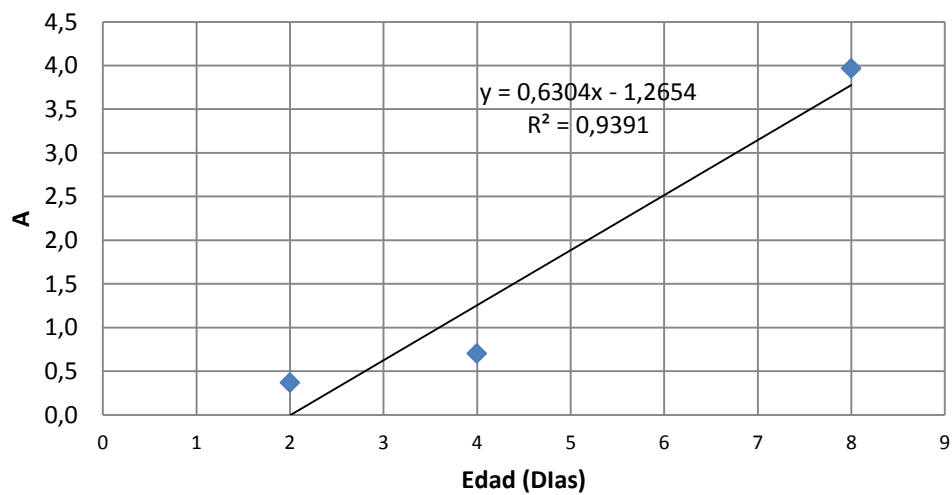


Figura 4.27 Determinación de la Constante de Velocidad  $k$ , Tercer Método  $T= 6^{\circ}\text{C}$ - Muro

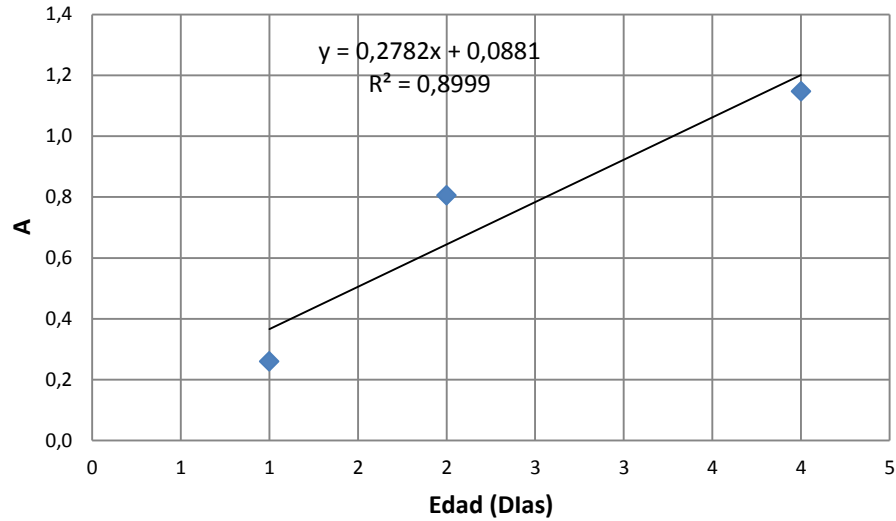


Figura 4.28 Determinación de la Constante de Velocidad  $k$ , Tercer Método  $T= 23^{\circ} \text{C}$ - Muro

En la Tabla 4.37 se muestran los resultados de la contante de velocidad  $k$  para cada una de las temperaturas, determinadas por el tercer método

T (K)	K
23	0.28
6	0.55

Tabla 4.35 Resultados constante de velocidad  $k$  Tercer método Muro

Para el tercer método se tiene una gran incertidumbre, debido a que el valor de  $S_u$  es determinado de forma manual como la intersección con el eje “y”, de la gráfica de los inversos de resistencia y edad. Adicionalmente, este  $S_u$  es usado para determinar A, que a su vez es la variable que junto con la edad determinan la constante  $k$ . De lo anterior, podemos inferir que lo procedimientos de cálculo son subjetivos y reducen la fiabilidad del método.

#### 4.3.4 Determinación de la Energía de Activación

A continuación se muestran las gráficas para la determinación del valor Q, esto se hace para cada uno de los métodos para la determinación la constante de velocidad  $k$ .

- ✓ Determinación de Energía de Activación para Placa

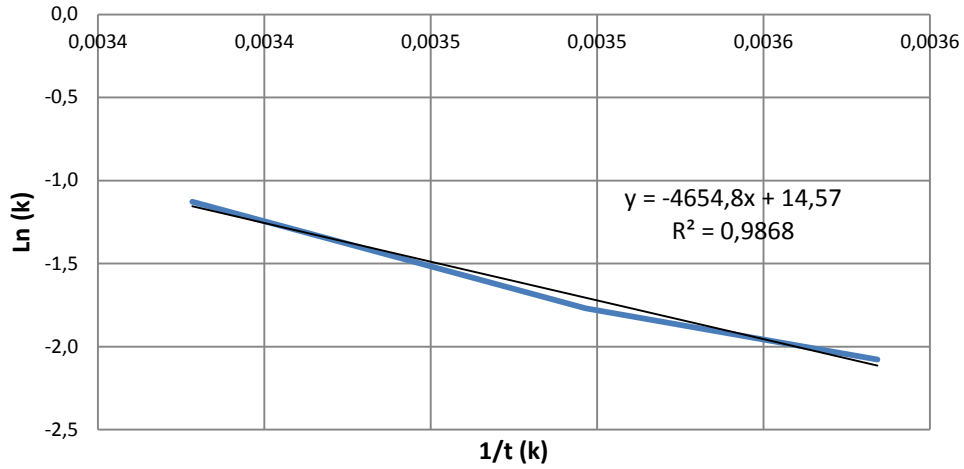


Figura 4.29 Determinación de Q para el primer método -Placa

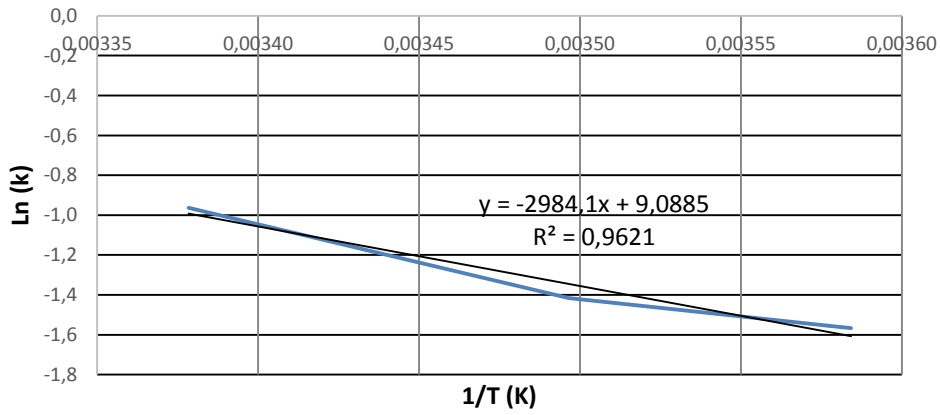


Figura 4.30 Determinación de Q para el segundo método – placa

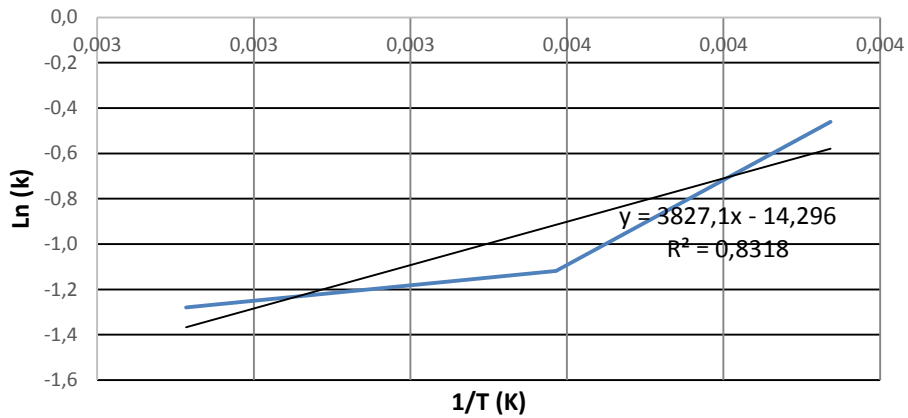


Figura 4.31 Determinación de Q para el tercer método – Placa

En la Tabla 4.36 se muestran los resultados de energía de activación para placa por cada uno de los métodos.

	Q	E (J/mol)
<b>Método 1</b>	4654.8	38701.9
<b>Método 2</b>	2984.1	24811.0
<b>Método 3</b>	3827.1	31820.0

Tabla 4.36 Energía de Activación Placa

✓ Determinación de Energía de Activación para Muro

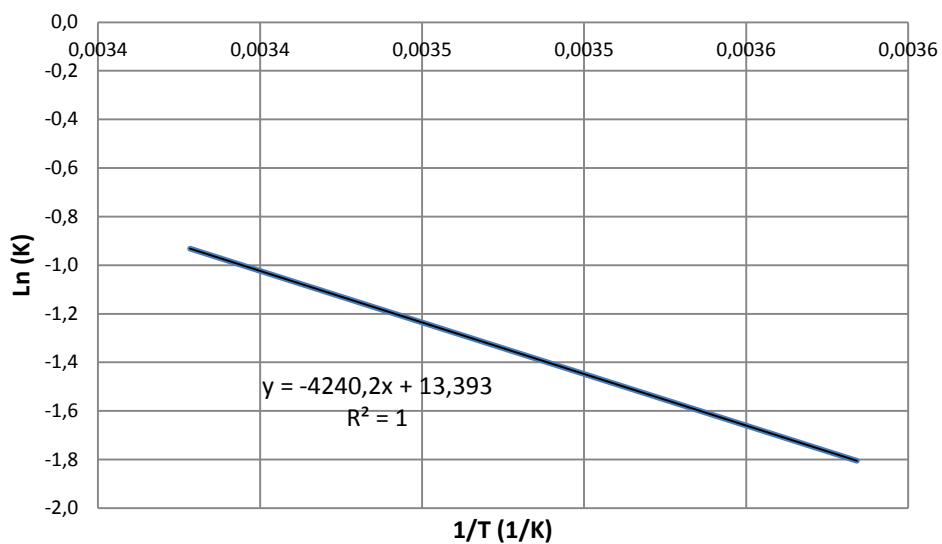


Figura 4.32 Determinación de Q para el primer método – Muro

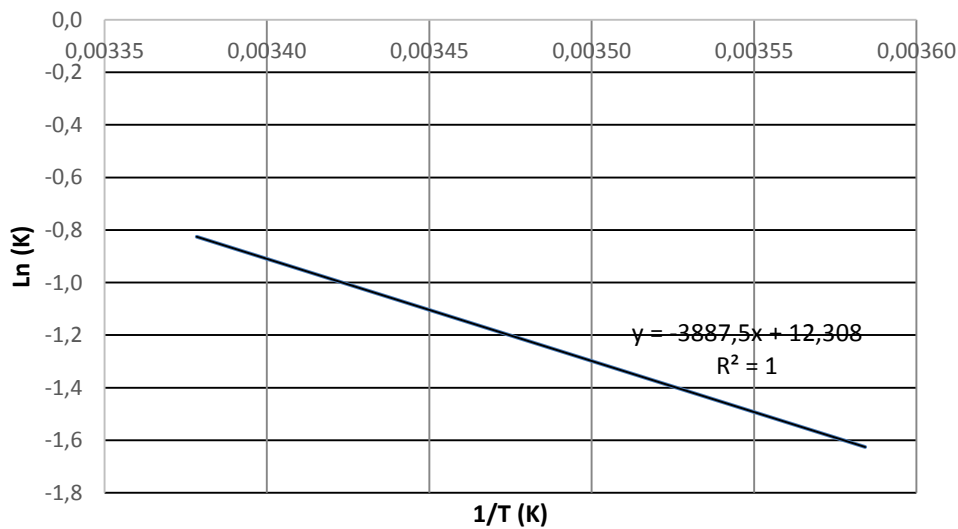


Figura 4.33 Determinación de Q para el segundo método – Muro

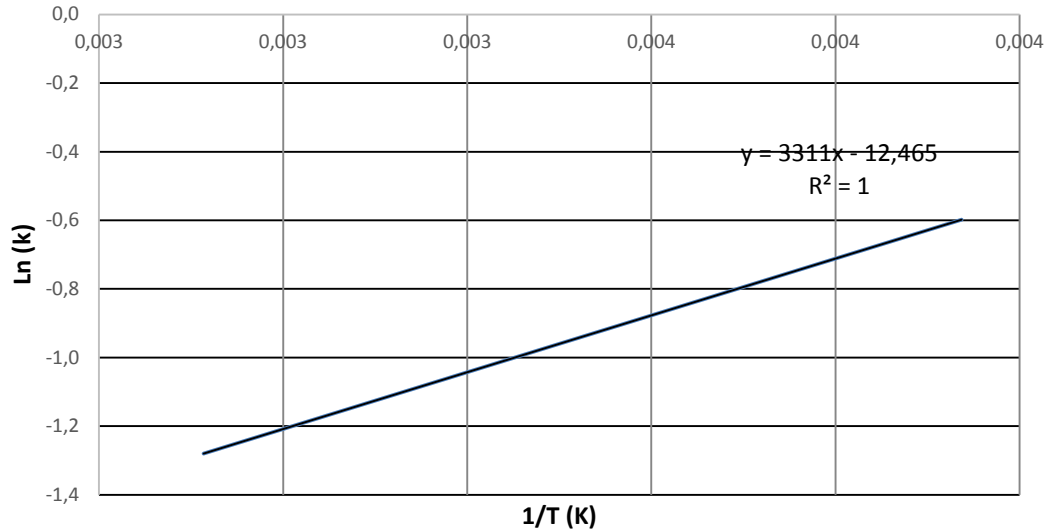


Figura 4.34 Determinación de Q para el tercer método – Muro

En la Tabla 4.39 se muestran los resultados de energía de activación para muro por cada uno de los métodos.

	Q	E (J/mol)
<b>Método 1</b>	4240.2	35254.7
<b>Método 2</b>	3887.5	32322.2
<b>Método 3</b>	3311	27529.0

Tabla 4.37 Energía de Activación Muro

En la Tabla 4.36 y Tabla 4.37 se muestran las energías de activación calculadas para cada método. Se puede observar que estas energías de activación están en un rango menor al propuesto por la norma ASTM C 1074 – 11, esto se debe a que este valor es planteado para mezclas que no contienen aditivos ni adiciones.

Por lo tanto, estas energías de activación bajas indican que el concreto tendrá una edad equivalente mayor en menor tiempo, comparada con una edad equivalente calculada con una energía de activación mayor. Adicionalmente, una energía de activación baja indica que la velocidad de hidratación se va a presentar en menor tiempo.

Se decide tomar los valores de energía de activación del método 1, como primera opción para determinar la edad equivalente y construir la curva de madurez. Esto se debe a que la correlación que tiene la línea de ajuste es la más alta de los tres métodos, además este es el único que tiene en cuenta los tiempos de fraguado, definiendo una edad inicial de falla.

### 4.3.5 Edad Equivalente

Se muestra la evolución de temperatura de los cilindros instrumentados bajo condiciones controladas, las cuales eran las mismas que los cilindros ensayados a compresión para cada mezcla.



En la Figura 4.35 se muestra el perfil térmico para muro y placa.

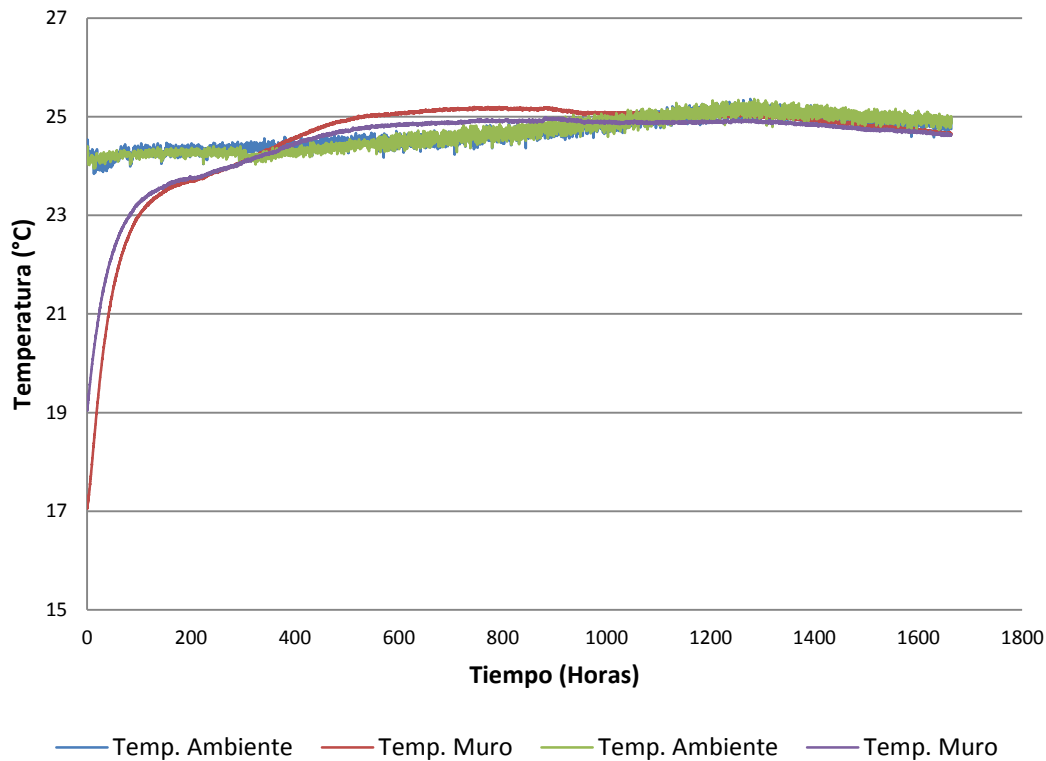


Figura 4.35 Perfil Térmico

Como se ve en la figura 4.35, la temperatura inicial de las mezclas estaba por debajo de la temperatura controlada de 23 °C., este comportamiento se debe a que el mezclado se hizo en condiciones no controladas de temperaturas de las materias primas. Las mezclas empiezan a desarrollar temperatura a medida que se lleva a cabo el proceso de hidratación, superando la temperatura de curado. Al cabo de aproximadamente 12 horas las temperaturas de los especímenes se estabilizan con la temperatura ambiente, en este caso 23 °C.

Para determinar la edad equivalente según la ecuación 2.3, se usa la energía de activación seleccionada en el numeral 4.3.4 y la temperatura de referencia de 23 °C. Esta edad equivalente se calcula para cada intervalo de temperatura.

#### 4.3.6 Relación del Índice de Madurez y Resistencia – Curva de Madurez

Con las resistencias a la compresión que se muestran en el numeral 4.2.3 y la edad equivalente determinada en el numeral 4.3.5 se construyeron las curvas de madurez para los dos tipos de concreto en estudio. Siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 2.3.5. Las curvas de madurez se muestran a continuación:

Edad (días)	Edad (horas)	Resistencia MPa	Madurez Edad Te	Madurez Edad LogTE
28	672	29.9	707.99	2.85003
14	336	26.1	354.72	2.54988
7	168	23.0	178.09	2.25063
3	72	18.7	77.15	1.88734
1	24	11.5	26.07	1.41612
0	0	0.0	0	0.00000

Tabla 4.38 Relación del Índice de Madurez y Resistencia – Curva de Madurez Placa

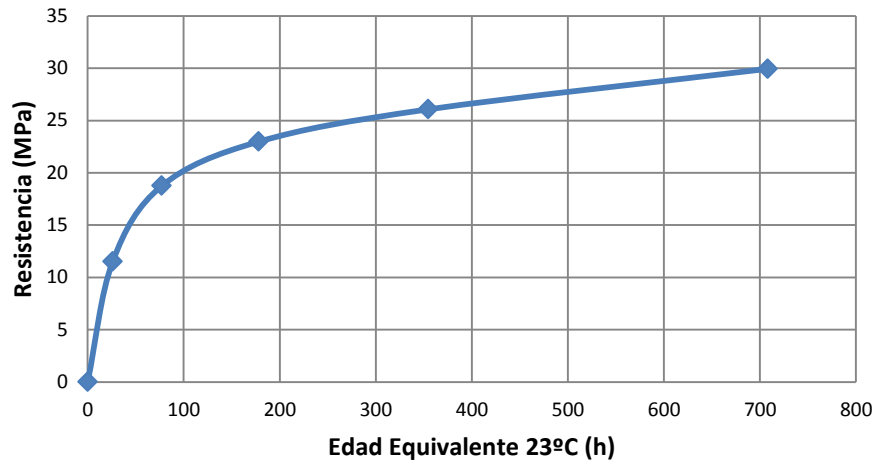


Figura 4.36 Curva de madurez Placa

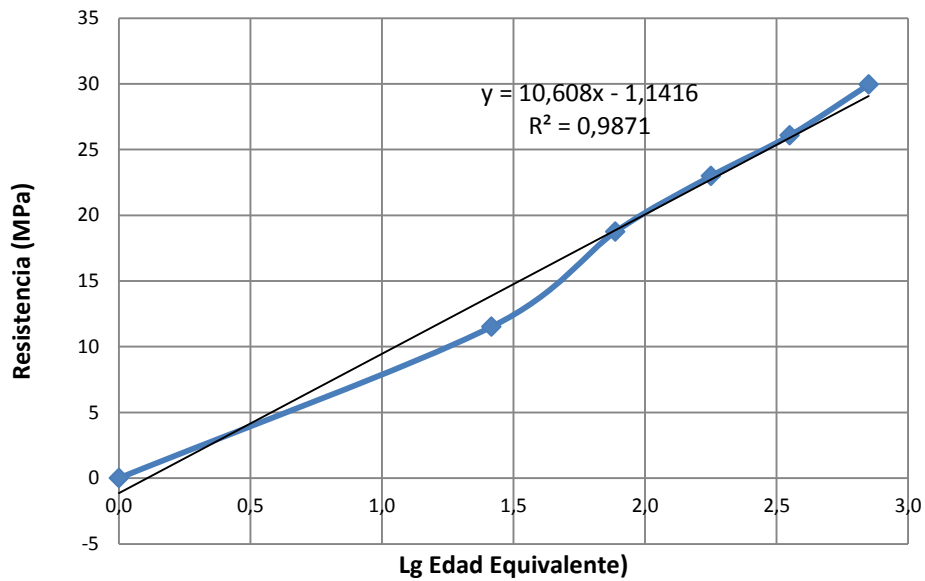


Figura 4.37 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el Log10 de la edad equivalente Placa

Edad (día)	Edad (horas)	Resistencia MPa	Madurez Edad Te	Madurez Edad LogTE
28	672	38.8	695.16	2.84
14	336	33.7	348.66	2.54
7	168	29.1	175.40	2.24
3	72	23.2	76.40	1.88
1	24	15.3	25.87	1.41
0	0	0.0	0	0.00

Tabla 4.39 Relación del Índice de Madurez y Resistencia – Curva de Madurez Muro

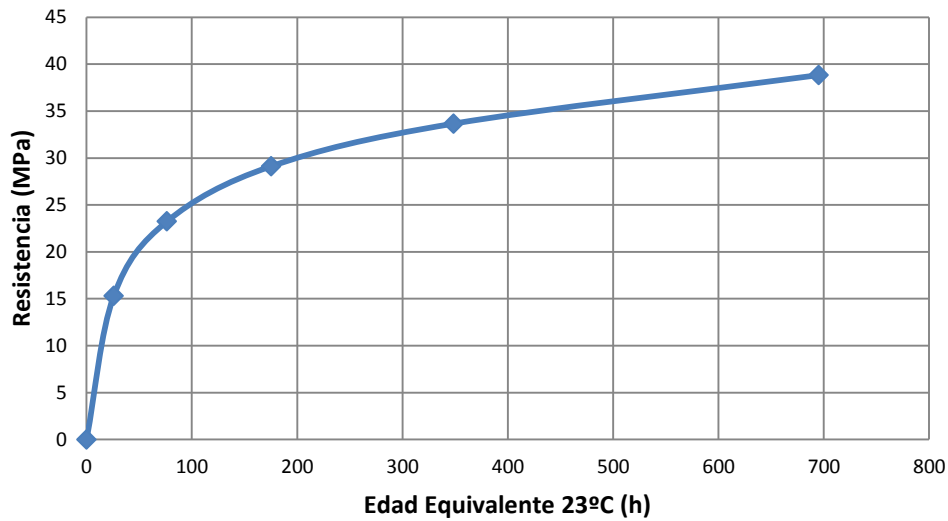


Figura 4.38 Curva de madurez muro

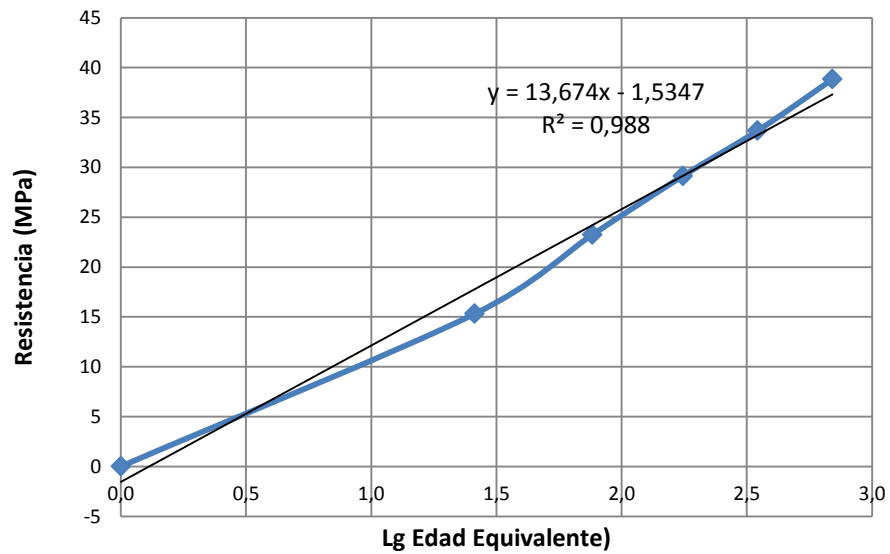


Figura 4.39 Relación entre la Resistencia a la Compresión y el log10 de la Edad Equivalente - Muro

La relación que se obtuvo entre el índice de madurez y la resistencia se puede expresar por medio de las siguientes ecuaciones:

✓ Muro

$$f_c = 13.674 * LOG(T_e) - 1.1472 \quad (4.3)$$

Donde

$f_c$ : Resistencia a compresión (MPa)

$T_e$ : Edad equivalente (horas)

✓ Placa

$$f_c = 10.608 * LOG(T_e) - 1.1416 \quad (4.4)$$

Donde

$f_c$ : Resistencia a compresión (MPa)

$T_e$ : Edad equivalente (horas)

#### 4.3.7 Calibración de Curva de Madurez con los Cilindros en Obra

Con el fin de calibrar el modelo desarrollado en el laboratorio, se tomaron cilindros en obra como se describe en el numeral 3.6.1. A continuación en la Figura 4.40 se muestran los perfiles térmicos desarrollados por los cilindros de las mezclas de concreto de placa y muro.

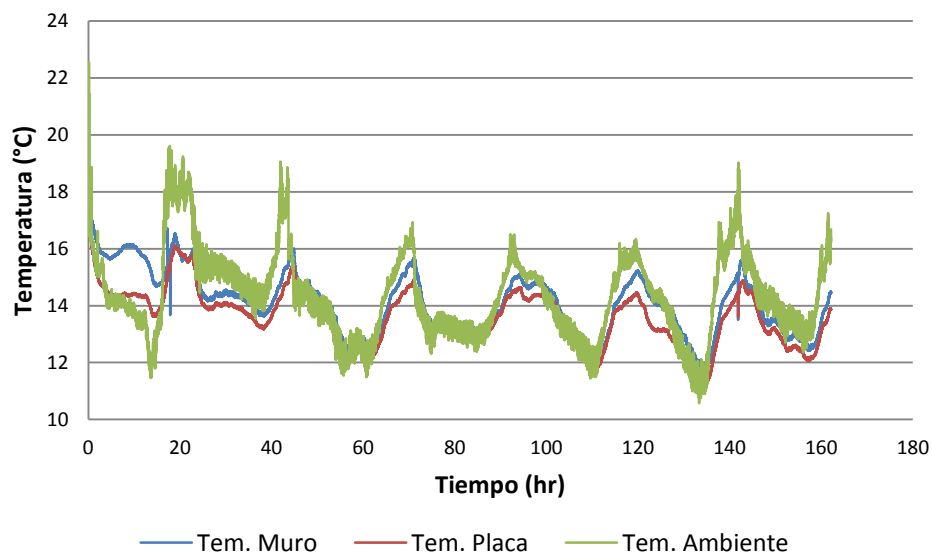


Figura 4.40 Perfiles Térmicos Cilindros en Obra

Con los cilindros tomados en obra se realizan ensayos de resistencia a la compresión, las edades de falla de estos cilindros fueron 1, 2 y 7 días. Los resultados de los ensayos de compresión se muestran en la Tabla 4.40 y Tabla 4.41.

Edad (días)	Resistencia Mpa
7	19,6
2	14,7
1	10,6

Tabla 4.40 Resistencia a la Compresión Cilindros de Obra - Placa

Edad (días)	Resistencia Mpa
7	26,6
2	20,5
1	14,8

Tabla 4.41 Resistencia a la Compresión Cilindros de Obra - Muro

Con los perfiles térmicos se calcula la edad equivalente para cada una de las edades de falla. Esto se hace con cada una de las energías de activación con el fin de ajustar la curva de madurez. Los resultados para la mezcla de placa se muestran en la Tabla 4.42 donde se observan los valores de edad equivalente para cada edad de falla. En la Tabla 4.43, Tabla 4.44 y Tabla 4.45 se determina la resistencia a compresión con cada una de las energías de activación determinadas en el numeral 4.3.4.

Edad (día)	Edad (horas)	Madurez Edad Te	Madurez Edad LogTE
7	168	96,96	1,99
2	48	30,06	1,48
1	24	15,36	1,19

Tabla 4.42 Valores de Edad Equivalente Cilindros en Obra – Placa

Método 1			Q	4654,8
Edad (día)	Resistencia Cilindros (Mpa)	Te Cilindros (hr)	Resistencia 23°C	Error
7	19,64	96,96	19,93	1,51%
2	14,73	30,06	14,54	1,30%
1	10,56	15,36	11,44	8,38%

Tabla 4.43 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Placa – Primer Método

Método 2			Q	2984,1
Edad (día)	Resistencia Cilindros(Mpa)	Te Cilindros (hr)	Resistencia 23°C	Error
7	19,64	116,57	20,88	6,31%
2	14,73	35,55	15,39	4,48%
1	10,56	18,02	12,25	16,02%

Tabla 4.44 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Placa – Segundo Método

<b>Método 3</b>			<b>Q</b>	<b>3827,1</b>
<b>Edad (día)</b>	<b>Resistencia Cilindros(Mpa)</b>	<b>Te Cilindros (hr)</b>	<b>Resistencia 23°C</b>	<b>Error</b>
7	19,64	106,22	20,40	3,88%
2	14,73	32,67	14,96	1,56%
1	10,56	16,62	11,84	12,15%

Tabla 4.45 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Placa – Tercer Método

Los resultados para la mezcla de muro se muestran en la Tabla 4.46 donde se observan los valores de edad equivalente para cada edad de falla. En la Tabla 4.47, Tabla 4.48 y Tabla 4.49 se determina la resistencia a compresión con cada una de las energías de activación determinadas en el numeral 4.3.4.

<b>Edad (día)</b>	<b>Edad (horas)</b>	<b>Madurez Edad Te</b>	<b>Madurez Edad LogTE</b>
7	168	114,68	2,06
2	48	35,35	1,55
1	24	18,14	1,26

Tabla 4.46 Valores de Edad Equivalente Cilindros en Obra – Muro

<b>Método 1</b>			<b>Q</b>	<b>4654,8</b>
<b>Edad (día)</b>	<b>Resistencia Cilindros(Mpa)</b>	<b>Te Cilindros (hr)</b>	<b>Resistencia 23°C</b>	<b>Error</b>
7	26,6	103,51	26,02	2,1%
2	20,5	32,29	19,10	6,6%
1	14,8	16,70	15,19	2,5%

Tabla 4.47 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Muro – Primer Método

<b>Método 2</b>			<b>Q</b>	<b>3887,5</b>
<b>Edad (día)</b>	<b>Resistencia Cilindros(Mpa)</b>	<b>Te Cilindros (hr)</b>	<b>Resistencia 23°C</b>	<b>Error</b>
7	26,6	108,00	26,30	1,0%
2	20,5	33,52	19,34	5,5%
1	14,8	17,28	15,41	4,0%

Tabla 4.48 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Muro – Segundo Método

<b>Método 3</b>			<b>Q</b>	<b>3311</b>
<b>Edad (día)</b>	<b>Resistencia Cilindros(Mpa)</b>	<b>Te Cilindros (hr)</b>	<b>Resistencia 23°C</b>	<b>Error</b>
7	26,6	108,00	26,33	0,9%
2	20,5	33,52	19,38	5,3%
1	14,8	17,28	15,44	4,2%

Tabla 4.49 Valores de Resistencia Calculados con la Energía de Activación Muro – Tercer Método

Se escoge la energía de activación determinada por la constante de velocidad del primer método, debido a que este es el que arroja un error menor en cuanto a la resistencias a edades tempranas, las cuales son las más determinantes en los sistemas industrializados.

## CAPITULO 5. APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO

### 5.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo determinar en qué momento se debería retirar la formaleta de una placa de 10 cm de espesor de concreto en obra, garantizando que esta sea capaz de soportar las cargas de construcción.

En la primera parte se determinará teóricamente la resistencia del concreto necesaria para el retiro de la formaleta, esto se hará basado en el método propuesto por Calavera descrito en la sección 2.4.1.

En la segunda parte se determinará la edad equivalente en el tiempo de la placa, con base en las temperaturas medidas directamente sobre el elemento.

Por último, conociendo la edad equivalente correspondiente al tiempo de fraguado final de nuestro concreto a una temperatura controlada, se verificará cual es el tiempo de fraguado en obra. Adicionalmente, usando la ecuación 4.1 se determinará la edad equivalente a la cual se puede garantizar que el concreto tiene la resistencia para soportar la carga de construcción.

### 5.2 Determinación de la Resistencia de Descimbrado

Según el método propuesto por Calavera que se explica en la sección 2.4.1 se comparó si la evolución de la placa presenta la misma evolución que se muestra Calvera, 2002 en la Tabla 2.1. Los resultados del concreto en estudio se muestran a continuación.

Cuadro Resumen				
Edad	Resistencia Compresión % Evolución	Resistencia Tracción Indirecta % Evolución	Resistencia Flexo Tracción % Evolución	Módulo de Elasticidad % Evolución
28	100	100	100	100
14	87	87	94	84
7	77	75	89	78
3	63	64	80	70
1	38	51	56	58

Tabla 5.1 Relación de Resistencias en Función de la Resistencia a Compresión del Concreto

En la Tabla 5.1 se observa que aparte de la evolución de resistencia a compresión, la evolución de resistencia más crítica es resistencia a tracción indirecta. Por lo cual este método es aplicable a este caso.

En el numeral 2.4.1 se demostró la siguiente ecuación:

$$f_{ct,j} \geq \beta * f_{ct,28} \quad (5.1)$$



Donde

$f_{ct,j}$ : Resistencia a tracción en un tiempo j (MPa)

$f_{ct,28}$ : Resistencia a tracción de diseño (MPa)

Siendo  $\beta$ ,

$$\beta = \frac{Dc * FS'_1 + Lc * FS'_2}{D * FS_1 + L * FS_2} \quad (5.2)$$

### 5.2.1 Cálculo del coeficiente $\beta$

A continuación se presentan las cargas calculadas para el caso de estudio. Estas se evaluaron para la etapa de construcción y de diseño.

Tipo de Carga		Carga (kN/m <sup>2</sup> )
<b>Muertas</b>	Encofrado	0,18
	Concreto	2,40
	<b>Total</b>	<b>2,54</b>
<b>Vivas</b>	Trabajadores	0,88
	Equipos	0,30
	Materiales	0,10
	<b>Total</b>	<b>1,28</b>

Tabla 5.2 Evaluación de Cargas de Construcción

Cargas de diseño:

Tipo de Carga		Carga (kN/m <sup>2</sup> )
<b>Muertas</b>	Peso propio	2,40
	Baldosa Cerámica	0,80
	Pañete de Yeso	0,25
	<b>Total</b>	<b>3,45</b>
<b>Vivas</b>	Uso Residencial	1,80
	<b>Total</b>	<b>1,80</b>

Tabla 5.3 Evaluación de Cargas de Diseño (Titulo B NSR – 10)

Debe tenerse en cuenta que según la norma ACI 347 – 04 deben respetarse las siguientes condiciones:

- ✓ La carga viva de construcción  $L_c$  debe ser mayor o igual a 2,4 kN/m<sup>2</sup>, cuando no se usan equipos motorizados
- ✓ La carga viva de construcción  $L_c$  debe ser mayor o igual a 3,6 kN/m<sup>2</sup>, cuando no se usan equipos motorizados

- ✓ La carga total de construcción considerando los factores de mayoración debe ser mayor o igual a  $4,8 \text{ kN/m}^2$ , cuando no se usan equipos motorizados
- ✓ La carga total de construcción considerando los factores de mayoración debe ser mayor o igual a  $6,0 \text{ kN/m}^2$ , cuando se usan equipos motorizados

Factores de mayoración:

<b>Factores de Mayoración</b>	
Carga Muerta	1
Carga Viva	1

Tabla 5.4 Factores de Mayoración para Cargas de Construcción

Se toman estos factores de mayoración como 1, pues en la NSR – 10 y en la ACI 347-04 no se han considerado factores de mayoración para cargas de construcción.

<b>Factores de Mayoración</b>	
Carga Muerta	1.6
Carga Viva	1.2

Tabla 5.5 Factores de Mayoración para Cargas de Diseño

Se adoptan estos valores debido a que la NSR – 10 en la sección B.2.4.2 se especifican las combinaciones de carga que deben ser utilizadas.

Aplicando la ecuación 5.2.

$$\beta = 0.643$$

Se reemplaza en la ecuación 5.1

$$f_{ct,j} \geq 0.643 * f_{ct,28} \tag{5.3}$$

### 5.2.2 Relación entre la Resistencia a Tracción y la Resistencia a Compresión

Se desea encontrar una relación entre la resistencia a tracción y la resistencia a compresión, para el tipo de concreto en estudio, esto se hace debido a que la resistencia que se toma usualmente en obra es la resistencia a compresión. Esta relación se determina a partir de los datos obtenidos en el laboratorio. Según Calavera (2002) la relación entre las resistencias a tracción y compresión tiene una tendencia representada por la siguiente ecuación potencial:

$$f_{ct} = a * f_c^b \tag{5.4}$$

Donde a y b son constantes.

Esta relación, para el concreto objeto de este estudio, se determinó por medio del complemento de Microsoft Excel – Solver. La condición de entrada es minimizar el error.

fc (MPa)	fct (MPa)	fct (MPa)	Error	Error ^2
29.9	2.6	2.61	0.00	0.00
26.1	2.3	2.37	0.11	0.01
23.0	2.0	2.17	0.21	0.05
18.7	1.7	1.88	0.22	0.05
11.5	1.3	1.34	0.00	0.00
			Suma	0.10
<b>a</b>	0.243			
<b>b</b>	0.698			

Tabla 5.6 Determinación de Coeficientes de Correlación

La ecuación resultante es:

$$f_{ct} = 0.243 * f_c^{0.67} \quad (5.5)$$

Dicha expresión resulta muy similar a la establecida en la Instrucción de hormigón estructural (EHE-2008) (Ecuación 5.6) para estimar la resistencia a tracción directa a partir de la resistencia a compresión:

$$f_{ct} = 0.30 * f_c^{0.67} \quad (5.6)$$

### 5.2.3 Ecuación en Términos de Resistencia a Compresión para Determinar la Resistencia de Descimbrado

Se determinó en el numeral 5.2.1 la expresión para determinar la resistencia de descimbrado en términos de resistencia a la tracción, en la ecuación 5.3. Por otra parte, se estableció la relación entre la resistencia a tracción y la resistencia a compresión, en la ecuación 5.5.

Relacionando estas dos ecuaciones, se puede obtener la ecuación en términos de resistencia a compresión para determinar la resistencia de descimbrado.

$$f'_{c,j} \geq 0.5173 * f_{c,28}^{0.9995} \quad (5.7)$$

Donde

$f'_{c,j}$ : Resistencia a compresión en un tiempo j (MPa)

$f_{c,28}$ : Resistencia a compresión de diseño (MPa)

Por lo tanto la resistencia de descimbrado en este caso de estudio es:

$$f_{c,j} = 10.848 \text{ MPa}$$

### 5.3 Determinación de la Edad Equivalente del Elemento

Para determinar la edad equivalente del elemento en el tiempo se sigue el procedimiento descrito en el numeral 2.3.4, usando como parámetros la energía de activación escogida.

Al ser este el primer caso de estudio, al realizar las mediciones de temperatura se quería comparar que la evolución de la edad equivalente no variaba drásticamente en diferentes puntos del elemento, por esta razón se instrumentó la placa en siete puntos con diferente ubicación y profundidad. Se instrumentó la placa con dos equipos diferentes, los puntos instrumentados fueron:

- ✓ Borde de la placa, h= 5 cm – Canal 1, madurímetro
- ✓ Centro de la placa, h= 8 cm – Canal 2, madurímetro
- ✓ Centro de la placa, h= 2 cm – Canal 3, madurímetro
- ✓ Centro de la placa, h= 5 cm – Canal 4, madurímetro
- ✓ Centro de la placa, h= 5 cm – Canal 6, datalogger
- ✓ Centro de la placa, h= 5 cm – Canal 7, datalogger
- ✓ Temperatura ambiente – Canal 8, datalogger

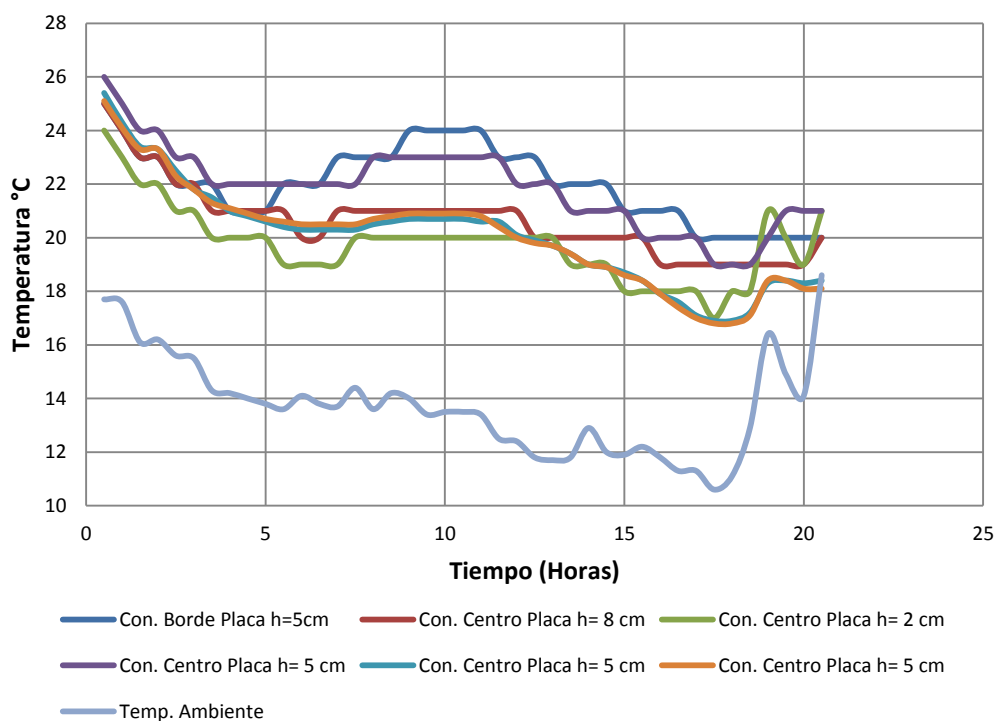


Figura 5.1 Perfil Térmico de los Puntos Instrumentados

Se observa que al medir en el centro de la placa a una profundidad de 5 cm, con los dos equipos de adquisición de datos, la diferencia entre las temperaturas tomadas no es significativa. Por lo anterior, se utilizaron los datos registrados por el madurímetro.

### 5.3.1 Edad equivalente en los Puntos Instrumentados del Elemento

Con el historial de temperaturas de cada punto instrumentado, se determinó para cada uno la evolución del índice de madurez en el tiempo (Véase en la Figura 5.2).

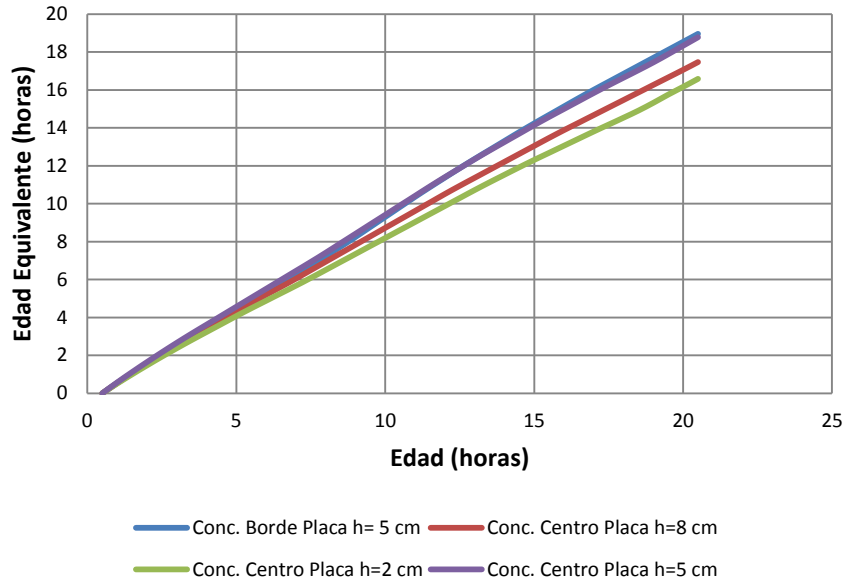


Figura 5.2 Comparación de Edades Equivalentes en los Puntos Instrumentados

De la Figura 5.2 se concluye que instrumentando en diferentes puntos del elemento y a diferentes profundidades, existe variación considerable entre las edades equivalentes. Los puntos instrumentados en la mitad de la profundidad presentan una evolución de edad equivalente, ligeramente más rápida que los puntos instrumentados a otras profundidades.

### 5.3.2 Determinación de Tiempos de Fraguado

Se determinaron los tiempos de fraguado para cada punto instrumentado en la placa. Se determinó la edad equivalente para los tiempos inicial y final obtenidos en laboratorio, esto se muestra en la Figura 5.3.

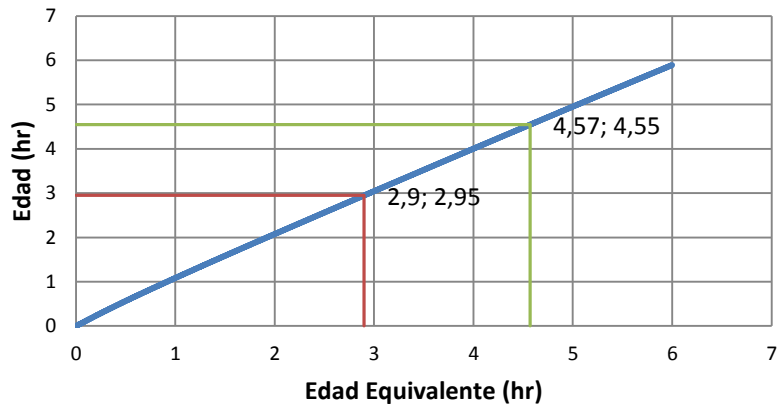


Figura 5.3 Determinación de Edad Equivalente para Tiempo de Fraguado Inicial y Final en Placa

Los resultados de edad equivalente para cada uno de estos métodos se muestran en la Tabla 5.7.

	<b>t (hr)</b>	<b>Te (hr)</b>
Tiempo fraguado Inicial	2,95	2,90
Tiempo fraguado Final	4,55	4,57

Tabla 5.7 Edad Equivalente para Tiempos de Fraguado Inicial y Final en Laboratorio

Con las edades equivalente para cada punto medido en la placa, se determina en que tiempo se presenta el índice de madurez  $T_e$  para el tiempo de fraguado inicial y final. Los resultados consolidados se muestran en la Tabla 5.8.

		<b>Tiempos de Fraguado en placa (horas)</b>			
	<b><math>T_e</math> (hr)</b>	<b>Borde Placa h=5cm</b>	<b>Centro Placa h=8cm</b>	<b>Centro Placa h=2cm</b>	<b>Centro Placa h=5cm</b>
<b>Inicial</b>	2,90	3,40	3,41	3,60	3,22
<b>Final</b>	4,57	5,26	5,28	5,60	5,00

Tabla 5.8 Tiempos de Fraguado Inicial y Final para Cada Punto del Elemento

En la Tabla 5.8 se observa que el punto más crítico en cuanto a tiempo de fraguado final es el centro de la placa a 2 cm de profundidad.

### 5.3.3 Estimación de Edad de Descimbrado

Se determinó la edad de descimbrado para cada punto medido sobre el elemento. Conociendo la ecuación de madurez obtenida en el laboratorio, que relaciona el logaritmo en base diez con la resistencia y calibrada con los cilindros en obra, se procedió a determinar la edad equivalente en la que el concreto llega a la resistencia de 10.848 MPa determinada con el método de Calavera.

$$f'_c = 10.608 * \text{Log}(T_e) - 1.1416 \quad (5.8)$$

$$10.848 = 10.608 * \text{Log}(T_e) - 1.1416 \quad (5.9)$$

$$T_e = 13.49 \text{ hr} \quad (5.10)$$

Teniendo la edad equivalente que debe tener el concreto para llegar a la resistencia de descimbrado, se calcula en cada punto de la placa la edad que esta debe tener en condiciones no controladas para tener la misma resistencia de descimbrado. Los resultados resumidos se muestran en la Tabla 5.9.

<b>Edad Descimbrado</b>	<b>Te (hr)</b>	<b>t (hr)</b>
<b>Borde Placa h=5cm</b>	13,49	14
<b>Centro Placa h=8cm</b>	13,49	15,5
<b>Centro Placa h=2cm</b>	13,49	16,5
<b>Centro Placa h=5cm</b>	13,49	14

Tabla 5.9 Edad de Descimbrado para Cada Punto de la Placa

En la Tabla 5.9 se observa que el punto más crítico en cuanto a descimbrado es el de profundidad de 2 cm. Tomar la decisión de instrumentar la placa en una profundidad de 5 cm o 2 cm representa un tiempo de dos horas y media en cuanto a la adquisición de la resistencia necesaria para descimbrar. Se recomienda instrumentar en el punto más crítico para tener un factor de seguridad.

Por último, se compara el valor de la edad de tiempo de fraguado final, con la edad de descimbrado calculada por el método de Calavera. Se observó que en todos los puntos de la placa, la edad de descimbrado es mayor a la del tiempo de fraguado final, en el caso más crítico la diferencia es de 11 horas.

Por lo anterior, se puede concluir que el tiempo de fraguado final no es un parámetro recomendable para descimbrar las placas, como lo recomiendan las productoras de concreto.

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE NUEVAS INVESTIGACIONES

### 7.1 Conclusiones

En el presente trabajo de grado se ha estudiado el método de la madurez para su aplicación en la estimación de tiempo de fraguado y tiempos de descimbrado en edificaciones construidas con concretos industrializados.

En el capítulo dos se realizó un estudio de los antecedentes y el estado del arte que motivaron al desarrollo del presente trabajo de grado. A partir de esto, se pudo establecer que:

- a. El método de la madurez ha sido usado con éxito en la última década para la determinación de la energía de activación in situ. Sin embargo son escasas las investigaciones que aplican dicho método a la determinación de resistencias en edades tempranas.

A partir de los resultados obtenidos para las dos mezclas de concreto, en cuanto a la evaluación de las propiedades mecánicas se concluyó lo siguiente:

- b. Con el fin de aplicar en método estudiado por Calavera, se midieron las propiedades mecánicas del concreto, entre estas el módulo de elasticidad. Este se comparó con el módulo de elasticidad calculado a partir de la norma NSR – 10, con lo cual se evidenció que para el caso de estudio que la norma sobrevalora los módulos de elasticidad para diseño de la estructura.
- c. Con la evaluación de las propiedades mecánicas del concreto en estudio, se comprobó la teoría de Calavera, en cuanto a que la evolución de resistencia más crítica sin tener en cuenta la resistencia a compresión, es la resistencia a tracción.

El estudio de la energía de activación y la curva de madurez para las dos mezclas de concreto, llevó a establecer lo siguiente:

- d. En la medición de tiempos de fraguado a diferentes temperaturas, se concluyó que en temperaturas bajas el tiempo de fraguado es mayor, debido a que la velocidad de hidratación depende de la temperatura.
- e. La evolución de la resistencia a compresión en cubos de mortero a diferentes temperaturas de curado, muestra que la resistencia a la compresión en temperaturas bajas y a edades tempranas es menor que en temperaturas altas. Mientras que en las edades finales la resistencia a la compresión en temperaturas bajas es mayor que en temperaturas de curado altas.
- f. En la determinación de la constante de velocidad  $k$  descrita por la ASTM C 1074 – 11, para el primer método se consideran los inversos de la resistencia a la compresión y de la edad de falla. Por lo tanto, la primera edad de falla condicionada por el tiempo de fraguado, es el último punto de la gráfica, que resulta ser el más influyente en el comportamiento de la línea de ajuste de la serie de datos. Es de suma importancia determinar con precisión la pendiente y el intercepto, ya que el valor de la constante de velocidad  $k$  es muy sensible a cualquier cambio de estos parámetros.
- g. De acuerdo con él estudió que se realizó de energía de activación, se concluyó que las energías de activación bajas indican que el concreto tendrá una edad equivalente mayor en menor tiempo, comparada con una edad equivalente calculada con una energía de



activación mayor. Adicionalmente, una energía de activación baja indica que la velocidad de hidratación se va a presentar en menor tiempo.

- h. Se evidenció que la energía de activación calculada por cada uno de los métodos, no representa un cambio significativo en el valor del índice de madurez. Sin embargo, el primer método presenta un error menor.
- i. La validación de la curva de madurez tanto para muro como para placa fue exitosa, con respecto al cálculo de la resistencia obtenida por el método de la madurez vs la resistencia determinada por medio de ensayos de resistencia a compresión de cilindros en obra.

En cuanto a la aplicación del método en la obra, se establecieron las siguientes conclusiones:

- j. Una vez aplicado el método en la obra, se comprobó que a pesar que la placa tiene un espesor relativamente pequeño (10 cm), se presenta un diferencial térmico importante cuando la temperatura es medida en diferentes profundidades de la placa.
- k. En el centro de la placa se presentan mayores temperaturas, lo cual representa una edad equivalente mayor. Por lo que, se puede inferir que el punto más crítico para la medición de la temperatura es en una profundidad de 2 cm, por lo cual se recomienda instrumentar a esta profundidad al ser la más crítica.
- l. La decisión de instrumentar a una profundidad de 5 cm o 2 cm, representa una diferencia de dos horas y media en cuanto a la edad de descimbrado. Lo cual es crítico en sistemas industrializados.
- m. Se comparó el valor de la edad de tiempo de fraguado final, con la edad de descimbrado calculada por el método de Calavera y se observó que en todos los puntos de la placa, la edad de descimbrado es mayor a la del tiempo de fraguado final, en el caso más crítico la diferencia es de 11 horas.
- n. Se puede concluir que el tiempo de fraguado final no es un parámetro recomendable para descimbrar las placas, como lo recomiendan las productoras de concreto. Por lo anterior, es importante verificar la edad a la que las placas alcanzan la resistencia para soportar las cargas de construcción.

## 7.2 Propuestas de Nuevas Investigaciones

Después del desarrollo del presente trabajo de grado, se evidencia la necesidad de realizar nuevas investigaciones relacionadas con el método de la madurez. Las posibles investigaciones futuras, relacionadas con el tema, podrían ser:

- a. En la presente investigación para la aplicación del método de Calavera, se midieron diferentes propiedades mecánicas del concreto, una de ellas fue la tracción indirecta. Una posible investigación futura, sería determinar cómo influye en el método la medición de tracción directa, y poder correlacionar la tracción indirecta con la directa.
- b. Para la determinación de la constante de velocidad  $k$  por el primer método propuesto por la ASTM C 1074 – 11 se tuvo en cuenta la resistencia a la compresión del mortero hasta una edad de 32 días. Una posible investigación futura sería determinar cómo influye en la energía de activación tomar datos únicamente a edades tempranas.
- c. Para determinar la energía de activación se realizaron pruebas de compresión sobre mortero equivalente como lo indica la ASTM C 1074 – 11, sería de gran interés conocer cómo afecta la energía de activación realizar las pruebas con mortero resultante de tamizar el concreto.

## REFERENCIAS

- *ACI Committee 347. "Guide for shoring/reshoring of concrete multistory buildings". 2005.*
- *Alvarado YA, Calderón PA, Pallarés FJ, Pellicer T. "Estimation of shore removal times in bi-directional in situ concrete floor slabs applying the maturity method", Bangkok. 2005.*
- *Alvarado YA, "Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas", Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2009.*
- *Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Payá IJ, Pellicer T, Pallares FJ, Moragues JJ. "An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings using partial striking", Engineering Structures, Vol. 31, 2009.*
- *ASTM C 39. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". 2012.*
- *ASTM C 78. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)". 2010.*
- *ASTM C 109. "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)". 2013.*
- *ASTM C 143. "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete". 2012.*
- *ASTM C 192. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". 2013.*
- *ASTM C 403. "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance". 2008.*
- *ASTM C 469. "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression". 2010.*
- *ASTM C 496. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens". 2011.*
- *ASTM C 1074. "Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method". 2011.*
- *ASTM D 2216. "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass." 2010.*
- *Calavera J, Fernández J. "Cuaderno N° 3: Criterios para el descimbrado de estructuras de hormigón", INTEMAC, Madrid. 1991.*

- Calavera J. “*Calculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación*”, INTEMAC, Madrid. 2002.
- Caro MA. “*Sistemas Constructivos de Edificaciones e Infraestructura*”, Tecnología de la Construcción UNAD, 2012.
- Castelli N. “*Metodología de control de calidad de concretos en obra, mediante calorimetría semi-adiabática de bajo costo.*” [Inédito].
- Carino NJ, Lew HS. “*The maturity method: from theory to application, Building and Fire*”. Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-8911, USA, p. 1–19. 2001.
- De Shutter G. “*Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete*”. *Cement & Concrete Composites Vol 26* 437–443. 2004.
- Díaz JC, Bautista L, Sánchez A, Ruíz D. “*Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones*”. *Revista de ingeniería – Universidad de Los Andes*. 2004.
- EHE. “*Instrucción del hormigón estructural.*” Ministerio de fomento. 2008.
- Fernández J. “*Estudio experimental de la evolución de las características mecánicas del hormigón curado en diversas condiciones y su aplicación al cálculo de los procesos de descimbrado*”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. 1986.
- Freiesleben Hansen P, Pedersen J. “*Maleinstrument til kontrol af betons haerdning.*” *J Nordic Concr Federation (1)*:21–5. 1997.
- Gasch, MI, “*Estudio de la evolución de cargas en forjados y estructuras auxiliares de apuntalamiento durante la construcción de edificios de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas*” Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia. 2012.
- Haung R, Chen JJ, Sun KS. “*Planning gang formwork operations for building construction using simulations*”. *Automation in Construction Vol. 13*, 765– 779, 2004.
- IDEAM. “*Boletín Climatológico Mensual – Septiembre de 2012.*”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2012.
- Lachemi L, Hossain KMA, Anagnostopoulos C, Sabouni AR. “*Application of maturity method to slipforming operations: Performance validation*”. *Cement & Concrete Composites Vol. 29*, 290–299. 2007.
- Liao WC, Lee BJ, Kang CW. “*A humidity-adjusted maturity function for the early age strength prediction of concrete*”. *Cement & Concrete Composites. Vol 30*, 515–523. 2008.
- McIntosh JD. “*The effects of low-temperature curing on the compressive strength of concrete. In: RILEM symposium on winter concreting*”, Copenhagen, Danish Institute for Building Research, Session B-II, 1956.

- NSR 10. “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”. AIS – Asociación Colombiana de Ingeniería. 2010.
- NTC 112. “Mezcla Mecánica de Pastas De Cemento Hidráulico y Morteros de Consistencia Plástica”. 2009.
- Quimbay R. “Adecuada aplicación del control térmico y de madurez del concreto (calorimetrías del concreto) en la determinación de tiempos de desmolde y descimbre en vivienda”. *Revista Noticreto*. Vol 92, 2009.
- Rastrup E. *Heat of Hydration*. *Mag Concr Res*; 6(17):127–40. 1954.
- Voigt T, Sun Z, Shah SP. “Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar”. *Cement & Concrete Composites* Vol 28, 307–316. 2006.
- Waller V, d’ Aloia L, Cussig F, Lecrux S. “Using the maturity method in concrete cracking control at early ages”. *Cement & Concrete Composites* Vol. 26, 589–599, 2004.
- Zhang J, Cusson D, Monteiro P, Harvey J. “New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications”. *Cement and Concrete Research*. 2008.

## ANEXOS

### Anexo 1 Resistencia a la Compresión

#### PLACA

Dia	# Cilindros	Especimen	Dimesion		Carga Max	Resistencia	Resistencia	Promedio Resistencia (Mpa)
			Diámetro (cm)	Largo (cm)	kg	Kg/cm2	Mpa	
28	2	1	10,312	20,34	26050	310,9	30,5	29,9
			10,311	20,383				
			10,318	20,278				
			10,375	20,29				
		2	10,197	20,336	24450	299,5	29,4	
			10,191	20,385				
			10,193	20,381				
			10,199	20,484				
14	2	1	10,217	20,462	21550	262,3	25,7	26,1
			10,236	20,433				
			10,254	20,36				
			10,202	20,435				
		2	10,217	20,485	22100	269,2	26,4	
			10,231	20,473				
			10,216	20,518				
			10,235	20,499				
7	2	1	10,202	20,358	19550	237,7	23,3	23,0
			10,291	20,436				
			10,248	20,424				

			10,191	20,436				
		2	10,233	20,136	18900	230,8	22,6	
			10,219	20,299				
			10,169	20,354				
			10,225	20,287				
3	2	1	10,452	20,489	16370	194,1	19,0	18,7
			10,268	20,531				
			10,346	20,559				
			10,38	20,608				
		2	10,353	20,259	15600	188,1	18,4	
			10,194	20,415				
			10,312	20,426				
			10,248	20,489				
1	2	1	10,264	20,413	9400	113,8	11,2	11,5
			10,228	20,431				
			10,246	20,395				
			10,282	20,413				
		2	10,158	20,178	9900	120,9	11,9	
			10,23	20,446				
			10,232	20,358				
			10,218	20,483				

**MURO**

Dia	# Cilindros	Especimen	Dimesion		Carga Max	Resistencia	Resistencia	Promedio Resistencia (Mpa)
			Diámetro (cm)	Largo (cm)	kg	Kg/cm2	Mpa	
28	2	1	10,29	20,424	33150	400,1	39,2	38,8
			10,289	20,614				
			10,225	20,625				
			10,28	20,585				
		2	10,159	20,717	31650	391,6	38,4	
			10,102	20,655				
			10,121	20,711				
			10,193	20,702				
14	2	1	10,237	20,421	27800	338,0	33,2	33,7
			10,215	20,469				
			10,212	20,436				
			10,267	20,466				
		2	10,175	20,513	28450	348,3	34,2	
			10,242	20,502				
			10,166	20,578				
			10,21	20,572				
7	2	1	10,241	20,604	24600	296,4	29,1	29,1
			10,275	20,507				
			10,315	20,411				
			10,288	20,442				
		2	10,205	20,402	24450	297,3	29,2	
			10,147	20,38				
			10,378	20,331				
			10,201	20,341				

3	2	1	10,275	20,594	19750	240,2	23,6	23,2
			10,167	20,545				
			10,209	20,685				
			10,275	20,75				
		2	10,22	20,475	19200	233,7	22,9	
			10,234	20,489				
			10,193	20,467				
			10,267	20,575				
1	2	1	10,169	20,314	12200	148,4	14,6	15,3
			10,236	20,59				
			10,31	20,351				
			10,21	20,456				
		2	10,152	20,301	13250	163,6	16,0	
			10,196	20,455				
			10,152	20,52				
			10,12	20,327				



## Anexo 2 Resistencia a Flexión

### PLACA

Día	# Vigas	Especimen	Resistencia	Promedio Resistencia (MPa)
			Mpa	
28	1	1	4,09	4,09
14	2	1	3,79	3,87
		2	3,94	
7	2	1	3,57	3,63
		2	3,69	
3	2	1	3,10	3,28
		2	3,46	
1	2	1	2,09	2,29
		2	2,50	

**MURO**

Día	# Vigas	Especimen	Resistencia	Promedio Resistencia (MPa)
			Mpa	
28	2	1	5,26	5,13
		2	4,99	
14	2	1	4,99	5,05
		2	5,11	
7	2	1	4,42	4,48
		2	4,53	
3	1	1	3,81	3,81
1	2	1	-	3,46
		2	3,46	

### Anexo 3 Resistencia A Tracción Indirecta

#### PLACA

Dia	# Cilindros	Espécimen	Dimensión		Carga Max	Resistencia	Resistencia	Promedio Resistencia (MPa)
			Diámetro (cm)	Largo (cm)	kg	Kg/cm2	Mpa	
28	2	1	10,288	20,53	8310	25,0	2,4	2,6
			10,345	20,546				
			10,305	20,52				
			10,358	20,548				
		2	10,226	20,291	9270	28,3	2,8	
			10,221	20,444				
			10,168	20,461				
			10,283	20,399				
14	2	1	10,204	20,428	7270	22,1	2,2	2,3
			10,228	20,44				
			10,307	20,473				
			10,239	20,506				
		2	10,261	20,534	7920	24,1	2,4	
			10,159	20,577				
			10,163	20,527				
			10,198	20,511				
7	2	1	10,283	20,415	6705	20,5	2,0	2,0
			10,228	20,278				
			10,225	20,34				
			10,21	20,28				
		2	10,265	20,495	6375	19,4	1,9	
			10,205	20,437				

			10,212	20,347				
			10,249	20,403				
3	2	1	10,34	20,259	4995	15,3	1,5	1,7
			10,166	20,423				
			10,119	20,356				
			10,189	20,351				
		2	10,189	20,334	6070	18,7	1,8	
			10,19	20,235				
			10,214	20,27				
			10,227	20,257				
1	2	1	10,154	20,604	4510	13,7	1,3	1,3
			10,238	20,562				
			10,296	20,236				
			10,256	20,543				
		2	10,262	20,38	4455	13,6	1,3	
			10,184	20,261				
			10,192	20,438				
			10,234	20,345				

**MURO**

Dia	# Cilindros	Especimenes	Dimesion		Carga Max	Resistencia	Resistencia	Promedio Resistencia (MPa)
			Diámetro (cm)	Largo (cm)	kg	Kg/cm2	Mpa	
28	2	1	10,257	20,638	11990	36,2	3,5	3,2
			10,252	20,517				
			10,236	20,602				
			10,285	20,535				
		2	10,365	20,446	9750	29,4	2,9	
			10,306	20,258				
			10,333	20,489				
			10,334	20,492				
14	2	1	10,243	20,54	10370	31,3	3,1	2,7
			10,193	20,531				
			10,305	20,738				
			10,307	20,517				
		2	10,265	20,333	7800	23,8	2,3	
			10,23	20,44				
			10,149	20,418				
			10,254	20,438				
7	2	1	10,299	20,563	7750	23,3	2,3	2,3
			10,352	20,625				
			10,318	20,533				
			10,21	20,6				
		2	10,147	20,466	8000	24,2	2,4	
			10,325	20,276				
			10,314	20,465				
			10,345	20,494				

3	2	1	10,184	20,53	6775	20,7	2,0	1,9
			10,272	20,55				
			10,142	20,542				
			10,028	20,461				
		2	10,424	20,399	5870	17,6	1,7	
			10,347	20,45				
			10,321	20,479				
			10,33	20,552				
1	2	1	10,223	20,556	5430	16,4	1,6	1,5
			10,175	20,572				
			10,167	20,646				
			10,233	20,695				
		2	10,211	20,492	4340	13,1	1,3	
			10,252	20,408				
			10,336	20,51				
			10,327	20,486				

## Anexo 4 Módulo de Elasticidad

### PLACA

Dia	# Cilindros	Especimen	Modulo	Promedio Modulo(MPa)
			Mpa	
28	2	1	20281,16	22208,38
		2	24135,59	
14	2	1	18138,96	18561,80
		2	18984,65	
7	2	1	17491,29	17406,01
		2	17320,72	
3	2	1	15371,32	15601,63
		2	15831,93	
1	2	1	12468,19	12845,93
		2	13223,66	

**MURO**

Día	# Vigas	Especimen	Resistencia	Promedio Resistencia (MPa)
			Mpa	
28	2	1	24787,20	25035,55
		2	25283,90	
14	2	1	23675,78	23592,44
		2	23509,11	
7	2	1	21895,46	21490,17
		2	21084,89	
3	1	1	15946,20	15946,20
		2	15747,74	
1	2	1	15442,54	15340,70
		2	15238,86	



## Anexo 5 Tiempos de Fraguado Concreto

### PLACA

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo
1,97	38	0,169	3	1,61E-04	1,050	118	0,021	2,072
2,83	34	0,151	4	6,48E-05	2,334	170	0,368	2,230
3,10	70	0,311	4	6,48E-05	4,805	186	0,682	2,270
3,33	80	0,356	4	6,48E-05	5,492	200	0,740	2,301
3,78	110	0,489	5	3,20E-05	15,294	227	1,185	2,356
4,13	68	0,302	6	1,60E-05	18,837	248	1,275	2,394
4,67	108	0,480	6	1,60E-05	29,918	280	1,476	2,447

### MURO

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo
1,50	0	0,00	1	6,46E-04	0,00	90	-	1,95
2,15	0	0,00	1	6,46E-04	0,00	129	-	2,11
2,53	80	0,36	1	6,46E-04	0,55	152	-0,26	2,18
3,08	64	0,28	3	1,61E-04	1,77	185	0,25	2,27
3,65	50	0,22	4	6,48E-05	3,43	219	0,54	2,34
4,10	94	0,42	4	6,48E-05	6,45	246	0,81	2,39
4,57	78	0,35	5	3,20E-05	10,85	274	1,04	2,44
5,17	106	0,47	5	3,20E-05	14,74	310	1,17	2,49
5,55	106	0,47	6	1,60E-05	29,36	333	1,47	2,52

## Anexo 6 Tiempos de Fraguado Mortero

### PLACA

6°C

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo
3,00	22	0,09779	2	3,22E-04	0,3033	180	-0,52	2,26
3,67	24	0,10668	2	3,22E-04	0,3309	220	-0,48	2,34
6,18	32	0,14224	2	3,22E-04	0,4412	371	-0,36	2,57
8,57	32	0,14224	3	1,61E-04	0,8844	514	-0,05	2,71
11,32	42	0,18669	4	6,48E-05	2,8831	679	0,46	2,83
13,17	24	0,10668	6	1,60E-05	6,6484	790	0,82	2,90
16,50	64	0,28448	6	1,60E-05	17,7290	990	1,25	3,00
17,50	74	0,32893	6	1,60E-05	20,4992	1050	1,31	3,02
18,30	111	0,493395	6	1,60E-05	30,7488	1098	1,49	3,04

13°C

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo	LOG Resis. Ajustado
2,33	34	0,15	1	6,46E-04	0,23	140,00	-0,63	2,15	0,27
3,25	40	0,18	1	6,46E-04	0,28	195,00	-0,56	2,29	0,63
3,67	48	0,21	1	6,46E-04	0,33	220,00	-0,48	2,34	0,86
6,65	28	0,12	3	1,61E-04	0,77	399,00	-0,11	2,60	3,84
8,63	40	0,18	4	6,48E-05	2,75	518,00	0,44	2,71	7,41
10,30	48	0,21	5	3,20E-05	6,67	618,00	0,82	2,79	11,57
11,12	50	0,22	6	1,60E-05	13,85	667,00	1,14	2,82	14,02
12,37	60	0,27	6	1,60E-05	16,62	742,00	1,22	2,87	18,34
15,08	80	0,36	6	1,60E-05	22,16	905,00	1,35	2,96	30,27
16,87	105	0,47	6	1,60E-05	29,09	1012,00	1,46	3,01	40,12

23°C

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo	LOG Resis. Ajustado
2,25	20	0,0889	1	6,46E-04	0,1377	135	-0,8610	2,1303	0,2497
3,13	24	0,10668	1	6,46E-04	0,1652	188	-0,7819	2,2742	0,5755
3,83	66	0,29337	1	6,46E-04	0,4544	230	-0,3425	2,3617	0,9568
5,20	30	0,13335	4	6,48E-05	2,0594	312	0,3137	2,4942	2,0642
6,30	42	0,18669	5	3,20E-05	5,8397	378	0,7664	2,5775	3,3489
7,80	120	0,5334	6	1,60E-05	33,2419	468	1,5217	2,6702	5,7384

MURO

6°C

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo
4,00	44	0,19558	1	6,46E-04	0,3030	240	-0,5186	2,3802
5,00	40	0,1778	2	3,22E-04	0,5515	300	-0,2584	2,4771
7,58	60	0,2667	3	1,61E-04	1,6583	455	0,2197	2,6580
9,88	50	0,22225	4	6,48E-05	3,4323	593	0,5356	2,7731
11,50	50	0,22225	5	3,20E-05	6,9520	690	0,8421	2,8388
12,53	44	0,19558	6	1,60E-05	12,1887	752	1,0860	2,8762
13,77	60	0,2667	6	1,60E-05	16,6210	826	1,2207	2,9170
14,27	82	0,36449	6	1,60E-05	22,7153	856	1,3563	2,9325
15,43	110	0,48895	6	1,60E-05	30,4718	926	1,4839	2,9666

13°C

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo
3,33	42	0,19	2	3,22E-04	0,58	200,00	-0,24	2,30
4,25	72	0,32	2	3,22E-04	0,99	255,00	0,00	2,41
4,83	80	0,36	2	3,22E-04	1,10	290,00	0,04	2,46
6,23	80	0,36	3	1,61E-04	2,21	374,00	0,34	2,57
7,78	192	0,85	3	1,61E-04	5,31	467,00	0,72	2,67
9,73	86	0,38	6	1,60E-05	23,82	584,00	1,38	2,77
11,40	118	0,52	6	1,60E-05	32,69	684,00	1,51	2,84

23°C

Tiempo (hr)	Lectura (lb)	Fuerza (KN)	Aguja	Area (m2)	Resistencia (Mpa)	Tiempo (min)	LOG Resistencia	LOG Tiempo
3,17	44	0,19558	3	1,61E-04	1,2161	190	0,08	2,28
4,13	120	0,5334	3	1,61E-04	3,3165	248	0,52	2,39
4,92	100	0,4445	4	6,48E-05	6,8645	295	0,84	2,47
5,42	80	0,3556	5	3,20E-05	11,1232	325	1,05	2,51
6,22	126	0,56007	6	1,60E-05	34,9040	373	1,54	2,57

## Anexo 7 Resistencia a Compresión en Mortero

### PLACA

Temperatura 6°								
Día	# Cubos		Dimensión		Peso	Carga Max	Resistencia	Promedio Resistencia
			Largo (cm)	Ancho (cm)	gr	kg	Kg/cm2	
32	3	1	5,13	5,07	284,20	4605,00	177,19	173,26
		2	5,12	5,13	291,40	4765,00	181,63	
		3	5,07	5,13	284,90	4180,00	160,97	
16	3	1	5,10	5,09	281,11	4295,00	165,68	169,34
		2	5,12	5,07	281,45	4325,00	166,68	
		3	5,08	5,15	282,43	4595,00	175,67	
8	3	1	5,00	5,11	280,80	3371,00	131,96	130,24
		2	5,08	5,16	284,40	3356,00	128,15	
		3	5,07	5,01	278,10	3323,00	130,62	
4	3	1	4,99	5,09	276,87	1740,00	68,51	67,70
		2	5,01	5,20	285,21	1695,00	65,08	
		3	5,02	5,08	268,79	1775,00	69,51	
2	3	1	5,10	5,10	283,81	1094,00	42,03	44,09
		2	5,01	4,97	270,75	1121,00	45,09	
		3	5,00	5,01	269,45	1132,00	45,14	
0,7625	3	1	5,06	5,08	279,70	135,00	5,25	4,96
		2	5,64	5,11	272,90	125,00	4,34	
		3	4,98	5,01	273,00	132,00	5,29	

Temperatura 13°								
Día	# Cubos		Dimensión		Peso	Carga Max	Resistencia	Promedio Resistencia
			Largo (cm)	Ancho (cm)	gr	kg	Kg/cm2	
32	3	1	5,00	5,10	256,61	4084,03	160,00	160,53
		2	4,99	5,02	248,74	4079,00	162,67	
		3	5,13	5,01	255,11	4082,00	158,92	
16	3	1	5,03	5,05	246,73	3915,00	154,22	146,24
		2	5,05	5,02	248,73	3710,00	146,26	
		3	5,03	5,05	247,08	3510,00	138,24	
8	3	1	5,10	5,19	268,30	3280,00	123,89	134,58

		2	5,01	5,08	264,70	3535,00	138,98	
		3	5,01	5,01	256,39	3540,00	140,87	
4	3	1	5,10	5,07	263,70	2295,00	88,74	89,06
		2	5,06	5,04	258,41	2182,00	85,61	
		3	5,07	5,03	268,00	2365,00	92,83	
2	3	1	5,09	5,08	252,38	1580,00	61,07	66,22
		2	5,20	5,07	275,03	1790,00	67,87	
		3	4,98	5,06	258,66	1755,00	69,72	
1	3	1	5,19	5,19	266,00	715,00	26,54	28,13
		2	5,04	5,28	267,19	770,00	28,99	
		3	5,12	5,18	288,32	765,00	28,87	
0,6 9	3	1	5,07	5,04	278,90	145,00	5,67	5,47
		2	5,07	5,03	276,70	130,00	5,10	
		3	5,03	5,02	278,40	142,00	5,62	

Temperatura 23°								
Día	# Cubos		Dimensión		Peso	Carga Max	Resistencia	Promedio Resistencia
			Largo (cm)	Ancho (cm)	gr	kg	Kg/cm2	
32	3	1	5,085	5,115	274,92	4530	174,17	172,48
		2	5,064	5,086	271,05	4240	164,63	
		3	5,032	5,067	269,81	4555	178,65	
16	3	1	5,064	5,035	276,83	3777	148,13	144,18
		2	5,139	5,119	277,32	3985	151,48	
		3	5,07	5,078	276,61	3422	132,92	
8	3	1	5,094	5,009	277,26	3267	128,04	125,85
		2	5,101	5,102	285,73	3210	123,34	
		3	5,103	5,102	283,84	3285	126,17	
4	3	1	5,04	5,025	274,49	2782	109,85	117,30
		2	5,094	5,096	285,05	3120	120,19	
		3	5,098	5,046	281,46	3135	121,87	
2	3	1	5,089	5,14	278,89	2650	101,31	99,42
		2	5,079	5,107	278,52	2495	96,19	
		3	5,082	5,097	280,27	2610	100,76	
1	3	1	5,293	5,11	280,44	1240	45,85	43,73
		2	5,049	5,057	275,59	1210	47,39	
		3	5,054	5,163	278,4	990	37,94	
0,3 1	3	1	5,12	5,05	295,5	150	5,80	5,96
		2	5,03	5,04	277,4	157	6,19	
		3	5,04	5,02	274,3	149	5,89	

## MURO

Temperatura 6°								
Día	# Cubos		Dimensión		Peso	Carga Max	Resistencia	Promedio Resistencia
			Largo (cm)	Ancho (cm)	gr	kg	Kg/cm2	
32	3	1	5,05	5,03	289,70	12940,00	509,32	519,33
		2	5,02	5,01	289,30	13000,00	516,17	
		3	5,02	5,01	294,10	13390,00	532,51	
16	3	1	5,20	5,14	298,95	11910,00	445,94	446,42
		2	5,07	5,25	297,25	12190,00	457,44	
		3	5,14	5,26	302,49	11780,00	435,88	
8	3	1	5,02	5,02	294,51	9350,00	371,32	377,34
		2	5,08	5,01	292,05	9360,00	367,99	
		3	5,01	5,10	289,69	10030,00	392,70	
4	3	1	5,00	5,10	290,58	7940,00	310,88	296,75
		2	5,06	5,10	293,48	7375,00	285,34	
		3	5,08	5,14	293,43	7673,00	294,03	
2	3	1	5,08	5,08	296-05	3790,00	146,95	142,75
		2	4,99	5,11	295,24	3975,00	155,89	
		3	5,20	5,11	300,09	3335,00	125,41	
1	3	1	4,99	5,02	263,10	1828,00	72,93	74,04
		2	5,02	4,91	268,43	1876,00	76,23	
		3	5,00	4,96	265,29	1808,00	72,95	
0,5625	3	1	5,02	5,01	279,40	602,00	23,94	24,37
		2	5,01	5,02	283,10	623,00	24,77	
		3	5,02	5,01	284,70	614,00	24,41	

Temperatura 13°								
Día	# Cubos		Dimensión		Peso	Carga Max	Resistencia	Promedio Resistencia
			Largo (cm)	Ancho (cm)	gr	kg	Kg/cm2	

32	3	1	5,018	5,056	273,9 4	7210	284,18	281,90
		2	5,126	5,017	276,9 8	7160	278,41	
		3	5,084	5,051	276,1 5	7270	283,11	
16	3	1	5,117	5,167	273,0 0	6620	250,38	263,46
		2	5,118	5,068	273,5 0	6960	268,33	
		3	5,119	5,077	274,2 0	7060	271,65	
8	3	1	5,045	5,125	298,6 0	6690	258,744	246,88
		2	5,059	5,068	277,1 0	7070	275,752	
		3	5,085	5,094	284,7 0	5340	206,154	
4	3	1	4,992	5,179	277,7 8	5605	216,798	218,13
		2	4,998	5,106	275,6 5	5760	225,707	
		3	5,004	5,126	275,5 3	5435	211,887	
2	3	1	5,121	5,102	299,4 2	4860	186,012	176,34
		2	5,069	5,074	293,9 4	4640	180,404	
		3	5,092	5,302	297,0 0	4390	162,606	
1	3	1	5,04	5,018	282,2 7	1555	61,485	62,36
		2	4,918	5,054	277,1 8	1595	64,171	
		3	4,902	4,931	286,1 2	1485	61,435	
0,43 5	3	1	5,012	5,01	299,3 0	424	16,886	16,74
		2	5,045	5,008	288,0 0	432	17,099	
		3	5,03	5,022	294,5 0	410	16,231	

Temperatura 23°								
Día	# Cubos		Dimensión		Peso	Carga Max	Resistenci a	Promedio Resistenci a
			Largo (cm)	Ancho (cm)	gr	kg	Kg/cm2	
32	3	1	5,07	5,15	292,6 5	13610,00	521,96	515,98
		2	5,08	5,07	286,3 4	14690,00	569,69	
		3	5,82	5,16	286,0 1	13690,00	456,30	



16	3	1	5,22	5,12	296,5 0	10210,00	382,39	428,01
		2	5,09	5,08	292,8 0	12520,00	484,77	
		3	5,08	5,08	289,1 0	10760,00	416,87	
8	3	1	5,06	5,11	294,9 5	11650,00	450,92	445,90
		2	5,18	5,16	311,7 2	11850,00	443,77	
		3	5,11	5,14	302,4 2	11620,00	443,01	
4	3	1	5,19	5,06	297,2 6	7940,00	302,46	346,31
		2	5,08	5,19	298,2 7	9100,00	345,42	
		3	5,09	5,25	299,3 1	10460,00	391,05	
2	3	1	5,10	5,34	305,3 5	6960,00	255,46	261,64
		2	5,21	5,09	298,9 7	6465,00	243,84	
		3	5,09	5,01	295,2 5	7275,00	285,62	
1	3	1	5,02	5,01	279,4 0	3735,00	148,51	146,92
		2	5,01	5,02	283,1 0	3715,00	147,71	
		3	5,02	5,01	284,7 0	3635,00	144,53	
0,24 9	3	1	5,21	5,18	269,6 0	795,00	29,46	28,19
		2	5,26	5,29	272,2 0	785,00	28,21	
		3	5,27	5,33	275,3 0	756,00	26,91	